

Міністерство освіти і науки України
 Національний університет «Чернігівська політехніка» (Україна)
 Асоціація випускників Національного університету «Чернігівська політехніка»
 Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Україна)
 Національний університет «Київський авіаційний інститут» (Україна)
 Херсонський національний технічний університет (Україна)
 Луцький національний технічний університет (Україна)
 Донбаська державна машинобудівна академія (Україна)
 Сумський державний університет (Україна)
 ТОВ «ПЕТ Технолоджиз» (Україна)
 ТОВ «Костал Україна» (Україна)
 Oerlikon Barmag GmbH (Німеччина)
 Академія наук вищої освіти України
 Лодзький технічний університет (Польща)
 Технічний університет в Кошице (Словаччина)
 Thyssenkrupp Materials International GmbH (Німеччина)
 Національний університет «Львівська політехніка» (Україна)
 Батумський державний університет ім. Шота Руставелі (Грузія)
 Київський національний університет технологій та дизайну (Україна)
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
 Українське товариство механіки ґрунтів, геотехніки і фундаментобудування
 Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та
 військової техніки (Україна)



Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ»

Том 1

21 - 22 травня 2026 р.
 м. Чернігів

УДК 621; 624; 674; 684; 621.22; 621.51-54; 661; 664; 620.268; 621.791; 004
К63

Рекомендовано до друку вченою радою Національного університету
«Чернігівська політехніка» (протокол №6 від 25.05.2026)

К63 **Комплексне** забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2026) : матеріали тез доповідей XVI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 21–22 травня 2026 р.) : у 3-х томах. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Приступа Анатолій Леонідович [та ін.]. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2026. – Т. 1. – 300 с.

ISBN 978-617-8584-01-6

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Михайло Блощичин, канд. техн. наук, доцент
Тімур Ганєєв, канд. техн. наук, доцент
Андрій Єрошенко, канд. техн. наук, доцент
Микола Корзаченко, канд. техн. наук, доцент
Сергій Олексієнко, канд. техн. наук, доцент
Ірина Прибисько, канд. техн. наук, доцент
Анатолій Приступа канд. техн. наук, доцент
Михайло Руденко, старший викладач
Ольга Сапон, студентка
Сергій Степенко, канд. техн. наук, ст. дослідник
Світлана Ющенко, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний координатор оргкомітету конференції:

канд. техн. наук, доцент Сергій Сапон, тел. (097) 3844197, e-mail: s.sapon@gmail.com або
kzyatps@gmail.com
<https://www.facebook.com/kzyatps/>
www.conference-chernihiv-polytechnik.com

*За зміст матеріалів, викладених в тезах доповідей персональну відповідальність несуть автори



УДК 621; 624; 674; 684; 621.22; 621.51-54; 661; 664; 620.268; 621.791; 004

ISBN 978-617-8584-01-6

© Національний університет
«Чернігівська політехніка», 2026



Co-funded by
the European Union

МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

доктор Шефер Клаус (Oerlikon Barmag, Німеччина)
Дітмар Йенке (BBEngineering GmbH, Німеччина)
Штильгер Мартін (ThyssenKrupp, Німеччина)
д.-р. наук, проф. Бадіда Мирослав, (Технічний університет Кошице, Словаччина)
д.-р. наук, проф. Міхал Бембенек, (AGH Університет, Краків, Польща)
д.-р. наук, проф. Вархола Міхал, (Президент Академічного співтовариства М. Балудянського, Словаччина)
д.т.н., проф. Голетіані Кетаван (Батумський навчальний університет навігації, Грузія)
д.т.н., проф. Ісмаїлов Нізамі (Азербайджанський технічний університет, Азербайджан)
д.-р. наук, проф. Келемен Міхал, (Кошицький університет охоронного менеджменту, Словаччина)
д.ф.н., проф. Новрузов Рафік (Бакінський слов'янський університет, Азербайджан)
д.т.н., проф. Радзевич С.П., (EATON Corp., США)
проф. Сандал Ян-Урбан (Ректор інституту ім. д-ра Яна-Урбана Сандала, Норвегія)
д.т.н., проф. Федориненко Д. Ю. (Tohoku University, Японія)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

д.т.н., проф. Новомлинець О.О. (м. Чернігів, ректор НУ «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Ступа В.І. (м. Чернігів, засновник конференції, почесний член національного програмного комітету)
д.е.н., проф. Шкарлет С.М. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Анісімов В.М. (м. Дніпро, Український державний університет науки і технологій)
д.т.н., проф. Антонюк В.С. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Банзак О.В. (м. Одеса, Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку)
д.т.н., проф. Берднікова О.М. (м. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України)
д.т.н., проф. Білик С.І. (м. Київ, Київський національний університет будівництва і архітектури)
д.т.н., проф. Бобир М.І. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Болотов Г.П. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Васильченко Я.В. (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія)
д.т.н., проф. Веселовська Н.Р. (м. Вінниця, Донецький національний університет ім. Василя Стуса)
д.т.н., проф. Винников Ю.Л. (м. Полтава, Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»)
д.т.н., проф. Воронцов Б.С. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Гавриш О.А. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Гайда С.В. (м. Львів, Національний лісотехнічний університет України)
д.т.н., доц. Гасенко А.В. (м. Полтава, Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»)
д.т.н., проф. Головка Л.Ф. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., доц. Грибков Е.П. (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія)
д.т.н., проф. Грицай І.Є. (м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»)
д.т.н., проф. Данильченко Ю.М. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Денисов Ю.О. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., с.н.с. Джала Р.М. (м. Львів, Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України)
д.т.н., проф. Дмитрієв Д.О. (м. Херсон, Херсонський національний технічний університет)
д.т.н., проф. Долгов М.А. (м. Київ, Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України)
д.т.н., проф. Дубровський М.П. (м. Одеса, Одеський національний морський університет)
д.т.н., проф. Єременко В.С. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Залога В.О. (м. Суми, Сумський державний університет)
д.т.н., проф. Заріцький О.В. (м. Київ, Державний університет «Київський авіаційний інститут»)
д.т.н., проф. Звірко О.І. (м. Львів, Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України)
д.т.н., проф. Зінько Р.В. (м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»)
д.т.н., проф. Іванець О.Б. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
к.т.н., проф. Іванов М.І. (м. Вінниця, Асоціація спеціалістів промислової гідравліки і пневматики)
д.т.н., проф. Іванов В.О. (м. Суми, Сумський державний університет)

д.геол.н., проф. Іванишин В.А. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Іскович-Лотоцький Р.Д. (м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет)
д.т.н., проф. Казимир В.В. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., доц. Казмиренко Ю.О. (м. Миколаїв, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова)
д.т.н., проф. Калафатова Л.П. (м. Покровськ, Донецький національний технічний університет)
д.т.н., проф. Кальченко В.І. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Кальченко В.В. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Квасніков В.П. (м. Київ, Національний університет «Київський авіаційний інститут»)
д.т.н., проф. Кириченко А.М. (м. Кропивницький, Центральноукраїнський національний технічний університет)
д.т.н., проф. Клименко Г.П. (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія)
д.т.н., проф. Клименко С.А. (м. Київ, Інститут надтвердих матеріалів ім. Бакуля НАН України)
д.т.н., проф. Клочко О.О. (м. Харків, НТУ «Харківський політехнічний інститут»)
д.т.н., проф. Ковалевський С.В. (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія)
д.т.н., проф. Ковальов В.Д. (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія)
д.т.н., проф. Козловський В.В. (м. Київ, Національний університет «Київський авіаційний інститут»)
д.т.н., проф. Копей В.Б. (м. Івано-Франківськ, Івано-Франківський національний університет нафти і газу)
д.т.н., проф. Копилов В.І. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
к.т.н., проф. Корнієнко М.В. (м. Київ, Київський національний університет будівництва і архітектури)
д.т.н., проф. Корченко О.Г. (м. Київ, Національний університет «Київський авіаційний інститут»)
д.т.н., проф. Криворучко О.В. (м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України)
д.т.н., ст. наук. співр. Костін В.А. (м. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України)
д.т.н., проф. Кузнецов Ю.М. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Кузьмичев А.І. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Лаврінченко В.І. (м. Київ, Інститут надтвердих матеріалів ім. Бакуля НАН України)
д.т.н., проф. Лебедев В. О. (м. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України)
д. держ. упр., проф. Левченко Н.М. (м. Запоріжжя, Національний університет «Запорізька політехніка»)
д.т.н., проф. Луців І.В. (м. Тернопіль, Державний університет «Житомирська політехніка»)
д.т.н., проф. Маєвський В.О. (м. Львів, Національний лісотехнічний університет України)
д.т.н., проф. Мазанко В.Ф. (м. Київ, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України)
д.т.н., проф. Майборода В.С. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Марков О.Є. (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія)
д.т.н., проф. Марчук В.І. (м. Луцьк, Луцький національний технічний університет)
д.т.н., доц. Мачуга О.С. (м. Львів, Національний лісотехнічний університет України)
д.т.н., проф. Мелешко Є.В. (м. Кропивницький, Центральноукраїнський національний технічний університет)
д.т.н., проф. Мельничук П.П. (м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка»)
д.т.н., проф. Мироненко Є.В. (м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія)
д.філ. н., проф. Москаленко В.В. (м. Київ, Інститут психології імені Г.С. Костюка НАПН України)
д.т.н., проф. Огінський Й.К. (м. Запоріжжя, Запорізький національний університет)
д.т.н., проф. Онисько О.Р. (м. Івано-Франківськ, Івано-Франківський національний університет нафти і газу)
д.т.н., проф. Онищенко В.В. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Орловський Б.В. (м. Київ, Київський національний університет технологій та дизайну)
д.т.н., проф. Охріменко О.А. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Павленко І.В. (м. Суми, Сумський державний університет)
д.т.н., проф. Павленко П.М. (м. Київ, Національний університет «Київський авіаційний інститут»)
д.т.н., проф. Пальчевський Б.О. (м. Луцьк, Луцький національний технічний університет)

д.т.н., проф. Панчук В.Г. (м. Івано-Франківськ, Івано-Франківський національний університет нафти і газу)
д.т.н., проф. Пасічник В.А. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Пермяков О.А. (м. Харків, НТУ «Харківський політехнічний інститут»)
д.т.н., проф. Петраков Ю.В. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Певцов Г.В. (м. Черкаси, Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки)
д.т.н., проф. Пінчевська О.О. (м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України)
д.т.н., проф. Пилипенко О.І. (м. Чернігів, почесний член національного програмного комітету)
д.т.н., проф. Плаван В.П. (м. Київ, Київський національний університет технологій та дизайну)
д.т.н., проф. Повстяной О.Ю. (м. Луцьк, Луцький національний технічний університет)
д.т.н., проф. Похмурська Г.В. (м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»)
д.т.н., проф. Равська Н.С. (м. Київ, почесна членкиня національного програмного комітету)
д.т.н., проф. Роїк Т.А., (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Рудь В.Д. (м. Луцьк, Луцький національний технічний університет)
д.т.н., проф. Савенко В.І. (м. Київ, Київський національний університет будівництва і архітектури)
д.т.н., проф. Савченко О.В. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Саленко О.Ф., (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Сахно Є.Ю. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Семенов С.Г. (м. Харків, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця)
д.т.н., проф. Середа Б.П. (м. Кам'янське, Дніпровський державний технічний університет)
д.т.н., проф. Сиза О.І. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівський колегіум ім. Т.Г.Шевченка»)
д.т.н., проф. Смирнов І.В. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Струтинський В.Б. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Ступницький В.В. (м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»)
д.т.н., проф. Тітов В.А. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Тіхенко В.М. (м. Одеса, Національний університет «Одеська політехніка»)
д.пед.н., проф. Ткач Ю.М. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Тонконогий В.М. (м. Одеса, Національний університет «Одеська політехніка»)
д.т.н., с.н.с. Тристан А.В. (м. Черкаси, Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки)
д.т.н., проф. Фальченко Ю.В. (м. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України)
д.т.н., проф. Філоненко С.Ф. (м. Київ, Національний університет «Київський авіаційний інститут»)
д.т.н., проф. Хавін Г.Л. (м. Харків, НТУ «Харківський політехнічний інститут»)
д.т.н., проф. Цибуля С.Д. (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»)
д.т.н., проф. Цюцюра С.В. (м. Київ, Державний торговельно-економічний університет)
к.т.н., доц. Чередніков О.М. (м. Черкаси, Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки)
д.т.н., проф. Чухліб В.Л. (м. Харків, НТУ «Харківський політехнічний інститут»)
д.т.н., проф. Шахбазов Я.О. (м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»)
д.т.н., проф. Шевченко О.В. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Шинкаренко В.Ф. (м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського)
д.т.н., проф. Широков В.В. (м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»)
д.т.н., проф. Юдін О.К. (м. Київ, Київський національний університет ім. Тараса Шевченка)
д.т.н., проф. Юзефович Р.М. (м. Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України)
д.т.н. проф. Яремчук Л.А. (м. Львів, Національний лісотехнічний університет України)

Організатори конференції висловлюють щире подяку членам програмного комітету конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» за вагомий внесок в зростання авторитету і досягнення рівня найбільшої мультидисциплінарної міжнародної науково-практичної конференції України.

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ ПЛЕНАРНОГО ЗАСІДАННЯ

- Мигущенко Р.П., Пермяков О.А., Басова Є.В.** Сучасні тенденції 18
машинобудівного виробництва та досвід підготовки бакалаврів за програмою
подвійних дипломів із ВНЗ Німеччини
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків
- Петраков Ю.В., Охріменко О.А., Пасічник О.В.** Проєктування діаграми сталості 24
для токарного оброблення
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ
- Кузнєцов Ю.М., Шинкаренко В.Ф.** Генетичний підхід до створення самодіючих 27
мотор-шпинделів верстатів нового покоління
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ
- Гончар В.П., Горошко В.В.** Шляхи валоризації фосфогіпсових депозитів України: 41
від екологічного тягаря до стратегічного ресурсу
ТОВ «АРТІДЕК», м. Київ

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ СЕКЦІЙНИХ ЗАСІДАнь

СЕКЦІЯ 1.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА СИСТЕМИ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

- Radzevich S.P.** Evolution of the conjugate action law: For gear drives and gear-cutting 43
processes
EATON Corp., USA
- Dmytro Fedorynenko¹, Yohichi Nakao², Serhii Sapon³** Effect of groove shape and 45
orientation on viscous friction in surface-textured hydrostatic journal bearings
¹ *Tohoku University, Japan*
² *Kanagawa University, Japan*
³ *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv*
- Roman Protasov¹, Juraj Ondruška¹, Votontsov Borys², Bondarenko Oleksiy³, 46
Ustynenko Oleksandr³** Design optimization of the housing of a high-speed spindle with
hybrid drive
¹ *Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia*
² *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv*
³ *National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv*
- Gaioz Partskhaladze¹, Vladimer Chkhaidze², Gocha Chavleshvili¹, Boris 47
Gitolendia³, Borys Vorontsov⁴.** Vertical-axis wind turbine
¹ *Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi*
² *Batumi State Maritime Academy, Batumi*
³ *Georgian Technical University*
⁴ *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv*
- Maksym Lytvynenko, Dmytro Lesyk.** Improving surface quality of polycrystalline 48
diamond components using wire electrical discharge machining
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv
- Kiyanovsky Mykola, Tsyvinda Nataliia, Pikilnyak Andrey, Ziuhan Uliana** Enhancing 49
the durability and reliability of crushers through the implementation of new materials for
friction units
Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih

Kyrychenko Andrii, Amirseidov Mahomed. Analysis of velocity and force transmission in a machine tool with a parallel manipulator <i>Central Ukrainian National Technical University</i>	50
Kosmach O., Kovtun I. Trends and prospects of high-speed spindle units <i>Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv</i>	54
Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Міхєєв А.О., Жила О.В. Теплопружні деформації в гідростатичних опорах важких верстатів <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ</i>	56
Салій С. С., Головка Л. Ф., Кагляк О.Д. Чисельне дослідження динаміки фронту плавлення в задачі Стефана для лазерно-ливарних процесів <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ</i>	58
Колісник К.Д., Чухліб В.Л. Дослідження ступеня деформації при протягуванні поковок для виготовлення гаків <i>Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків</i>	60
Грицай І.Є., Вергун В.А. Методика розрахунку інтенсивності шуму зубчастої передачі, зумовленого похибками контактних поверхонь <i>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів</i>	61
Ковалевський С.В. Інтелектуальні цифрові двійники як драйвер інноваційного розвитку машинобудування <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ</i>	63
Яковенко І.Е., Пермяков О.А. Сучасний реверс інжиніринг <i>Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків</i>	65
Лавріненко В.І.¹, Солод В.Ю.² Сучасні тенденції у застосуванні «скриньок різного кольору» для прогнозування зносу різального інструменту ¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ ² Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське	67
Клименко С.А., Манохін А.С., Копейкіна М.Ю., Клименко С.Ан., Мельнічук Ю.О., Чумак А.О., Найдено А.Г., Пошванюк В.А. Напружено-деформований стан леза інструмента з РсВН на етапі врізання при фрезеруванні загартованої сталі <i>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ</i>	69
Четербух О. Ю., Шахбазов Я. О. Вплив геометричних розмірів конструкції плоского штанцювального преса на його кінетостатичні параметри <i>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів</i>	71
Четербух О. Ю., Шахбазов Я. О. Шляхи зменшення технологічних навантажень в плоских штанцювальних пресах <i>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів</i>	72
Майборода В.С.¹, Налімов Ю.С.² Вплив комплексної магнітно-абразивної обробки на стан поверхневого шару і опір утомі зразків зі сплаву ЕП 962 ¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ ² Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України, м. Київ	73
Гребенніков М.О.^{1,2}, Гончар Н.В.¹ Обґрунтування уніфікації часу віброабразивної обробки лопаток ГТД з різним вихідним мікрорельєфом ¹ Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя ² АТ «Івченко-прогрес», м. Запоріжжя	75

Уланов С. О., Качан О. Я. Модель процесу обробки кромки деталей ГТД вільним абразивом	77
<i>Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя</i>	
Омельченко Ю.В., Уланов С.О. Аналіз методів технологічної обробки для підвищення ресурсу лопаток ГТД	79
<i>Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя</i>	
Роїк Т.А., Гавриш О.А., Майстренко Ю.Ю. Антифрикційні композити на основі відходів латуні для деталей друкарських машин	81
<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ</i>	
Широкий Ю.В., Семененко О.Д. Особливості механізму зношування твердосплавного інструменту з зносостійкими покриттями	82
<i>Національний аерокосмічний університет «ХАІ», м. Харків</i>	
Філатов Ю.Д.¹, Сідорко В.І.², Ковальов С.В.¹, Ковальов В.А.³, Юрчишин О.Я.³ Утворення нальоту на робочій поверхні притира під час полірування міді	84
¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ	
² ДП «Інженерно-виробничий центр АЛКОН» НАН України	
³ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ	
Широков В.В.¹, Шахбазов Я. О.¹, Максимук О.В.², Білоус О.В.¹ Зародження вторинних структур за фрикційної взаємодії міді зі сталлю 38Х2НМА	86
¹ Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів	
² Львівський національний університет ім. Івана Франка, м. Львів	
Вовк О.В. Методика вимірювання температури в зоні контакту шліфувального круга і заготовки	87
<i>Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів</i>	
Піонткевич О.В., Шевчук Б.Р. Розрахункова точність зварювального комплексу	89
<i>Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця</i>	
Лисенко О.В., Трембіцький М.А. Застосування генеративного дизайну та адитивних технологій у проектуванні різального інструменту	91
<i>Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький</i>	
Ханас М.-Ю. Р. Перспективи реалізації машинного навчання та штучного інтелекту в технології машинобудування	93
<i>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів</i>	
Пасов Г.В., Венжега В.І., Кологойда А.В., Мурашківська В.П. Комп'ютерна перевірка однорідності дисперсій за χ^2 -критерієм у галузевому машинобудуванні та автомобільному транспорті за допомогою Microsoft Excel	95
<i>Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів</i>	
Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Корнієнко А.О., Богдан С.Ю. Аналіз мікроструктурної та хімічної неоднорідності електроіскрових покриттів ВК15 та Р6М5 на сталі 45	97
<i>Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ</i>	
Осипенко В.І., Прусс М.Р., Середюк С.П. Особливості формування ріжучого тиску кисневого струменя за використання двоканальних сопел в умовах газолазерного різання	99
<i>Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси</i>	
Матвійчук М.В., Лимаренко О. М., Баланюк Г.В. Дослідження зсуву, інерції обертання та впливу стискаючих сил при поперечних коливаннях балочних конструкцій	101
<i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса</i>	

- Кошель С.О.** Кінематичне дослідження плоскої механічної системи третього класу з двома складними ланками 103
Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ
- Гайдамаченко А.О., Ковальов Ю.А.** Експеримент із визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми 105
Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ
- Тулупов В.І.¹, Онищук С.Г.²** Використання перспективних технологій на основі інноваційних процесів створення функціональних поверхонь деталей машин 107
¹ *Краматорський фаховий коледж технологій та дизайну, м.Краматорськ*
² *Донбаська державна машинобудівна академія, м.Краматорськ*
- Федосєєва В.О., Матюхін А.Ю. Малкіна О.В.** Моделювання процесу штампування лопаток газотурбінного двигуна із використанням фізично інформованих нейронних мереж 108
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя
- Каряченко Н.В.** Рівняння форм поперечних коливань гнучких тягових органів установок з рухомими зосередженими вантажами 110
Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро
- Каряченко Н.В.** Розв'язання хвильового рівняння, яке описує динамічні процеси у довгоходовій насосній установці 112
Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро
- Karyachenko N.** Derivation of integral-differential equations of motion of ropes of cargo-transporting installations with moving inertial loads 113
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro
- Тунік В.О.¹, Смірнов О.М.¹, Довбенко В. В.², Ухін В. Є.³** Визначення раціональної швидкості обертання розливочного колеса кристалізатора МБЛЗ 114
¹ *Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАНУ м. Київ*
² *ТОВ «ВП «Укркабель», с.м.т. Коцюбинське*
³ *ТОВ «Шеффілд Рефракторіс Україна», м. Дніпро*
- Боряк К.Ф., Боряк М.К.** Комплексна система маскування морських безекіпажних надводних апаратів від тепловізійних приладів спостереження 116
Інститут військово-морських сил Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса
- Валецький Б.П., Літвінчук С.М.** Алгоритм проектування мехатронного модуля Луцький національний технічний університет, м. Луцьк 119
- Летюк В.І., Клочко О.О., Шелковий О.О.** Аналіз проблеми формування групової технології обробки різанням деталей типу «робоча лопатка» парової турбіни 121
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків
- Кохановський В. О., Семеніщева А. Д.** Підвищення стабільності трафаретного друку шляхом застосування адаптивної системи дозування фарби 122
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ
- Слабий О. О., Гриджук Я.С.** Установка для дослідження динаміки фрикційної взаємодії бурового інструменту із гірською породою 124
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ

- Слабий О. О.¹, Гридчук Я.С.¹, Русаченко О.В.²** Моделювання роботи ковша футерованого гумотканими елементами 125
¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ
² Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро
- Дядя С.І., Козлова О.Б., Тришин П.Р., Крамаренко О.О.** Забезпечення точності обробки при кінцевому фрезуванні деталей з тонкостінними елементами в умовах дії регенеративних коливань 126
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя
- Стецько А.Є.¹, Дружбяк М.А.²** Вибір критерію оцінки ресурсу деталей машин та обладнання харчової промисловості зміцнених методом Ni-Co-P хімічного покриття та дифузійної обробки 127
¹ Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів
² Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З.Гжицького, м. Львів
- Сотниченко В.В., Яковенко І.Е.** Застосування архітектури RAG для автоматизації технологічної підготовки машинобудівного виробництва 129
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків
- Швець Р. С., Дегтярьов І. М.** Розрахунок на вібраційну надійність штифтового кінцевого з'єднання під час коливань, що виникають при механічній обробці 131
Сумський державний університет, м. Суми
- Петров О.Д., Парненко В.С., Корбут Є.В.** Дослідження складу та топографії дискретно модифікованого поверхневого шару різального інструмента для обробки полімерних композитів 132
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ
- Погребняк Р.П.** Точність токарної обробки залізничного колеса та необхідні властивості самовстановлюваних захватних пристроїв для механізмів завантаження-вивантаження колісної заготовки 135
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро
- Носов О.В., Ковальов Ю.А.** Дослідження опору руху в стрічкових конвеєрах 137
Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ
- Похил А.В., Яковенко І.Е.** Дослідження ефективності застосування адитивних технологій при проєктуванні та виготовленні затискних механізмів технологічної оснастки 139
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків
- Доля В.Є., Яковенко І.Е.** Метрологічне забезпечення якості САД-реконструкції складнопрофільних поверхонь при реверс інжинірингу деталей газотурбінних установок 140
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків
- Бельмас І.В.¹, Часов Д.П.¹, Бейгул В.О.¹, Серілко Д.Л.²** До питання стійкості до руйнування конструктивних елементів допоміжного обладнання 141
¹ Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське,
² Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне
- Соколішин Є.О.** Використання штучного інтелекту в сучасному машинобудуванні 142
Державна спеціальна служба транспорту Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро

Фадєєв А.В., Набока О.В. Цифрові двійники та процеси реверсивного реінжинірингу для відновлення деталей <i>Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків</i>	144
Литвиняк Я.М., Зіньків О.Я. Технологічне забезпечення експлуатаційних показників циліндричних зубчастих передач <i>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів</i>	146
Трубачев С.І., Кривова С.Г. Коливання багатошарових конструкцій на пружній основі <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ</i>	147
Євдокимов О. Д., Колесник В.О. Гібридна методологія ухвалення рішень в автоматизованих системах підбору ріжучого інструменту <i>Сумський державний університет, м. Суми</i>	148
Міхєєв А.О. Вирішення гідродинамічної задачі течії мастильного матеріалу в підшипниках та системах їх живлення <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ</i>	149
Кіливник С.В., Оргіян О.А. Розробка та дослідження системи підвищення точності отвору, що розточується, з використанням гіроскопічного ефекту <i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса</i>	150
Оргіян А.О. Вплив режимів фрезерування на точність обробки <i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса</i>	152
Бадовський О.Б. Коливання координатно-розточувальних верстатів <i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса</i>	154
Плис В.С., Дегтярьов І.М., Калашніков С.С. Технологічні аспекти виготовлення дослідного зразка верстатного пристрою з розтискною цангою для обробки каналів апаратів спрямовувальних <i>Сумський державний університет, м. Суми</i>	156
Бабенко М.О., Куркаєв М.Д. Огляд сучасних технологій свердління глибоких отворів малих діаметрів у криволінійних поверхнях <i>Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич</i>	158
Давиденко В.В., Медведєв В.В. Алгоритм автоматизованої верифікації технологічного процесу на основі цифрового двійника <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ</i>	160
Закревський А.А. Технологія адитивного виробництва дронів в польових умовах фахівцями децентралізованої бригади <i>ТОВ «Ньюфолк НКЦ»</i>	161
Іванишин Т.В., Поберейко Б.П., Валюх О.А. Основи математичного моделювання раціональних структур автоматизованих систем машин <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	163
Федишин Б.М. Створення сітки скінченних елементів для удосконалення тензометричного стенду землерийних машин <i>Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ</i>	165
Копей В.Б., Онисько О.Р., Крошней О.Д. Модернізація контрольних пристроїв з індикаторами годинникового типу за допомогою Arduino та OpenCV <i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ</i>	166

Бойко А.В., Єрошенко А.М. Математичне моделювання радіального зміщення осі шпинделя на гідростатичних опорах	168
<i>Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів</i>	
Вишнепольский Є.В., Бондарєв А.А. Підвищення зносостійкості складнопрофільних деталей механізмів подвійного призначення	170
<i>Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя</i>	
Четвержук Т.І., Редько Р.Г., Полінкевич Р.М., Редько П.Г. Методи компенсації пружних деформацій у верстатах з ЧПК	171
<i>Луцький національний технічний університет, м. Луцьк</i>	
Залета А.О. Методи зниження віброакустичних навантажень у машинах для пакування штучних виробів	173
<i>Луцький національний технічний університет, м. Луцьк</i>	
Корюковець О. С., Бойко С.В., Ігнатенко О. А. Аналіз можливостей програмного комплексу Autodesk Fusion в процесі технологічної підготовки виробництва	175
<i>Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів</i>	
Семак І.В., Гаркавенко С.О. Аналіз та оцінювання якості конструкційних матеріалів для безпілотних літальних апаратів	177
<i>Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ</i>	
Вольченко О.І.¹, Журавльов Д.Ю.², Журавльов О.Ю.³ Перерозподіл питомих навантажень в парах тертя барабанно-колодкових гальм	179
¹ <i>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків</i>	
² <i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ</i>	
³ <i>Сумський державний університет, м. Суми</i>	
Фідровська Н.М.¹, Вольченко Д.О.², Возний А.В.², Вудвуд О.М.³ Зносо-фрикційні властивості пар тертя гальм та їх покращення	181
¹ <i>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків</i>	
² <i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу</i>	
³ <i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса</i>	
Орел В.М.¹, Мельничук П.П.¹, Саленко О.Ф.², Костенко А.О.², Гаврушкевич Н.В.² Зміна мікроструктури поверхневого шару адитованих виробів при фінішній механічній постобробці	183
¹ <i>Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир</i>	
² <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ</i>	
Луців І.В.¹, Волошин В.Н.², Буховець В.М.² Концепції затиску інструментів малих діаметрів з циліндричним хвостовиком	187
¹ <i>Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир</i>	
² <i>Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулля, м. Тернопіль</i>	
Приходько В.П., Ковбаса В.І. Оцінка технологічних можливостей використання адитивних методів у процесах виготовлення деталей	189
<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ</i>	
Горогоцький Ю.О., Кологойда А.В. Автоматизація подачі заготовок на токарних верстатах з ЧПК	190
<i>Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів</i>	

- Мельник В.Б.¹, Леусенко Д.В.², Гриб Д.Р.¹** Вплив електричного поля на утворення мінеральними оливами зносостійких трибоструктур в локальному контакті зубчастих передач 192
¹ Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ
² Національний транспортний університет, м. Київ
- Мозговий О.В.¹, Іщенко Р.М.¹, Семеренко Ю.О.²** Розсіювання механічної енергії композиційним матеріалом алюміній-сталь при термоциклічних обробках 194
¹ Національний транспортний університет, м. Київ
² Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України
- Тихоненко А.В.¹, Данильченко Ю.М.², Данильченко М.А.²** Моделювання радіальної жорсткості заготовки під час точіння з урахуванням зміни її геометричних характеристик 196
¹ ООО «Прогрестех-Україна», м. Київ
² КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ
- Підгурський М.І., Биків Д.З., Підгурський І.М.** Аналіз напружено-деформівного стану сталевих балок з трикутною перфорацією залежно від геометрії отворів 198
Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль
- Холодний В.Ю., Коваль Є.С., Гольченко О.С., Коровніченко Н.А.** Вплив розташування шарів при фдм друці на міцнісні характеристики деталі 200
Вище професійне училище №7 м. Кременчук, Полтавська обл.
- Павленко П.М.** Цифровий двійник оцінювання міцності та залишкового ресурсу авіаційної конструкції 202
Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ
- Чернишов О.В., Музичка Д.Г., Толкунов І.І., Пробачай Б.С.** Експериментальні дослідження процесу класифікації стружки 205
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
- Єпішкін О.В.** Сегментований накопичувач енергії в приводах гвинтових пресів 207
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя
- Зданевич С.В.¹, Погребняк Р.П.¹, Зданевич С.С.², Гурідова В.О.¹** Динамічне навантаження гідравлічного привода механічної системи несучої конструкції причіпного широкозахватного культиватора в режимах трансформації 209
¹ Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро
² Комунальний заклад «Ліцей №22», м. Кам'янське
- Повстяной О.Ю., Гальчук Т.Н., Сметюх Б.В.** Технологічне забезпечення якості торцевих поверхонь кілець роликотідишпників 211
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк
- Ігнатенко П.Л., Ігнатенко О.А., Гаращенко Д.В.** Обробка деталей з порошкових спечених матеріалів 212
Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів

СЕКЦІЯ 2. ДЕРЕВООБРОБНІ ТА МЕБЛЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Mayevskyy Volodymyr¹, Udovytska Mariana², Vitalii Lan¹** Strength analysis of glued laminated timber beams with finger joints 213
¹ *Ukrainian National Forestry University, Lviv*
² *Technological College of the Ukrainian National Forestry University, Lviv*
- Валько С.М., Кшивецький Б. Я.** Вплив температурно-вологісних навантажень на міцність клейового з'єднання деревини у меблевому щиті 215
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Зайло Р.І., Кшивецький Б. Я.** Вплив механізму формування клейового з'єднання на формостійкість меблевого щита 217
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Пінчевська О.О., Давидов В.М.** Щодо вибору раціонального режиму термічного оброблення ослабленої деревини ясеня 219
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ
- Касянчук І.О.¹, Цапко Ю.В.²** Вплив вяжучого матеріалу на поглинання води дерево полімерним композитом 221
¹ *Національний університет біоресурсів і природокористування, м. Київ*
² *Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ*
- Яремчук Л.А., Кропотов А.В.** Зміна шорсткості забарвленої деревини бука 223
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Барабаш Р.Г., Миськів Є.М.** Впровадження шпонкових пазів на етапі розкрою на нестінгових верстатах з ЧПК для з'єднань деталей дверних каркасів 224
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Віт В.В., Савчак О.В.** Порівняльний аналіз промислових технологій термічного модифікування деревини 225
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Віт В.В., Щупаківський Я.Б.** Перспективи використання димових газів як енергоефективного теплоносія в установках термомодифікації 227
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Буйських Н.В.** До питання захисних властивостей олійних покриттів на деревині 228
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ
- Ортинська Г.Є., Лютий П.В., Петлюк І.Г.** Текстильні відходи у виготовленні деревинно-полімерних матеріалів плоского способу пресування 229
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Мазурчук С.М., Семенов І.К.** Механічна поведінка гібридних клейових з'єднань м'яких та твердих порід деревини 231
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ
- Курка Р.Р., Поберейко Б.П.** Реалізація математичної моделі розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах на базі промислового логічного контролера 233
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів
- Горбачова О.Ю.** Кінетика змочування термомодифікованого шпону дуба: первинні дослідження 235
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Ільків М.М., Губер Ю.М. Вплив параметрів процесу термічного модифікування деревини ясеня на міцність клейового з'єднання та формостійкість меблевих щитів <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	236
Максимів Р, Кушпін А.С. Адаптивні закономірності вибору стратегій розкрою в інтегрованому середовищі «проектування – розкрій» <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	238
Gayda S.V. Analysis of the principles of circular economy in the forest sector <i>Ukrainian National Forestry University, Lviv</i>	240
Lesiv L.E., Gayda S.V. Determination of the characteristics of combined blockboards made of post-consumer wood <i>Ukrainian National Forestry University, Lviv</i>	242
Kozak Yu.O. Analysis of the dependence of the strength of wooden structures on material characteristics <i>Ukrainian National Forestry University, , Lviv</i>	244
Kyyanka V.V., Gayda S.V. Development of effective approaches for the utilization of wood residues in furniture manufacturing <i>Ukrainian National Forestry University, Lviv</i>	246
Grytsak S.S., Grytsak S.A. Analysis of technological features of ash wood bending <i>Ukrainian National Forestry University, Lviv</i>	248
Podibka T.I., Gayda S.V. Analysis and strength assurance of beech furniture panels <i>Ukrainian National Forestry University, Lviv,</i>	250
Lutsenko A.O., Gayda S.V. Analysis of furniture design features in the imos environment <i>Ukrainian National Forestry University, Lviv</i>	252
Калина А.А., Миськів Є.М. Особливості свердління наскрізних отворів в меблевих заготовках на верстатах з ЧПК <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	254
Басараб А.І., Кшивецький Б.Я. Щодо міцності клейових з'єднань деревини на основі поліуретанових клеїв <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	256
Чорнобай Л. В. Інтенсифікація процесу твердіння олійних покриттів деревини шляхом застосування енергоефективних uv-led технологій <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	257
Губер Ю.М., Копинець З.П., Гуменюк Ж.Я., Рокунь Р.О. Щодо тривалості процесу сушіння заготовок з деревини дуба <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	258
Ференц А.О., Лань В.М., Деркач Д.В., Рокунь Р.О. Нормування технологічних витрат деревини у столярно-будівельному виробництві <i>Національний лісотехнічний університет України, м.Львів</i>	260
Удовицька М.В., Копинець С.В., Маєвський В.О. Еколого-економічна доцільність виготовлення клеєних щитів <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	263
Завацький Р.Я., Іванина В.В., Копинець З.П. Щодо застосування концепції ощадливого виробництва у лісопилянні <i>Національний лісотехнічний університет України, м. Львів</i>	265

Гасій О.Б., Гончар І.М., Степанишин В.І., Шпуляр Ю.С. Аналіз матеріалів 266
робочих органів машин для подрібнення деревної біомаси
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів

Кузін О.А., Гончар І.М., Здобицький А.Я., Лучка Ю.В. Сучасні машини і 268
технології для подрібнення твердої біомаси
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів

СЕКЦІЯ 3. АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ. ГІДРАВЛІЧНІ ТА ПНЕВМАТИЧНІ СИСТЕМИ

Лужанська Н.О., Лебідь Є.М., Лебідь І.Г. Обґрунтування доцільності залучення 270
послуг об'єктів митно-логістичної інфраструктури при виконанні міжнародних
автомобільних перевезень
Національний транспортний університет, м. Київ

Аврунін Г.А., Мороз І.І., Білан І.В., Нікітін С.А. Застосування об'ємних 272
гідроприводів в трансмісіях транспортно-технологічних засобів
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

Худяков І.В.¹, Грицук І.В.², Погорлецький Д.С.¹ Ідентифікація режимів праці та 274
відпочинку водія в системі дистанційного моніторингу транспортних засобів
¹*Херсонська державна морська академія, м. Херсон*
²*Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів*

Венжега В.І., Пасов Г.В., Кологойда А.В. Вибір раціонального методу відновлення 279
деталей автомобілів
Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів

Тюпа В. О., Лимаренко О. М., Баланюк Г.В. Комплексний аналіз та оптимізація 280
напружено-деформованого стану просторових рам гоночних автомобілів
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

Губська В.В. Моделювання руху циліндричного резервуару і рідини з вільною 282
поверхнею під дією періодичної сили
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Кологойда А.В., Пасов Г.В., Сіра Н.М. Технології 3D-друку в автомобільному 283
транспорті: переваги, обмеження та перспективи впровадження
Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів

Кужельний Я.В., Машковцев Д.С., Сухоліт М.І. Аналіз конструкцій та 285
перспективи розвитку гібридних автомобілів
Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів

Апаракін А.Р. Джерела контактних навантажень у зоні прикладання управляючого 287
зусилля гідропідсилювача руля
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький

Солових А.Є.¹, Лопата В.М.², Качинська І.Р.³ Фактори, визначаючі знос деталей 288
кривошипно-шатунного механізму двигуна
¹*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький*
²*Національний транспортний університет, м. Київ*
³*Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ*

- Полюхович А.Г., Ковальов Ю.А.** Вплив масо-інерційних параметрів на динаміку руху гібридної транспортно-логістичної платформи з омнінаправленим приводом 289
Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ
- Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Конарева В.В.** Принципи роботи та основні показники якості WIM (weigh-in-motion) комплексів 291
Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ
Національний транспортний університет, м. Київ
- Виноградов А.Г.¹, Стась С.В.², Колесніков Д.В.², Мигаленко К.І.²** Захисна маска пожежника з тонким шаром води 294
¹Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси
²Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси
- Сукрут С.В., Ратушний О.В.** Проблеми передніх щільових ущільнень у відцентровому насосі низької швидкохідності 296
Сумський державний університет, м. Суми
- Ратушний О.В., Рибальченко В. М.** Науково-технічний розвиток та практичні аспекти впровадження національного малого модульного реактора 297
Сумський державний університет, м. Суми
- Кутас С., Бондаренко О.** Методика вибору параметрів свердловинного насоса 298
Сумський державний університет, м. Суми

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ ПЛЕНАРНОГО ЗАСІДАННЯ

УДК 621.9

Мигушенко Р.П., докт. техн. наук, професор

Пермяков О.А., докт. техн. наук, професор

Басова Є.В., докт. техн. наук, доцент

Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, perm_a@i.ua

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ДОСВІД ПІДГОТОВКИ БАКАЛАВРІВ ЗА ПРОГРАМОЮ ПОДВІЙНИХ ДИПЛОМІВ ІЗ ВНЗ НІМЕЧЧИНИ

Сучасний розвиток машинобудівного виробництва в Європі визначається переходом до концепцій Industry 4.0/5.0, що орієнтовані на цифровізацію, сталість, циркулярну економіку та інтеграцію інженерних рішень у повний життєвий цикл виробу. Відповідно до сучасних європейських підходів (CSRD/ESRS, ESPR, ISO 14001, ISO 50001), ключового значення набувають питання простежуваності продукції, управління даними, енергоефективності, декарбонізації та проектування виробів з урахуванням утилізації та повторного використання. У цих умовах машинобудівні підприємства функціонують в середовищі високої невизначеності, малої серійності та необхідності швидкої адаптації до змін ринку. Це формує нові вимоги до інженера, який має працювати не лише з технологічними процесами, а й з інформаційними потоками, цифровими моделями та інтегрованими виробничими системами. Таким чином, ключовим завданням сьогодення стає не лише розробка ефективних технологій, але й підготовка міждисциплінарних фахівців, здатних працювати в умовах цифрової трансформації машинобудівного виробництва.

Сучасні європейські стандарти вищої освіти (ESG – Standards and Guidelines for Quality Assurance in the European Higher Education Area) визначають необхідність переходу до компетентісно-орієнтованого підходу та outcome-based education, де основна увага приділяється не лише змісту навчання, а й досягненню студентами конкретних результатів навчання та сформованості у них професійних компетентностей. У цьому контексті особливого значення набуває інтеграція цифрових інструментів, міждисциплінарність, а також здатність працювати з даними, цифровими моделями та інформаційними системами протягом усього життєвого циклу виробу.

Таким чином, сучасні тенденції машинобудівного виробництва безпосередньо впливають на формування освітніх програм підготовки інженерів. Особливої актуальності набувають питання гармонізації навчальних планів Українських ВНЗ із європейськими стандартами, синхронізації освітніх компонентів, інтеграції цифрових технологій у навчальний процес, а також формування компетентностей у сфері аналізу даних, цифрових двійників, реверс-інжинірингу та технологічної підготовки виробництва.

У цьому контексті зворотний інжиніринг розглядається як один із ключових інструментів, що поєднує вимірювальні технології, 3D-моделювання та цифрову інтеграцію даних, забезпечуючи відтворення та адаптацію виробів у сучасних виробничих умовах.

Практичним шляхом реалізації зазначених підходів є розроблення та впровадження освітніх програм, синхронізованих із провідними технічними університетами Європи, зокрема в рамках програм подвійних дипломів. Такий підхід дозволяє не лише адаптувати зміст навчання до сучасних вимог машинобудування, але й забезпечити формування інженерів нового покоління, інтегрованих у європейський освітній та науково-технологічний простір.

У контексті зазначених вимог та тенденцій практична реалізація підготовки інженерів в НТУ «ХПІ» здійснюється через розвиток міжнародного співробітництва та впровадження освітніх програм, синхронізованих із провідними технічними університетами Європи.

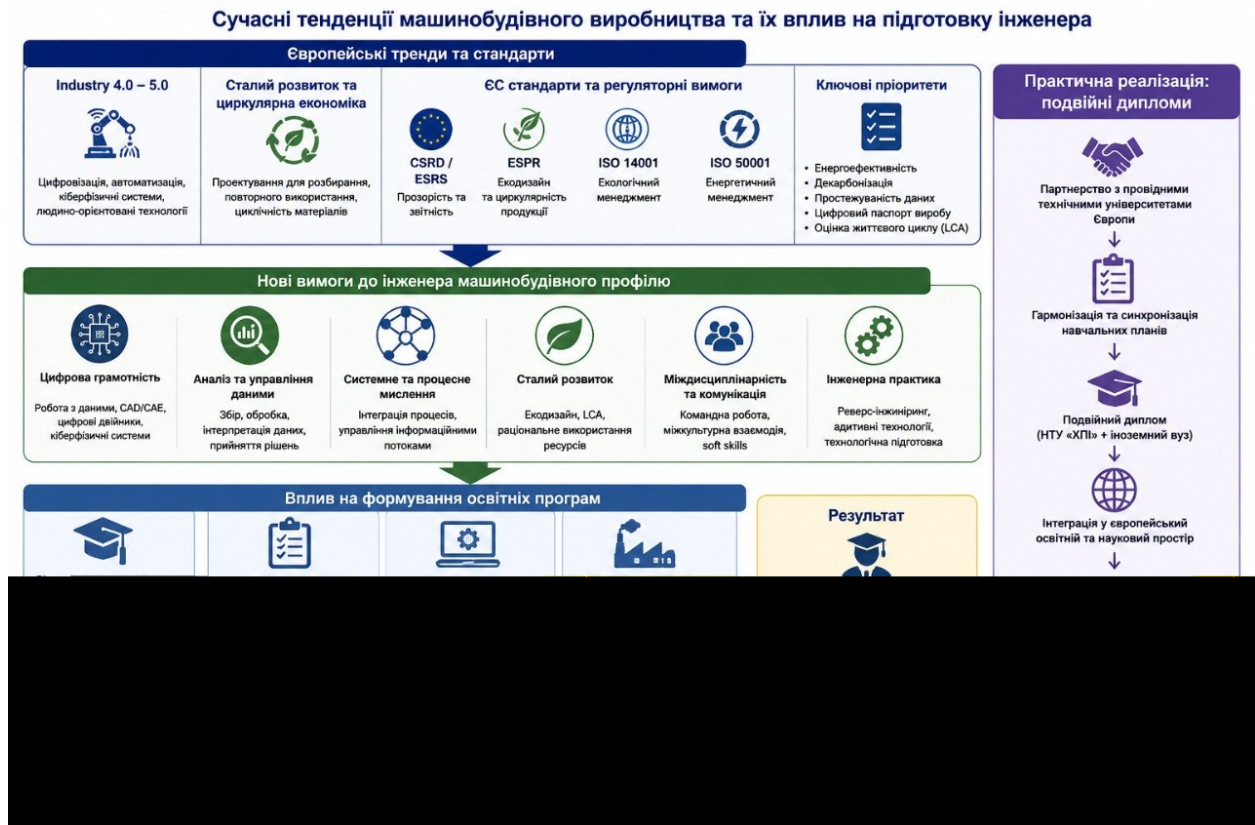


Рис. 1 – Сучасні тенденції машинобудівного виробництва та їх вплив на підготовку інженера

Зокрема, НТУ «ХП» має багаторічний досвід співпраці з Магдебурзьким технічним університетом ім. Отто фон Геріке (МагдТУ) та пропонує студентам участь у програмі подвійних дипломів DSG2 (Deutschsprachige Studiengänge 2). Ключовою умовою реалізації програм подвійних дипломів є гармонізація та синхронізація навчальних планів підготовки бакалаврів відповідно до європейських освітніх стандартів та вимог до результатів навчання. З цією метою було проведено порівняльний аналіз структури навчальних планів НТУ «ХП» та МагдТУ, за результатами якого розроблено індивідуальний навчальний план здобувачів освіти, що забезпечує відповідність обом освітнім системам та створює передумови для академічної мобільності студентів. Для підвищення ефективності аналізу та візуалізації структури навчальних планів запропоновано представлення у вигляді табличної моделі (Excel), де стовпець відповідає семестру, а рядки – кредитному навантаженню (30 кредитів на семестр). Висота кожного елемента відображає обсяг відповідної навчальної дисципліни у кредитах, що дозволяє наочно оцінити баланс освітніх компонентів та їх логічну послідовність. На рис.2 наведено структуру чинного бакалаврського навчального плану спеціальності 131 (G9) «Прикладна механіка» НТУ «ХП». Відповідно до прийнятої в університеті блочної структури, дисципліни загальної підготовки виділені окремим кольором, дисципліни фахової підготовки формують основний інженерний блок, а вибіркові освітні компоненти забезпечують індивідуалізацію освітньої траєкторії здобувача. За аналогічною методикою на рис. 3 представлено структуру навчального плану підготовки бакалаврів за спеціальністю «Машинобудування» у Магдебурзькому технічному університеті ім. Отто фон Геріке. Такий підхід до візуалізації дозволяє здійснити коректне порівняння структури освітніх програм, оцінити баланс навчального навантаження та виявити особливості формування інженерних компетентностей у європейській освітній практиці. Навчальний план МагдТУ характеризується чітко регламентованою структурою: загальний обсяг становить 180

кредитів із рівномірним розподілом навантаження по 30 кредитів на семестр (за винятком 4-го – 35 та 6-го – 25 кредитів). Відмінною рисою є висока уніфікація освітніх компонентів – у кожному семестрі передбачено, як правило, шість дисциплін по п'ять кредитів (у 4-му семестрі – сім).

Структура навчального плану зі спеціальності 131 (G9) Прикладна механіка									БЛОКИ	
Курс	1	2	3	4	5	6	7	8		
Семестр										
1	Українська мова	Іноземна мова	Іноземна мова	Вища математика	Деталі машин	Правознавство	Основи професійної безпеки	Іноземна мова	Загальна підготовка	
2	Іноземна мова	Іноземна мова	Вища математика	Історія та культура України	Історія науки і техніки	Економіка підприємства	Системи автоматизованого керування технологічними обладнаннями і постачаннями процесами		Спеціальна (фахова) підготовка	
3	Вища математика	Вища математика	Фізика	Теорія машин і механізмів	Деталі машин	Електротехніка та електроніка			Освітні компоненти вільного вибору студента професійної підготовки	
4	Фізика	Фізика	Філософія	Опір матеріалів	Технологічні основи машинобудування				Освітні компоненти вільного вибору студента із загальноуніверситетського каталогу	
5	Нарисна геометрія	Хімія	Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство	Опір матеріалів	Механіка рідини та газів				Переддипломна практика	
6	Вступ до фаху	Екологія	Теоретична механіка	Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання	ДВВ2				Дипломний проект	
7	Основи інформатики	Теоретична механіка	Теплотехніка		ДВВ1	Виробнича практика			Атестація	
8	ФВ	ФВ	ФВ	ФВ	ФВ	ФВ	ДВВ3			
9	8	8	8	8	8	7+практика	8	5+практика	48	
10	30	30	30	30	30	30	30	30	240	
11	18	24	14	9	2	9	6	2	84 35%	
12	12	6	12	17	16	7	8		78 33%	
13			4	4	8	4	12	16	48 20%	
14					4	4	4		12 5%	
15						6		12	18 8%	
16									240	

Рис. 2 – Структура плану НТУ «ХП» спеціальності 131 (G9) Прикладна механіка

Структура навчального плану Машинобудування (Магдебург)							БЛОКИ	
Курс	1	2	3	4	5	6		
Семестр								
1	Mathematik I //Математика I	Mathematik I //Математика I	Mathematik II//Математика II	Mathematik III//Математика II	Strömungsmechanik // Механіка рідини (Гідромеханіка)	Fachpraktikum// Фахова практика (за спеціальністю)	Mathematik und Informatik //Математика і комп'ютерні науки	
2	Algorithmen und Programmierung //Алгоритми та програмування	Allgemeine Elektrotechnik II //Загальна електротехніка II	Grundlagen der Mechatronik //Основи мехатроніки	Thermodynamik// Термодинаміка	Numerische Simulationen//Чисельні методи моделювання		Natur- und Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen//Природничі науки та основи інженерії	
3	Projekt Inside ING – Wie Ingenieure denken//Проект Inside ING – Як думають інженери	Technische Mechanik 1 //Технічна механіка 1	Technische Mechanik 2 //Технічна механіка 2	Technische Mechanik 3 //Технічна механіка 3	Vertiefung der Maschinenelemente // Консолідація елементів машини		Konstruktion und Berechnung //Проектування і розрахунки	
4	Allgemeine Elektrotechnik I //Загальна електротехніка I	Werkstoffe I//Матеріали I	Konstruktionslehre //Теорія проектування	Grundlagen der Maschinenelemente // Основи будови елементів машин	Modul A-3// Модуль A-3	Bachelorarbeit, Kolloquium, Seminar//Бакалаврська робота, колоквиум, семінар	Fertigung//Виробництво	
5	Techn. Darstellungslehre //Технічна візуалізація	Fertigungslehre 1//Теорія виробництва 1	Fertigungslehre 2//Теорія виробництва 2	Modul A-1// Модуль A-1	Modul A-4// Модуль A-4		PROFILIERUNG// ПРОФІЛІЗАЦІЯ	
6	Werkstoffe I//Матеріали I	BWL für Ingenieure//Бізнес-тренінги для інженерів	Modul// Модуль	Modul A-2// Модуль A-2	Modul T// Модуль T		Wirtschaft//Економіка	
7				Projektarbeit im Team (PaTe)//Робота в команді над проектом (PaTe)			Softskills/ Integrationsmodule/ Projektarbeit// Softskills/інтеграційні модулі/проектна робота	
8	6	6	6	7	6		31	
9	30	30	30	35	30	25	180	

Рис. 3 – Структура плану МагдТУ спеціальності Машинобудування

Структура підготовки має виражений професійно орієнтований характер: до блоку загальної підготовки віднесено лише базові дисципліни (математика та програмування), тоді як основний обсяг навчального часу спрямований на формування фахових інженерних компетентностей. Такий підхід обумовлений особливостями попередньої освіти в Німеччині, де базові природничі дисципліни опановуються на рівні середньої школи.

Профілізаційний блок передбачає шість модулів, що забезпечують поглиблену спеціалізацію, при цьому для всіх дисциплін надано силабуси, що дозволяють забезпечити коректне зіставлення результатів навчання та компетентностей. За результатами порівняльного аналізу навчальних планів НТУ «ХПІ» та МагдТУ розроблено індивідуальний навчальний план, синхронізований із європейською освітньою моделлю та адаптований до національних стандартів. Встановлено, що більшість дисциплін можуть бути взаємно узгоджені шляхом структурного розподілу змісту: зокрема, інтегрований курс «Прикладна механіка» відповідає послідовності дисциплін «Теоретична механіка», «Опір матеріалів» та «Теорія механізмів і машин», а «Термодинаміка» – курсу «Теплотехніка». Отримана структура забезпечує збереження логіки підготовки інженера-механіка та відповідність вимогам обох освітніх систем. На рис.4 наведено структуру індивідуального навчального плану студентів НТУ «ХПІ», максимально синхронізованого з планом МагдТУ.

Структура індивідуального навчального плану 131 (G9) Прикладна механіка, синхронізованого із Магдебургом									БЛОКИ	
Курс	I	II	III	IV						
Семестр	1	2	3	4	5	6	7	8		
1									Загальна підготовка	
2	Фізика	Фізика	Вища математика	Вища математика	Вища математика	Теплотехніка	Механіка рідини та газів	Fachpraktikum// Фахова практика (за спеціальністю)	Спеціальна (фахова) підготовка	
3										
4										
5	Іноземна мова	Іноземна мова	Основи інформатики та програмування	Електроніка та теорія автоматичного управління	Основи мехатроніки та комп'ютерної технології обладнання	Теорія машин і механізмів	Чисельні методи моделювання		Освітні компоненти вільного вибору студента професійної підготовки	
6										
7	Історія та культура України	Правознавство	Основи інженерної творчості	Теоретична механіка	Опір матеріалів	Деталі машин 1	Деталі машин 2	Bachelorarbeit, Kolloquium, Seminar//Бакалаврська робота, колоквіум, семінар	Освітні компоненти вільного вибору студента із загальноуніверситетського каталогу	
8										
9	Українська мова	Хімія								
10										
11	Філософія	Основи професійної безпеки	Загальна електротехніка	Технології заготівельного виробництва	Основи САПР				Praktikum// Практика	
12										
13	Нарисна геометрія	Екологія	CAD/CAM/CAE системи	Взаємозв'язок, стандартизація, технічні вимірювання та контрольні-вимірювальні обладнання	Технологічні основи машинобудування					
14		Історія науки і техніки								
15	Вступ до фаху. Ознайомча практика		Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство	Економіка підприємства		Виробнича практика (Робота в команді над проектом)				
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
Кількість дисциплін	8	8	6	6	6	7	6		47	
Кількість кредитів	30	30	30	30	30	35	30	25	240	
	20	26	5	10	5				66 28%	
	10		25	20	20	15	15		105 44%	
		4			5	10	15		34 14%	
								12	12 5%	
						5		18	23 10%	
									240	

Рис. 4 – Структура плану НТУ «ХПІ» синхронізованого до плану МагдТУ

У сформованому індивідуальному навчальному плані перші два семестри орієнтовані на засвоєння дисциплін загальної підготовки, традиційних для НТУ «ХПІ», за винятком окремих курсів (математика та економіка), які інтегровані в подальші етапи навчання. Водночас особлива увага приділяється вивченню іноземної мови, оскільки обов'язковою умовою участі у програмі подвійних дипломів із МагдТУ є підтвердження рівня володіння німецькою мовою не нижче B1. Починаючи з третього семестру структура підготовки синхронізується з навчальним планом МагдТУ та відтворює його логіку через реалізацію дисциплін фахової інженерної підготовки. Такий підхід забезпечує поступовий перехід від базової до спеціалізованої підготовки відповідно до європейської освітньої моделі. З метою дотримання нормативних обмежень щодо навчального навантаження (не більше 30 кредитів на семестр) окремі дисципліни були перерозподілені, зокрема оптимізовано вивчення математичної підготовки у старших семестрах. Вибіркові освітні компоненти передбачені у завершальному етапі навчання та формуються відповідно до профілю випускової кафедри з урахуванням можливості їх узгодження з відповідними модулями МагдТУ. Додатковою вимогою є проходження ознайомчої виробничої практики вже на першому курсі, що відповідає європейському підходу до ранньої інтеграції студентів у професійне середовище. Загалом запропонована структура індивідуального навчального плану забезпечує відповідність вимогам національних стандартів освіти, узгоджена з навчальним відділом та затверджена методичними органами університету.

Подальший розвиток міжнародної освітньої співпраці реалізується через встановлення партнерських відносин із Гамбурзьким технічним університетом (Technische Universität Hamburg). За аналогічною методикою на рис. 5 представлено структуру навчального плану підготовки бакалаврів за спеціальністю «Машинобудування» у цьому університеті.

Структура навчального плану Машинобудування (Гамбург)						
Курс	I	II	III	IV	V	VI
Семестр	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
Кількість дисциплін	6	5	6	5	6	3
Кількість кредитів	30	30	30	30	30	30

Рис. 5 – Структура плану ГамбТУ спеціальності Машинобудування

На відміну від МагдТУ, навчальний план ГамбТУ зберігає загальний обсяг у 180 кредитів і рівномірний розподіл навантаження (по 30 кредитів у семестрі), проте характеризується більш гнучкою структурою освітніх компонентів — дисципліни мають різний кредитний обсяг (5–8 кредитів), що забезпечує варіативність формування індивідуальної освітньої траєкторії. На основі проведеного аналізу було розроблено індивідуальний навчальний план, синхронізований із структурою підготовки ГамбТУ та адаптований до вимог національної системи освіти (рис. 6). Запропоноване рішення забезпечує узгодження освітніх компонентів, збереження логіки підготовки інженера та розширює можливості академічної мобільності здобувачів освіти.

Структура індивідуального навчального плану G11.03 ОП Машини і обладнання для технологічних процесів, синхронізованого із Гамбургом							
Курс	I	II	III	IV	V	VI	7
Семестр	1	2	3	4	5	6	8
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
Кількість дисциплін	8	8	7	6	6	5	4
Кількість кредитів	30	30	30	30	30	30	30
20	26	5	5	5	5	5	5
10	4	22	25	15	15	10	4
		3		5	5	15	14
				5	5	5	12

БЛОКИ
Загальна підготовка
Спеціальна (фахова) підготовка
Освітні компоненти вільного вибору студента професійної підготовки
Освітні компоненти вільного вибору студента із загальноуніверситетського каталогу
Praktikum// Практика
Bachelorarbeit// Бакалаврська робота
Атестація

Рис. 6 – Структура плану НТУ «ХП» синхронізованого до плану ГамбТУ

Таким чином, проведений аналіз сучасних тенденцій розвитку машинобудівного виробництва та європейських підходів до підготовки інженерів показав, що ключовим фактором ефективності є інтеграція цифрових технологій, інформаційних потоків та компетентісно-орієнтованих освітніх моделей. Запропонований підхід до синхронізації навчальних планів із провідними технічними університетами Німеччини дозволяє забезпечити відповідність освітніх програм сучасним вимогам Industry 4.0/5.0, сформувати у здобувачів освіти здатність працювати в умовах цифрової трансформації та підвищити рівень їх інтеграції у європейський освітній і науково-технологічний простір.

Практична реалізація програм подвійних дипломів підтверджує ефективність гармонізації освітніх компонентів, адаптивність навчальних планів та доцільність поєднання різних освітніх моделей (уніфікованої та гнучкої) для формування інженера нового покоління. Отримані результати можуть бути використані при розробці сучасних освітніх програм у галузі машинобудування з урахуванням вимог цифровізації, сталого розвитку та міжнародної академічної інтеграції.

Подяка. Дослідження виконано за підтримки Європейського Союзу в рамках проєкту Erasmus+ «Digital Transformation of Mechanical Engineering for Technological Sustainability» (MechDiTS), Grant Agreement No. 101241157.

Список посилань

1. Permyakov, A., Yakovenko, I., Basova, Y., Hrdzelidze, T., Permiakov Jr., O. (2025). Technological Support for Reverse Engineering of Parts Using Additive Methods. In: Pavlenko, D., Tryshyn, P., Honchar, N., Kozlova, O. (eds) Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1480. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_26 (SCOPUS).
2. Моделювання процесів у механічному роботі /Р.П.Мигущенко [та ін.] //Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2025. – № 1 (11). – С. 26-33.
2. Перспективи розвитку реверсивного інжинірингу в машинобудівній галузі. /Яковенко І.Е., Пермяков О.А., //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», № 1(11). 2025. - С. 89-97. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1\(11\).11](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1(11).11).
3. Технологічні інновації як засіб забезпечення конкурентної переваги мікро, малих і середніх машинобудівних підприємств /Яковенко І.Е., Линник О.І., Пермяков О.А., Басова Є.В. //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (9). - С. 75-87.
4. Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій /Пермяков О.А., Яковенко І.Е., Калініченко В.А., Скиба О.С., Южкович П. //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні– Харків:НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 84–92.
5. Методологія технологічного проектування процесу відновлення деталей /Пермяков О.А., Черновол М.І., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В., Горбулик В.І. //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 61–68.
6. Забезпечення точності при обробці об'єктів важкого машинобудування портативними верстатами /Яковенко І.Є., Пермяков О.А., Басова Є.В., Котляр О.В., Руденко О.О. //Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Машинознавство та САПР. 2023. № 1. - С. 160-166.
7. Basova Y., Dobrotvorskiy S., Talar R. The role of digitalization and 3D information in the technological preparation of manufacturing for engineering components in SMEs // International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE 2025) / за ред. Cioboată D.D., Machado J. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham : Springer, 2025. Vol. 1592. P. 229–239. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-02508-1_20

УДК 621.941.9.06-529

Петраков Ю.В., докт. техн. наук, професор
 Охріменко О.А., докт. техн. наук, професор
 Пасічник О.В., аспірант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, yetrakov.86@gmail.com

ПРОЄКТУВАННЯ ДІАГРАМИ СТАЛОСТІ ДЛЯ ТОКАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Операції токарного оброблення переважно виконуються на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ), що забезпечує їх універсальність, високу продуктивність, повторюваність та здатність досягати субмікронної точності [1]. Оскільки ці операції передбачають формування деталі за рахунок видалення матеріалу припуску в процесі різання, який є багатопрохідним, вони завжди супроводжуються виникненням вібрацій, що представляє головну перешкоду досягнення бажаної продуктивності. Отже, виникнення вібрацій в процесі оброблення є актуальною науково-технічною проблемою, яка перешкоджає підвищенню продуктивності при забезпеченні заданої якості оброблення.

Пропонується багато методів прогнозування та усунення вібрацій для забезпечення необхідної шорсткості обробленої поверхні, високої продуктивності та стійкості інструменту [2]. Такі методи розділяються на пасивні, активні і методи, спрямовані на вибір безвібраційного режиму різання за так званою пелюстковою діаграмою стабільності (SLD). Пасивні або активні методи завжди вимагають певної модернізації обладнання, тоді як застосування SLD не потребує модернізації і легко реалізуються на верстатах з ЧПУ. Проте їх ефективність сильно залежить від адекватності математичної моделі, яка використовується для проектування такої діаграми стабільності. Тому для вирішення таких актуальних задач необхідні дослідження: по-перше з розроблення нової математичної моделі, по-друге створення цифрового двійника обробної системи, по-третє втілення їх в програмному забезпеченні практичного використання.

Головним збуренням обробної системи є сила різання, яка виникає в результаті взаємодії інструменту і заготовки, тому розрахункову схему доцільно представити в 3D просторі за двома проекціями (рис. 1).

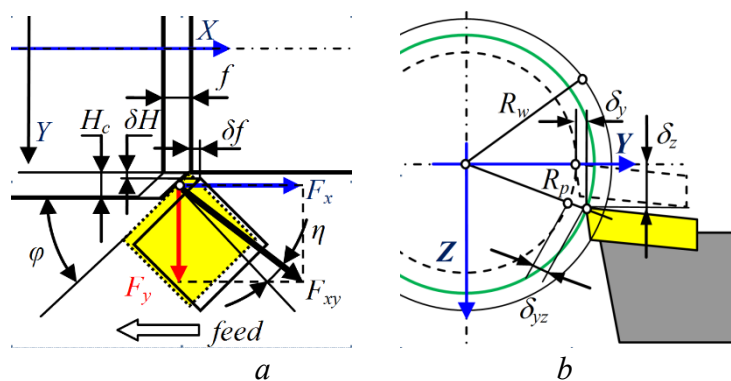


Рис. 1 – Розрахункова схема: а) складові сили різання, б) пружні переміщення

Найкраще представлення математичної моделі обробної системи забезпечує структурна схема, де відокремлені динамічні ланцюги системи представлені у вигляді передатних функцій, зв'язаних шляхами проходження сигналів в логічній спрямованості досягнення мети управління. Така форма представлення надає можливість отримати загальну передатну функцію системи за кожним входом, що є важливим для частотного аналізу системи в цілому. Як довели виконані дослідження [3], такий підхід забезпечує можливість автоматичного проектування діаграми стабільності за допомогою нового критерію сталості для систем, замкнених позитивним зворотним зв'язком через функцію запізнюючого аргументу. Саме так має представлятися оброблення за слідом, що є головною причиною

збудження регенеративних коливань. Таким чином, математична модель обробної системи токарного верстата може бути представлена у вигляді структурної схеми рис. 2, яка представляє її у вигляді сполучення трьох коливальних елементів за кожною координатою.

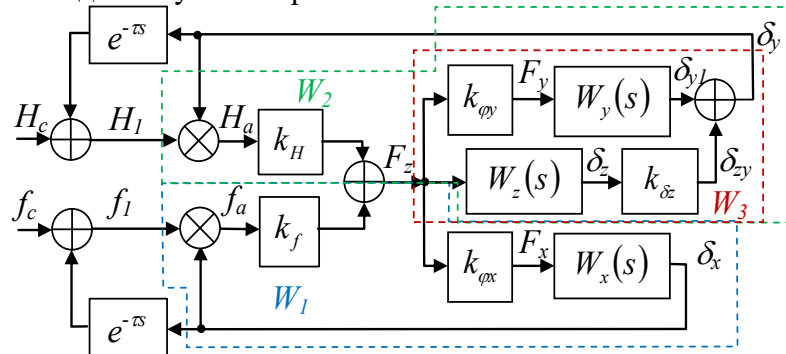


Рис. 2 – Структурна схема обробної системи

Для ідентифікації динамічної обробної системи доцільно використати методи експериментального модального аналізу [4]. Ідентифікації підлягають наступні параметри для кожної динамічної ланки: жорсткість, частота власних коливань і коефіцієнт затухання коливань.

Усі пружні рухи в обробній системі відбуваються в динамічній системі, яку можна представити динамічними зв'язками, що описуються трьома передатними функціями другого порядку:

$$W_i(s) = \frac{1/k_i}{\frac{s^2 \delta_i}{\omega_i^2} + 2\xi_i \frac{s \delta_i}{\omega_i} + \delta_i}, \quad (1)$$

де k_i – жорсткість,

δ_i – пружне переміщення,

ω_i – власна частота коливань,

ξ_i – коефіцієнт затухання коливань,

i – номер передатної функції, що відповідає напрямку руху.

Частотні характеристики кожного компонента обробної системи визначалися методом експериментального модального аналізу (ЕМА) з використанням ударного молотка моделі 086D05, акселерометра RSV 353B15 з підсилювачем RBC 480E09 та АЦП NI USB-9215 (усі від Piezotronics, Inc., США) (рис. 4). Для верифікації сигналів використовується двоканальний осцилограф Owon XDS3202E.

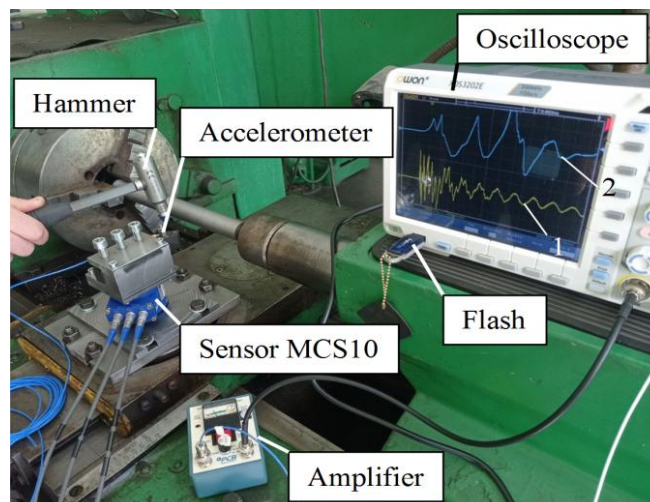


Рис. 4 – Експериментальний стенд

Для ідентифікації частотних характеристик компонентів системи за їх імпульсними характеристиками (IRF) було використано прикладну програму, що виконує швидкі перетворення Фур'є для визначення амплітудно-частотної характеристики (FRF).

Для проектування діаграми сталості за створеною математичною моделлю було розроблено прикладну програму в якій використовуються ідентифіковані експериментальним модальним аналізом динамічні параметри обробної системи. Програма дозволяє моделювати процеси і спостерігати результати на віртуальному осцилографі як у часі, так і в частотному просторі. Проектування здійснюється за новим критерієм сталості, який базується на розташуванні діаграми Найквіста на комплексній площині [3] і дозволяє уникнути зайвих пелюсток діаграми. На рис. 5 показано спроектовані діаграми сталості для обробної системи, що досліджується.

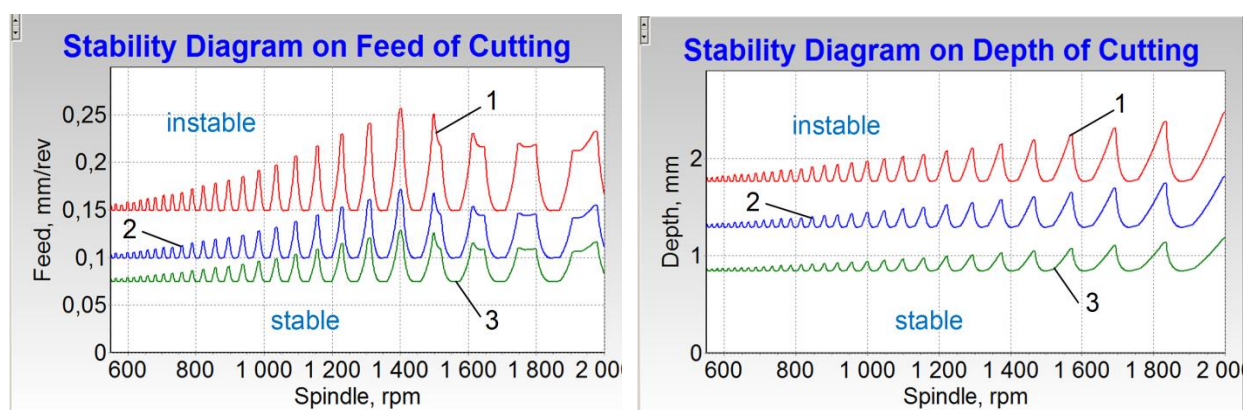


Рис. 5 – Діаграми сталості обробної системи:

- а) за подачею, глибина різання лінія 1 – 1 мм, лінія 2 – 1,5 мм, лінія 3 – 2 мм;
 б) за глибиною різання, подача лінія 1 – 0,1 мм/об, лінія 2 – 0,15 мм/об, лінія 3 – 0,25 мм/об

За визначеними з використанням спроектованих діаграм режимами різання були оброблені деталі на модернізованому верстаті. Рівень вібрацій оцінювався за шорсткістю обробленої поверхні. Проведені експериментальні дослідження повністю довели ефективність виконаних досліджень.

Висновки. Застосування діаграм сталості дозволяє визначити безвібраційні режими різання в різних діапазонах, що дає можливість призначити оптимальний режим різання при вирішенні задачі оптимізації токарного оброблення на верстатах з ЧПК за критерієм максимуму продуктивності при дотриманні всіх обмежень за якістю оброблення та стійкістю інструменту.

Список посилань

1. Neha Vilas Nalande et al. Deep Learning for Vibration Signature Analysis in CNC Turning: A Review of Modern Techniques and Future Directions. (2025) International Journal of Basic and Applied Sciences 14(4): pp578-590 <https://doi.org/10.14419/cmf93x48>
2. Gorka Urbikain et al. Prediction Methods and Experimental Techniques for Chatter Avoidance in Turning Systems: A Review. Applied Sciences, 2019, 9, 4718; <https://doi.org/10.3390/app9214718>
3. Petrakov Y., Danylchenko M. A Time-Frequency Approach to Ensuring Stability of Machining by Turning. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(2 (120) 2022, 85–92. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268637>
4. Petrakov Y., Ohrimenko O., Pasichnyk O., Petryshyn A. Determination Modal parameters a Turning machining system, Mech. Adv. Technol., Vol. 9, No. 2, 2025, pp. 176–184. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2\(105\).331541](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2(105).331541)

УДК 621.3(038)

Кузнецов Ю.М., докт. техн. наук, професор
Шинкаренко В.Ф., докт. техн. наук, професор
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, info@zmok.kiev.ua

ГЕНЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ САМОДІЮЧИХ МОТОР-ШПИНДЕЛІВ ВЕРСТАТІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Еволюція електромеханічних систем (ЕМ-систем) супроводжується інтенсивно зростаючою різноманітністю функціональних класів і структурних різновидів, зростаючою складністю їх структурної організації, інтеграцією з компонентами інших систем (механічних, електронних, гідравлічних, біологічних та ін.), прогресуючими обсягами супроводжувальної інформації [1-3].

Результати інформаційного пошуку свідчать про те, що клас ЕМ-систем типу «мотор-шпиндель» (М-Ш) є потужним класом ЕМ-перетворювачів, який розвивається. Тому синтез і розвиток систем М-Ш, створення нових моделей та алгоритмів синтезу є актуальним на сьогоднішній час.

Сьогодні існує гостра потреба у створенні М-Ш, здатних забезпечувати безпосередньо обертовий рух шпинделя і рух подачі шпинделя з використанням і без використання передавальних механізмів, адже це дозволяє розширити функціональні можливості шпиндельних вузлів, а також зменшити габарити верстатів. До таких ЕМ-систем належать, в першу чергу, представники гібридних ЕМ-об'єктів двійникового типу, однак, результати інформаційного пошуку свідчать про те, що у дослідженому класі суміщених ЕМ-систем типу «мотор-шпиндель», на сьогодні, відсутні М-Ш, які володіють такими властивостями.

Таку інформацію про М-Ш можна отримати методами геномних досліджень – нового наукового напрямку, який узагальнюється поняттям „Генетична електромеханіка”.

Гібридні електромеханічні структури характеризуються змішаною генетичною інформацією, тому їх функціональні властивості визначаються відповідними функціями, які властиві породжувальним видам.

До гібридних видів відносяться функціональні класи багатостепеневих електричних машин з складним просторовим рухом рухомої частини, а також інші класи складних ЕМ-систем, які характеризуються змішаною генетичною інформацією. Системний аналіз принципів структурної організації таких структур до останнього часу був відсутній. У спеціальній технічній літературі окремі різновиди ЕМ-структур, які відносяться до синтезованих видів, зустрічаються під загальною назвою суміщених електричних машин, або штучно відокремлювались в окремі класи ЕМ-систем за функціональними ознаками.

Системи типу «М-Ш» являють собою складні суміщені електромеханічні структури, які включають в себе механічну і електромагнітну частини (рис. 1). До механічної частини відноситься сам шпиндель, а до електромагнітної відносяться обмотки, які являються джерелом виникнення електромагнітного поля.

Результати генетичного аналізу відомих різновидів М-Ш досліджуваного класу використовуються для впорядкування його виявлених представників на підставі генетичних ознак, а також як вихідна інформація для побудови моделей мікро- та макроеволюції, які, у свою чергу, використовуються для спрямованого синтезу нових структур класу М-Ш.

Основними етапами вказаної процедури є інформаційно-патентний пошук за класом М-Ш та аналіз генетичної інформації стосовно відомих різновидів ЕМ, виявлених за результатами інформаційного пошуку, який здійснюється за заданим об'єктом дослідження. Мета пошуку – визначення об'єктів досліджуваного класу, їх структурної різноманітності, часу еволюції, напрямів структурно-функціональної адаптації і удосконалення. За інформаційними даними, з використанням методології генетичного

аналізу, визначаються генетичні коди, таксономічні ознаки відомих структурних представників досліджуваного функціонального класу і генетичні оператори синтезу.

Складна суміщена система типу „М-Ш”

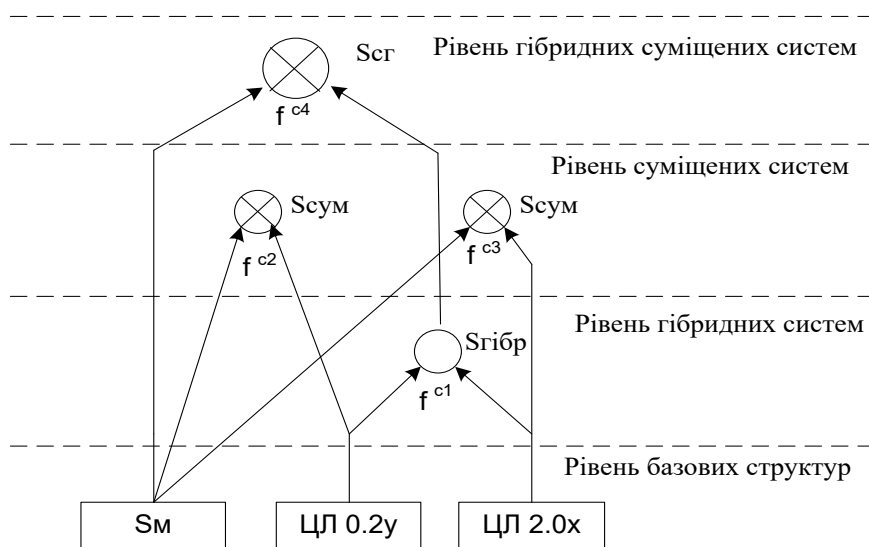


Рис. 1 – Модель утворення складної суміщеної системи типу «М-Ш»

Генетична класифікація породжувальних джерел електромагнітного поля [2] – це системна модель для пізнання принципів структурної організації і розвитку електромеханічних систем. Основною ідеєю побудови генетичної класифікації є існування скінченної кількості породжувальних джерел поля (ПДП), за допомогою яких можна описати і виявити всі існуючі та потенційно можливі класи електромеханічних систем (ЕМС).

ПДП – це базове поняття в теорії моделювання ЕМС. ПДП – фізично і математично визначена елементарна електромагнітна структура, що зумовлює цілісність будови довільного електромеханічного об'єкту.

Генетичний код ПДП – стислий запис його генетичної інформації. Він виконує подвійну функцію. По-перше, це стисла форма запису спадкової інформації в еволюціонуючих електромагнітних і електромеханічних структурах і по-друге, структура коду однозначно визначає значення координат конкретного джерела поля, тобто його суттєві властивості, в межах генетичної класифікації ПДП. Генетичний код відображає конкретну і однозначну інформацію, що стосується геометричних, топологічних та електромагнітних властивостей відповідних класів електромагнітних та електромеханічних структур, спорідненість яких визначається за принципами генетичної спадковості.

Генетичний код має універсальну форму для всіх джерел, наприклад:

ТП 0.2 $y(x)$, де:

- ТП – це геометричний клас поверхні;
- 0.2 – вид симетрії (кількість країв поверхні);
- $y(x)$ – орієнтованість електромагнітної хвилі по поверхні, «х» вказує на те, що хвиля розповсюджується за напрямком головного елемента просторової симетрії, а «у» – на орієнтованість за ортогональним напрямком.

Структура генетичного коду показана на рис. 2.

Визначення таксономічних ознак відомих структурних представників досліджуваного функціонального класу (визначення їх Видової та Родової приналежності) здійснюється на підставі наявності однозначного зв'язку між структурою генетичних кодів та ознаками систематичних одиниць Вид та Рід [1].

Ідентифікувавши генетичний код реального електромеханічного об'єкта та проаналізувавши його структуру, можна отримати інформацію про його генетично

зумовлені властивості та однозначно визначити системну приналежність такого об'єкту до Виду та Роду.

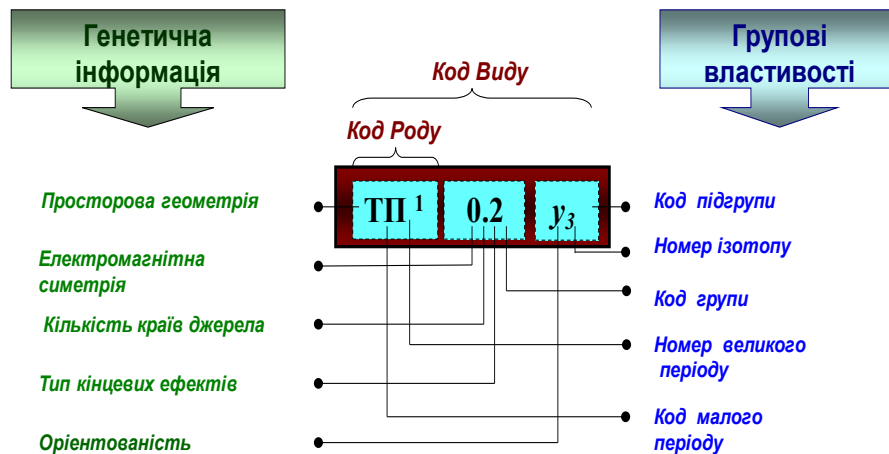


Рис. 2 – Структура генетичного коду

Ідентифікація генетичних операторів синтезу здійснюється шляхом дослідження просторової композиції складових виявлених представників класу М-Ш та встановлення відповідності оператора з певним структурним перетворенням.

На підставі порівняльного аналізу визначених генетичних кодів відомих представників ЕМ визначається *домінуючий Вид досліджуваного класу*, яким вважається Вид, до складу якого входить найбільша кількість структурних представників.

За результатами інформаційного пошуку та генетичного аналізу створюється інформаційна база даних, структура якої в хронологічній послідовності має містити наступну інформацію:

- 1) загальні відомості про джерело інформації (№ патенту, країна-заявник, назва, автор; для книг, або статей – автор, назва, де і коли опублікована);
- 2) дату пріоритету патенту;
- 3) цільову функцію нововведення;
- 4) перелік суттєвих ознак, що забезпечують реалізацію нововведення;
- 5) структурні ознаки, що визначають генетичну інформацію: просторова геометрична форма активної поверхні статора (індуктора); вид просторового руху рухомої частини; класифікаційний тип полюсоутворюючої обмотки статора (індуктора);
- 6) генетичний код породжувальної структури;
- 7) генетичний оператор синтезу.

Інформаційна база даних оформлюється у вигляді таблиці.

За результатами аналізу інформації, представленої в п.п. 1), 2), 3), 4) інформаційної бази даних визначаються загальний час еволюції об'єктів класу T_E , породжувальний об'єкт класу (за наявності історично потвердженої інформації), основні напрями і тенденції структурно-функціональної адаптації об'єктів класу (узагальнені цільові функції), приклади оригінальних технічних рішень, які визначають сутність нововведень.

Моделі макроеволюції і мікроеволюції мотор-шпинделів

Використання моделей макроеволюції найбільш доцільно при виконанні системних досліджень, особливо для тих для класів ЕМПЕ, видовий склад яких ще невідомий, або тільки зароджується. Моделі макроеволюції в таких випадках (за наявності обмеженої вихідної інформації (відомого принципу дії, опису однієї з ЕМ-структур довільного виду)) дозволяють повністю автоматизувати пошукові процедури. Це дозволяє здійснювати не тільки упорядкування розрізнених відомостей щодо відомих видів систем, але й прогнозувати появу нових видів, з можливістю отримання повної, систематизованої

інформації відносно видового різноманіття ЕМПЕ в межах конкретного таксономічного класу. Тобто за допомогою моделей макроеволюції можна здійснювати спрямований пошук і синтез породжувальних ЕМ-структур, неявних видів, які ще невідомі на даному етапі еволюції.

Використовуючи принципи побудови моделей макроеволюції, було створено відповідну модель для класу М-Ш (рис. 3).

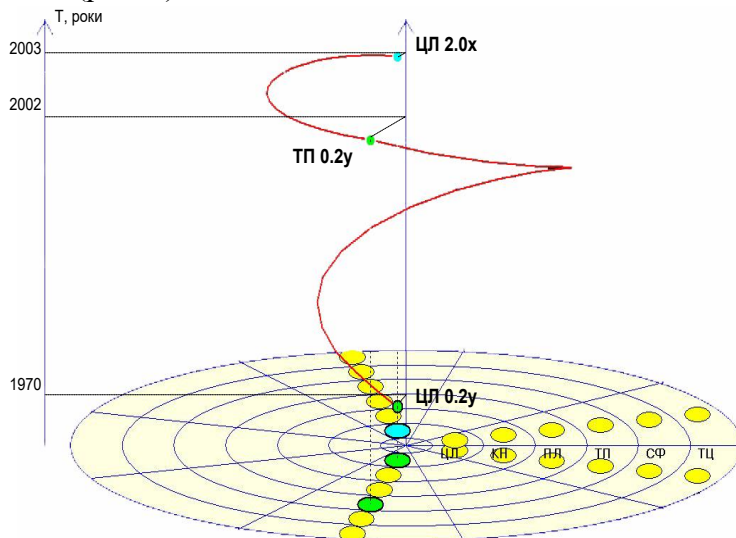


Рис. 3 – Модель макроеволюції мотор-шпинделів

За результатами аналізу оригінальних технічних рішень здійснюється обґрунтування і вибір *структури-прототипу*, яка в подальшому буде використана у процедурах спрямованого синтезу нових структурних різновидів досліджуваного класу.

Вибір структури-прототипу здійснюється з урахуванням наступних вимог:

- наявності оригінального технічного рішення (нововведення);
- відповідності його сучасному рівню техніки для класу М-Ш;
- наявності достатньої інформації, необхідної для опису і графічного відтворення конструкції М-Ш, розуміння принципу дії і особливостей його функціонування.

За допомогою моделей мікроеволюції відтворюються процеси структуроутворення, удосконалення і функціональної адаптації реально-інформаційних представників електричних машин в межах конкретного Виду. Генетичні моделі мікроеволюції відносяться до класу інформаційних високоінтелектуальних моделей видоутворення з можливістю передбачення нових структурних популяцій і різновидів електромеханічних структур.

У ході досліджень було побудовано лінійну модель мікроеволюції, яка відтворює реальні напрями структуроутворення домінуючого виду М-Ш (рис.4). Вихідною інформацією для побудови моделі є результати інформаційного пошуку: генетичні коди відомих структурних представників домінуючого Виду, хронологія їх появи і узагальнені цільові функції нововведень ($F_{ц1}$, $F_{ц2}$, $F_{ц3}$, ...). Для отримання зазначених даних використовується інформаційна база даних.

Для побудови моделі мікроеволюції за отриманою базою даних патентного пошуку потрібно:

- визначити до якого роду та Виду відноситься досліджувана група машин з точки зору базової класифікації;
- вказати еволюційні групи електричних машин одного Виду, які вирізняються за певними ознаками, наприклад за цільовою функцією та конструкцією.

Для побудови моделі виділяють прототипи які відносяться до одного роду та виду, які переважають в отриманій за результатами патентного пошуку базі даних. Це машини з

генетичним кодом ЦЛ0.2у. Наступним кроком є визначення цільових функцій які викликали створення розглянутих прототипів. Наступним кроком є об'єднання прототипів з однаковими цільовими функціями в окремі групи. Кожна група, яка відповідає певній цільовій функції, наноситься на графік у вигляді вертикальної лінії. На ній необхідно відмітити прототипи цієї групи в залежності від року виникнення прототипу.

За результатами моделювання визначаються наступні дані:

- загальний час еволюції досліджуваного класу і домінуючого Виду М-Ш;
- структура і функціональна спрямованість популяцій;
- напрями вдосконалення і функціональної адаптації в межах популяцій;
- темпи еволюції популяцій Виду;
- оригінальні технічні рішення.

Виділимо основні цільові функції:

- F1 – Спрощення конструкції (1,2,3,4,5,6,7,8,10,11,12,16,17,18,19);
- F2 – Зменшення габаритів (14);
- F3 – Підвищення продуктивності роботи (13);
- F4 – Захист конструкції від впливу негативних факторів (9,15);

Модель мікроеволюції показана на рис. 4.

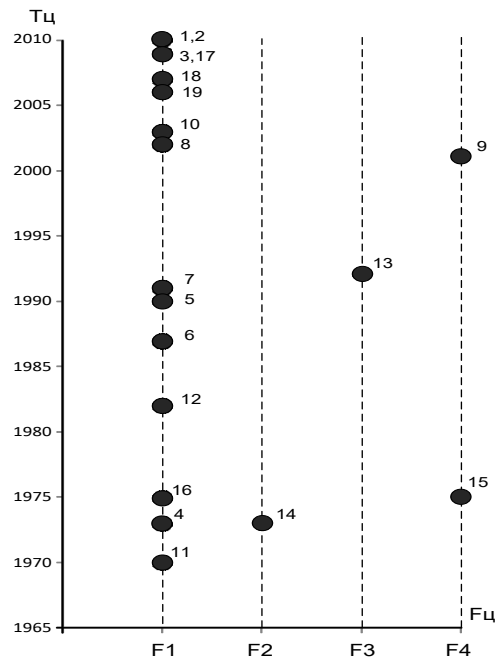


Рис.4 – Модель мікроеволюції М-Ш Т_ц – вісь часу, F_ц – вісь цільових функцій F1, F2, F3, F4.

Отже, модель мікроеволюції дозволяє здійснити аналіз ефективності інновацій і становить основу побудови алгоритмів генетичного синтезу ЕМ-об'єктів із покращеними показниками якості.

Побудована модель відображає час еволюції М-Ш, що складає 40 років. Як видно з моделі мікроеволюції, винахідники в цей період часу приділяли найбільшу увагу спрощенню конструкції М-Ш.

Спрощення конструкції відбувається наступними способами:

- шляхом виключення сполучних муфт;
- використовуючи магнітні підшипники;
- за рахунок об'єднання двигуна і засобу управління інструментом в одному блоці;
- за рахунок зміни форми шпинделя;
- шляхом застосування системи «гвинт-гайка».

Порівняльний аналіз процесів видоутворення споріднених видів ЕМ свідчить, що чисельність популяцій в межах споріднених видів ЕМ-систем розподіляється нерівномірно.

Істотно можуть відрізнятися і темпи еволюції таких видів. Нерівномірність структурного наповнення та розвитку базових видів є результатом дії факторів добору і конкурентної боротьби між спорідненими видами та популяціями. Для видів з різними функціональними властивостями, нерівномірність розвитку також зумовлена різними межами їх практичного використання.

Для базових видів групи 0.2 генетичної класифікації, яка поєднує споріднені (за ступенем електромагнітної дисиметрії) види електричних машин класу «М-Ш», відносний рівень співвідношень між чисельністю популяційного складу базових видів є нерівномірним (рис. 5). За 100% взята чисельність популяційного складу домінуючого виду ЦЛ 0.2у.

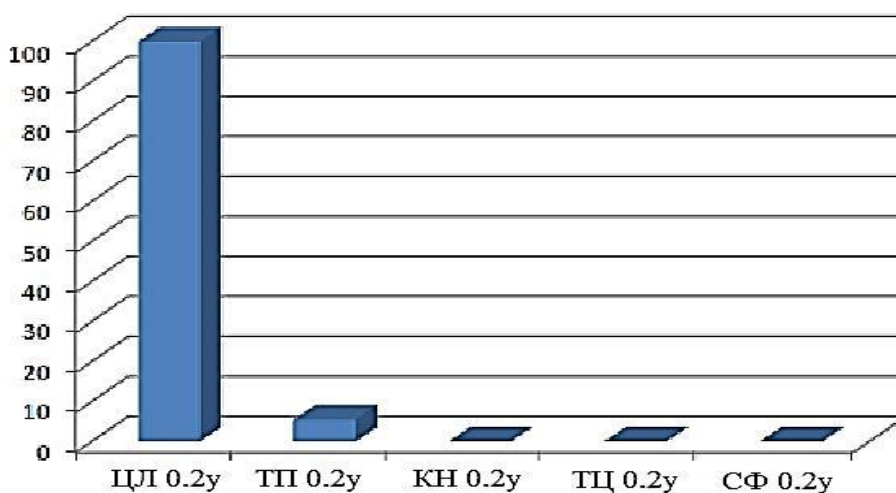


Рис. 5 – Розподіл популяційного складу базових видів електричних машин класу «Мотор-шпиндель»

Зі значним відставанням від домінуючого виду знаходиться вид тороїдних циліндричних М-Ш (5,5%). Вид плоских машин не враховують, бо він не задовольняє нашим умовам (п.2.4), а вид конічних, сферичних і тороїдних циліндричних М-Ш групи 0.2 на даний час фактично являються представниками неявного виду і складають інноваційний потенціал даного класу.

Як чисельність видів певного класу ЕМ-систем, так і чисельність популяційного складу окремих видів не є стабільною у часі. Вона змінюється в процесі еволюції в досить широких межах. Коливання чисельності ЕМ-структур найбільш відчутні для малопродуктивних видів, або видів з обмеженою областю функціонування.

Область існування Q – це генетично визначена сукупність породжувальних електромагнітних структур ПДП, які задовольняють інтегральній цільовій функції $F_{ц}$ відповідного класу ЕМ. Виходячи даного з визначення, область існування Q може бути визначена лише на генетичному рівні, з використанням системної моделі – Генетичної класифікації первинних джерел поля:

$$Q = (s_1, s_2, s_3, \dots) \subset S_o, \quad (1)$$

де $s_1, s_2, s_3, \dots$ – сукупність породжувальних структур, що задовольняють заданій $F_{ц}$ (геном класу);

S_o – множина породжувальних електромагнітних елементів предметної області ГК.

Наявність інформації про область існування досліджуваного класу відкриває можливість визначення:

- сукупності породжувальних електромагнітних структур класу (структури геному);

- кількості і геометричної різноманітності Видів, що утворюють клас;
- статус класу і межі його існування (на генетичному і Видовому рівнях);
- гомологічних рядів структурної різноманітності ЕМ;
- області існування і кількісного складу Видів-близнюків;
- інноваційного потенціалу Видів (за умови врахування результатів інформаційних досліджень).

Для визначення області існування у координатах базових ознак ГК необхідно виконати наступні процедури:

- сформулювати цільову функцію пошуку $F_{Ц}$ (визначається на основі аналізу і вибору сукупності суттєвих ознак, спільних для об'єктів досліджуваного класу);
- обґрунтувати і накласти обмеження на область пошуку (тобто, уточнити область пошуку в багатовимірному пошуковому просторі предметної області ГК);
- визначити сукупність первинних джерел поля, що задовольняють заданій $F_{Ц}$;
- ідентифікувати генетичні коди породжувальних структур відповідних Видів, що утворюють клас.

Результати визначення області існування Q узагальнюються в табличній формі, в координатах базових ознак ГК, з зазначенням відповідних генетичних кодів.

Для заданих суміщених електромеханічних систем типу «Мотор-шпиндель» визначимо наступні характерні ознаки:

- реалізація $x - y$ – орієнтованого просторового руху;
- принцип дії асинхронний;
- забезпечення мінімальних габаритів;
- наявність достатньої сукупності патентоспроможних ознак;
- можливість реверсу по x - y координатам;
- забезпечення високої швидкості обертання;
- наявність в конструкції симетрії відносно осі обертання ротора;
- незалежність поступального і обертального руху один від одного.

Зазначеному переліку ознак і обмежувальних факторів можна поставити у відповідність наступну цільову функцію:

$$F_{Ц} = \{V_x, \omega_y, H_{xy}, L_x, C, r, v\} \in R^n, \quad (2)$$

де V_x – функція поступального руху;

ω_y – функція обертального руху;

H_{xy} – функція поступально-обертального руху;

L_x – обмеження габаритів;

C – критерій конкурентоздатності;

r – можливість реверсу по двом координатам;

v – забезпечення високої швидкості обертання;

R^n – багатовимірний пошуковий простір генетично визначених структур.

Обмеження області пошуку Q :

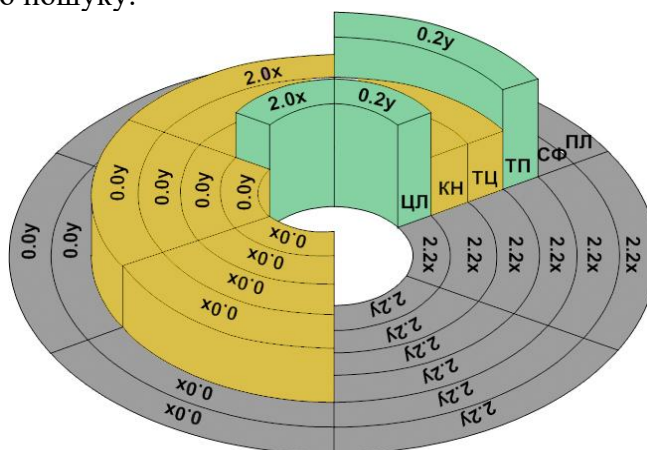
- область пошуку обмежуємо першим великим періодом ГК;
- не враховуємо плоскі та сферичні машини, бо вони не задовольняють умовам цільової функції.

Область існування М-Ш буде визначатись в межах рядів 0.2, 2.0 та 0.0.

Визначена область існування, яка є повною для досліджуваного класу (за прийнятих обмежень) має вигляд:

$$Q_{ми} = \left\{ \begin{array}{cccc} ЦЛ\ 0.0y, & КН\ 0.0y, & ТП\ 0.0y, & ТЦ\ 0.0y; \\ ЦЛ\ 0.0x, & - & - & - \\ ЦЛ\ 0.2y, & КН\ 0.2y, & КН\ 0.2y, & ТЦ\ 0.2y \\ ЦЛ\ 2.0x, & - & - & - \end{array} \right\} \quad (3)$$

Область існування систем типу «М-Ш» показана на рис. 6 у вигляді кругової діаграми. Зеленим кольором показані існуючі представники цього класу знайдені під час інформаційно-патентного пошуку.



Визначення рангової структури основних систематичних одиниць досліджуваного класу.

Еволюція функціональних класів ЕМПЕ супроводжується розширенням їх Видової і структурної різноманітності, появою нових функціональних класів, структурно-функціональною інтеграцією з технічними системами іншої генетичної природи. Зазначені тенденції вимагають розробки науково обґрунтованих підходів до упорядкування прогресуючої різноманітності структур ЕМ і зростаючих обсягів супроводжувальної інформації. Постановка і розв'язання таких задач відноситься до прерогативи генетичної систематики – науки, задачею якої є опис і класифікація всієї різноманітності класів електромеханічних перетворювачів енергії на основі генетичних законів структуроутворення і еволюції електромеханічних систем.

Оснoву структури геносистематики становить рангове співвідношення між основними систематичними одиницями (таксонами) геносистематики. До основних систематичних одиниць відносяться Вид і Рід.

З точки зору геносистематики, довільний функціональний клас ЕМПЕ можна представити як відповідну сукупність генетично визначених Видів і Родів. В цьому полягає універсальність методології систематики. Ще одна фундаментальна властивість геносистематики полягає в її прогностичній функції, тобто, в можливості визначення як реально-інформаційних, так і неявних Видів, ще не задіяних на поточний час еволюції класу.

Вихідною інформацією для визначення структури і кількісного складу основних систематичних одиниць для досліджуваного класу є область існування породжувальних електромагнітних структур та структура їх генетичних кодів. Наявність такої інформації дозволяє визначити:

- систематичні одиниці рангу Роду (за приналежністю породжувальних структур до відповідних геометричних класів ГК);
- кількісний склад і структуру систематичних одиниць рангу Виду та їх розподіл по Родам;
- співвідношення реально-інформаційних і неявних Видів, та їх розподіл по Родам.

Рангова структура геносистематики є узагальненням результатів визначення систематичних одиниць досліджуваного класу і подається в графічній формі.

Наявність кореляції між структурою ГК, універсальним генетичним кодом, принципами збереження та систематичними одиницями [21] дозволяє визначити рангову структуру основних систематичних одиниць класу М-Ш (рис. 7).

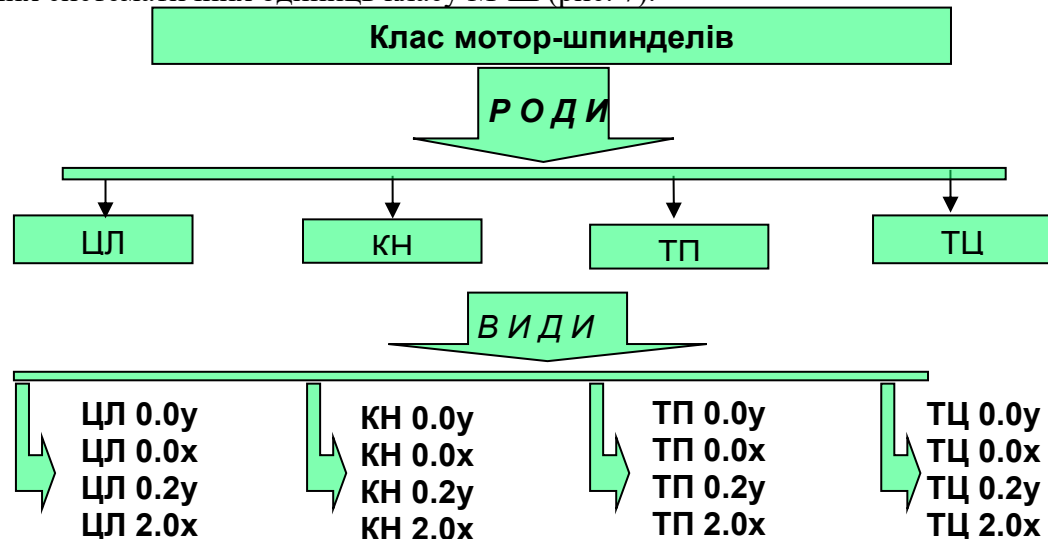


Рис. 7 – Рангова структура систематики класу М-Ш

Аналіз визначеної рангової структури систематики досліджуваного класу дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) структурний потенціал класу визначається 16 базовими Видами;
- 2) рангова структура систематики класу складається із 4 Родів та 16 Видів.

Використання універсальних генетичних операторів для створення самодіючих мотор-шпинделів.

Генерація структурних варіантів електромеханічних систем в задачах генетичного синтезу здійснюється за допомогою генетичних операторів, які відтворюють відповідні механізми розмноження та генетичної мінливості, властиві біологічним системам. Аналіз хромосомних наборів відомих класів ЕМПЕ, електричних апаратів та електротехнічних пристроїв свідчить, що в задачах генетичного синтезу структур найбільша частота використання належить операторам реплікації, схрещування, кросинговеру, та інверсії.

Оператор реплікації моделює процедуру розмноження вихідної структури із збереженням відповідної сукупності її генетичних ознак. На хромосомному рівні при здійсненні процедури реплікації роль вихідної структури виконують хромосоми реплікатори.

Якщо ми маємо однакові набори хромосом $X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n \dots X_L$ (близнята), які треба в кількості K_R використати для досягнення однієї мети – збільшення можливостей, то завдяки оператору реплікації ми їх об'єднуємо, тобто

$$\begin{aligned} &X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n \dots X_L + X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n \dots X_L + \\ &X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n \dots X_L = K_R (X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n \dots X_L) \end{aligned} \quad (5)$$

Приклад, необхідно М-Ш з генетичним кодом ЦЛ 0.2у (див. рис.7) використати в багатошпиндельному токарному автоматі (БТА) замість механічної системи (рис.8, а) при

однаковій частоті обертання від одного електродвигуна при постійних однакових зубчастих передачах [2, 3].

Для цього замість електродвигуна M_1 , змінних зубчастих коліс Z_1, Z_2 , розподільчого валу 1 і зубчастих коліс Z_3, Z_4 в отвори шпиндельного барабану 7 встановлюють М-Ш 3, кількість яких дорівнює кількості q позицій БТА, тобто коефіцієнт реплікації $K_R = q$.

Оператор схрещування – один з найпоширеніших генетичних операторів в задачах генетичного синтезу, що моделює механізми структуроутворення ЕМ – систем із змішаною генетичною інформацією. Процедура схрещування застосовують як на рівні синтезу батьківських хромосом, так і хромосом – нащадків.

Якщо ми маємо два різних набори батьківських хромосом $X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n \dots X_L$ і $Y_1 Y_2 Y_3 \dots Y_{n-1} Y_n \dots Y_L$, то в результаті схрещування ми отримуємо нащадків $(X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n \dots X_L) \times (Y_1 Y_2 Y_3 \dots Y_{n-1} Y_n \dots Y_L)$, тобто процес і результат схрещування виглядаються таким чином:

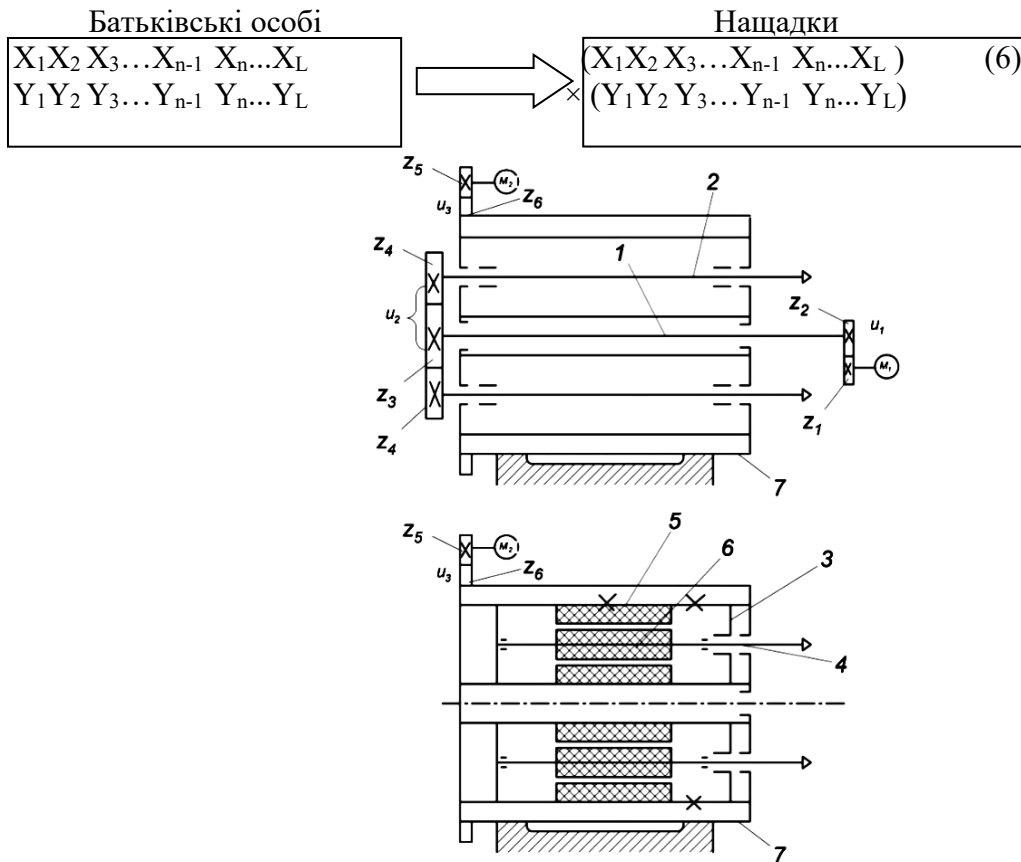


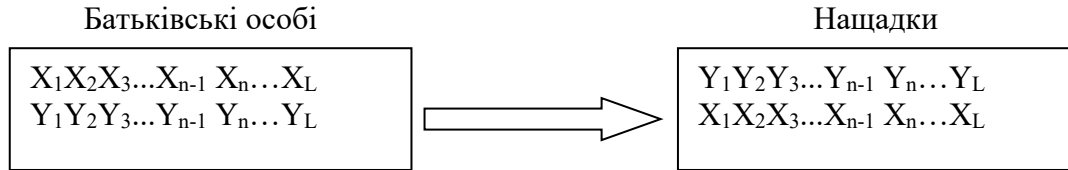
Рис. 8 – Варіанти шпиндельного барабану БТА з традиційним приводом головного руху (а) і з використанням кількох М-Ш (б): 1 – центральний розподільчий вал; 2 – шпиндель; 3 – М-Ш; 4 – шпиндель з ротором 6 М-Ш; 5 – статор М-Ш; 7 – шпиндельний барабан; M_1 – електродвигун приводу обертання шпинделів 2; M_2 – електродвигун періодичного повороту шпиндельного барабану 7; Z_1, Z_2 – зубчаті колеса зміни передаточного відношення U_1 ; Z_3, Z_4, Z_5, Z_6 – зубчаті колеса постійного передаточного відношення відповідно U_2 і U_3 .

Оператор інверсії відтворює один з найпоширеніших механізмів генетичної мутації в ЕМ – системах. Поняття інверсії безпосередньо пов'язане з структурною будовою складного об'єкта і заданим просторовим розміщенням його складових частин. Під інверсією будемо розуміти пару елементів, розміщених у просторі в зворотному порядку.

Якщо хромосома поділяється на 2 частини і потім вони міняються місцями, це можна записати так:

$$0001111111 \longrightarrow 1111111000 \quad (7)$$

Процес інверсії з двома батьківськими особами виглядає таким чином:



Наприклад, М-Ш (див. рис. 8) при зміні схеми підводу електричного струму до обмоток статора і ротора може використовуватися як з нерухомим корпусом (рис. 9, а) при традиційному виконанні, коли на осі ротора розташований виконавчий орган, наприклад циліндрична фреза в затискному патроні, так і з рухомих корпусом при нерухомому роторі (рис. 9, б), коли на корпусі розташований виконавчий орган, наприклад, шліфувальний круг або дискова фреза.

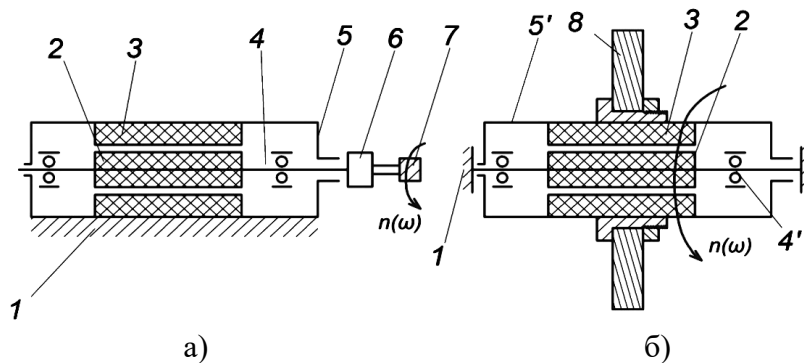
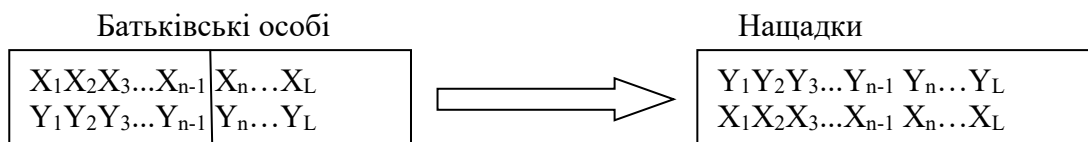


Рис. 9 – Мотор-шпиндель з рухомими ротором (а) і статором (б) з використанням генетичного оператора інверсії: 1 – основа нерухома; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – шпиндель, що обертається; 4' – шпиндель-вал, що не обертається; 5 – нерухомий корпус М-Ш; 5' – рухомий корпус М-Ш; 6 – затискний патрон; 7 – циліндрична фреза; 8 – шліфувальний круг

Кросингвер (crossover operator) – генетичний оператор, що моделює обмін окремих ділянок електромагнітних генів на хромосомному та об'єктному рівнях розвитку ЕМ – структури. Структури, які є результатом кросингверу, широко використовуються в різноманітних схемах обмоток ЕМ і електричних апаратів, в керованому багато індукторному тяговому електроприводі рухомого складу на магнітному підвісі, в структурних схемах керування та живлення електромеханічних пристроїв.

Припустимо, ми маємо дві батьківські особи з хромосомами $X = \{X_i \ i=1, L\}$ і $Y = \{Y_i \ i=1, L\}$. Випадково визначається точка всередині хромосоми, в котрі дві хромосоми поділяються на 2 частини і обмінюються ними. Ця точка називається точкою розриву або точкою кросингверу (crossover point). Процес кросингверу можна зобразити і описати таким чином:

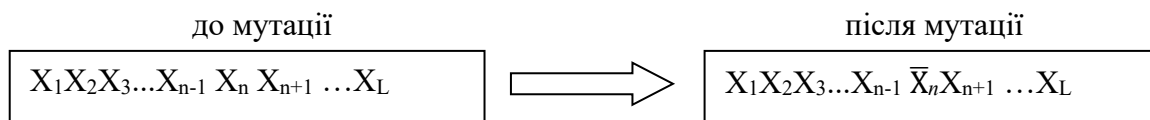


Даний тип кросингверу називається одноточковим, тому що батьківські хромосоми розрізаються тільки в одній випадковій точці. Існують двох і n – точкові кросингвери. В двох точковому кросингвері точок розриву 2, а n – точковий кросингвер є своєрідним узагальненням 1 – і 2 – точкового кросингверів для $n > 2$.

Мутація (mutation operator) – це генетичний оператор, що моделює зміни в структурі електромагнітних хромосом, які не враховуються генетичним оператором реплікації, схрещування та кросингверу. Процес виникнення та розширення структурної

різноманітності довільного виду ЕМ – систем можна розглядати як наслідок генетичної мінливості, яка на хромосомному рівні моделюється за допомогою відповідних генетичних операторів.

Оператор мутації необхідний для «вибивання» популяції з локального екстремуму і сприяє захисту від своєчасності сходимості. Досягається це за рахунок того, що інвертується випадково обраний біт в хромосомі. Це можна зобразити і описати таким чином:



Як і кросинговер, мутація проводиться не тільки по одній випадковій точці.

Таким чином за допомогою всіх вище названих операторів можна отримати всі необхідні структури.

Генетичний синтез несамодіючих і самодіючих мотор-шпинделів. Виходячи з інформаційного аналізу відомих проєктів і технічних вимог, для визначення обмежень цільової функції пошуку $F_{Ц}$ виділимо наступні істотні ознаки.

Шукана ЕМ-структура повинна забезпечувати:

- 1) поєднання функцій електромеханічного приводу і шпинделя ($S_E \times S_M$) в одному конструктивному модулі;
- 2) реалізацію незалежного керованого обертального руху шпинделя, в т.ч. і реверсивного ($\pm \omega$);
- 3) реалізацію незалежного керованого зворотно-поступального руху шпинделя ($\pm V_{OX}$);
- 4) співвісна додатка моментів і сил, що діють на шпиндель ($M_\omega \times F_V$) $_{OX}$, де OX - вісь симетрії шпинделя;
- 5) підвищення питомих показників головного приводу при обмежених габаритах виробу ($S_A \rightarrow max$);
- 6) конкурентоспроможність синтезованої структури ($K_S > K_A$), де K_A - сукупність істотних ознак найближчого аналога (прототипу).

Часткові вимоги 1-3 цільових функції F_S вказують на те, що шукана структура відноситься до класу гібридних ЕМ-об'єктів, що забезпечують обертальний і поступальний рух шпинделя.

Вимоги незалежності реалізації обертального і поступального руху шпинделя (вимоги 2 і 3) вказують на необхідність забезпечення умови

$$L_2 = (L_{a\omega} + L_{aV} + L_x), \quad (11)$$

де: L_2 – загальна довжина активної частини шпинделя;

$L_{a\omega}$ – активна довжина ротора головного приводу;

L_{aV} – активна довжина вторинного елемента приводу подання;

L_x – довжина ходу приводу подання.

Вимога співвісного прикладання сил і моментів (4) обмежує зону пошуку розглядом тільки тих породжувальних хромосом, які мають осьову симетрію.

Забезпечення вимоги з підвищення питомих показників на хромосомному рівні вирішується шляхом відбору хромосом, що мають схильність до максимального використання активної поверхні. Вимога конкурентоспроможності підтверджується на завершальному етапі структурно синтезу отриманням охоронного документу.

Генетична модель синтезу. Пред'явленій сукупності вимог (2, 3 і 4) до системи електроприводу, найбільшою мірою схильні батьківські хромосоми $^3ЦЛ 0.2у$ (ізотоп) і $ЦЛ 2.0х$. Результати синтезу на основі вказаних хромосом представлені на рис. 10.

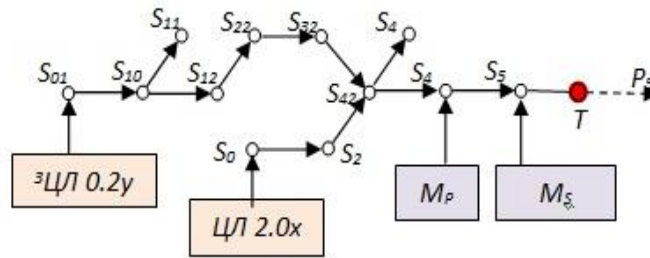


Рис. 10 – Генетична модель синтезу гібридної структури технічної системи TS

Проаналізувавши отримані результати спрямованого синтезу, варто зазначити, що всі синтезовані системи мають модульний принцип. Для подальшого розгляду і аналізу з переліку систем слід обрати систему з відносно більшою питомою потужністю основного руху різання (обробки). Такою системою є синтезована система S09.

Далі в роботі [4] розглянуто тільки частину обраної системи, що реалізує поступальний рух (він же рух подачі).

Представлена на рис. 10 модель, по суті, є графічним відображенням генетичної програми шуканого ЕМ-об'єкту, структура якого визначається суміщеною хромосомою п'ятого покоління S_{54} .

Синтезована хромосома S_{54} на 90% задовольняє задану F_S , за виключенням вимоги конкурентоздатності ($K_S > K_A$), яка визначається на етапі розробки технічного рішення і його наступного патентування.

Рівень генетичної складності шуканого гібридного об'єкту T_S визначається його структурною формулою:

$$S_{54} = \{({}^3\text{ЦЛ}0.2у)_1 \times [2(\text{ЦЛ}0.2у):R:M(r_2 > r_1):I_{OX}]_2\} \times \\ \times \{(\text{ЦЛ}2.0х)_1 \times [(\text{ЦЛ}2.0х):M(L_2 > L_1):I_L]_2\} \times (M_P, M_S) \subset T_S \quad (12)$$

Один з варіантів технічної реалізації структури хромосоми S54 представлений на рис. 11.

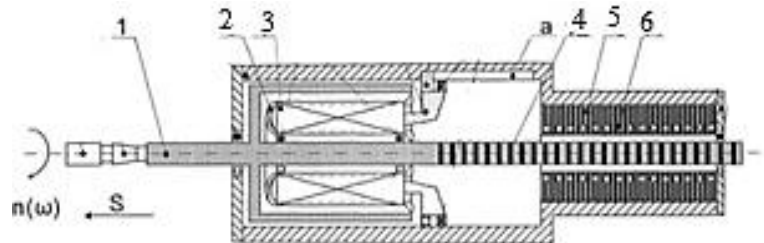


Рис. 11 – Варіант конкурентоздатного рішення, розробленого на основі структурної формули (12)

При подачі напруги на обмотку 2 індуктора обертального руху 3, виникає магнітне поле, яке взаємодіє з двосторонньою активною поверхнею шпинделя 1 і, таким чином, змушує шпиндель 1 обертатися з необхідною частотою обертання $n(\omega)$.

Для забезпечення подачі шпинделя, подається напруга на обмотку 6 індуктора поступального руху 5, електромагнітне поле якої взаємодіє з вторинним елементом з постійними магнітами 4 і забезпечує потрібну подачу S .

Аналогічним чином була побудована генетична модель синтезу (рис. 12) суміщених електромеханічних структур мотор-шпинделів з реалізацією зворотно-поступального руху, в яких рух подачі здійснюється шляхом перетворення обертального руху на поступальний завдяки застосуванню системи «гвинт-гайка».

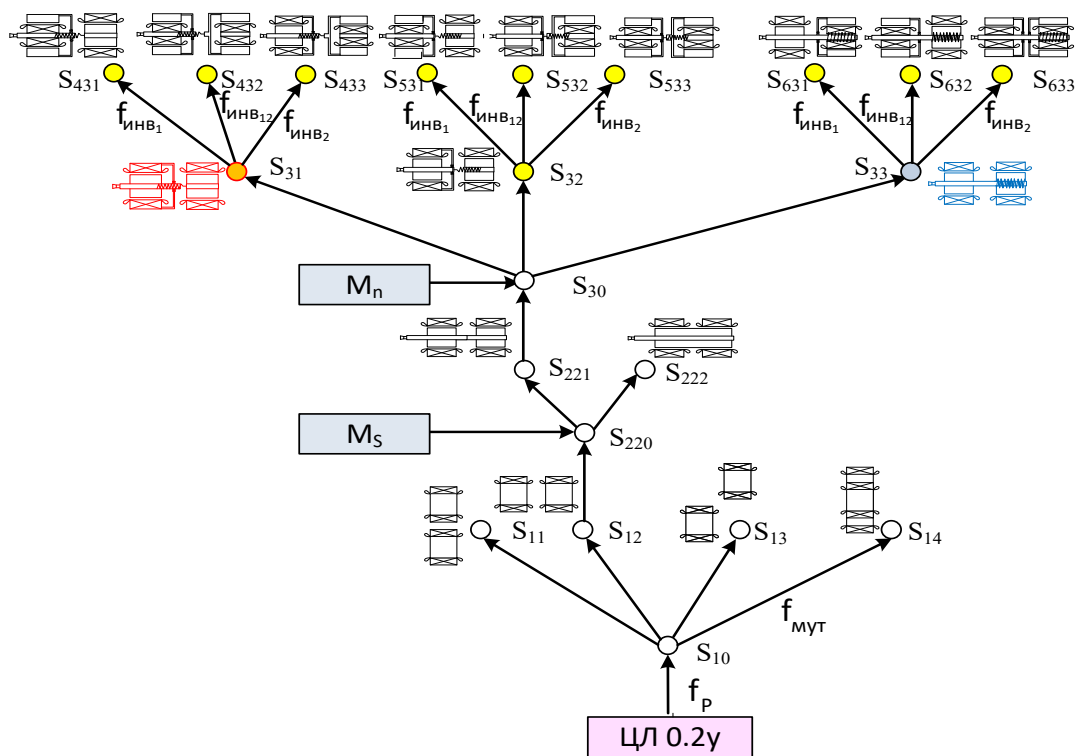


Рис. 12 – Генетична модель синтезу гібридних структур мотор-шпинделів з системою «ГВИНТ-ГАЙКА»

Один з варіантів реалізації синтезованої хромосоми S_{31} представлений на рис. 13.

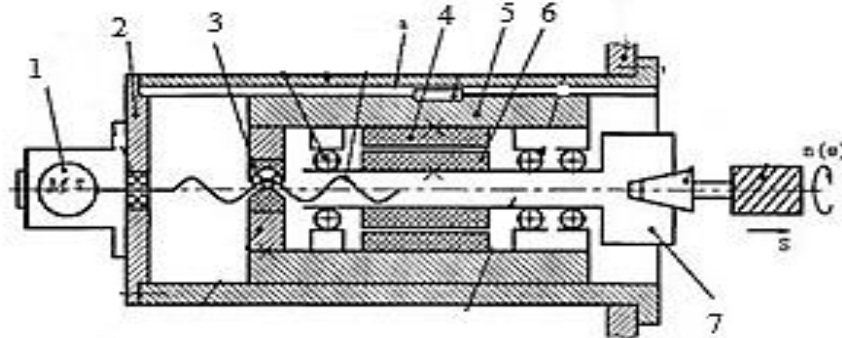


Рис. 13 – Принципова кінематична схема шпиндельного вузла фланцевого типу

При поданні напруги на обмотку статора 4, виникає магнітне поле, яке взаємодіє з двошаровою активною поверхнею ротора 6 і, таким чином, примушує шпиндель 7 обертатися з необхідною частотою обертання $n(\omega)$. Для забезпечення подання шпинделя, подається напруга на електродвигун 1, обороти якого за допомогою системи ЧПУ перетворюються через гвинтову пару 2, 3 на поступальний рух пінолі 5, забезпечуючи потрібну подачу S .

Висновки. Використання гібридних ЕМ-систем в системах типу «М-Ш» дозволяє реалізувати наступні переваги:

- суттєво розширити функціональні можливості електромеханічної системи за рахунок реалізації різноманітних керованих просторових рухів шпинделя (поступального, обертового, поступально-обертового, зворотно-поступального, реверсивного);
- суттєво розширити технологічні можливості систем обробки на верстатах з ЧПК: збільшити обсяг виробленої продукції, зменшити її собівартість, зменшити габарити оброблюваних комплексів, підвищити точність і якість обробки.

З використанням технології структурного передбачення було здійснено постановку і наступне розв'язання пошукової задачі інноваційного спрямування. Основні результати пошукових досліджень можна узагальнити наступними положеннями:

1. Вперше здійснено постановку задачі структурного передбачення потенційно нових варіантів ЕМ-структур, які задовольняються сукупності вимог зі створення суміщеної гібридних електромеханічної системи типу «Мотор-шпиндель».

2. На підставі генетичного аналізу сукупності вихідних вимог, науково обґрунтовано цільову функцію і здійснено вибір оптимальної траєкторії спрямованого пошуку електромеханічної структури.

3. Вперше встановлено, що структурний потенціал досліджуваного класу визначається двома класами моногібридів $\{ЦЛ\ 0.0(x \times y); ЦЛ\ 2.2(x \times y)\}$ і одним класом дигібридів ЦЛ $(0.2y \times 0.2x)$.

4. Вперше визначено область існування класу складних електромеханічних систем типу «мотор-шпиндель», яка представлена 16-ма породжувальними джерелами поля, зосередженими в межах чотирьох симетричних груп $(0.0, 0.2, 2.0, 2.2)$ та чотирьох геометричних класів (ЦЛ, КН, ТП, ТЦ) Генетичної класифікації.

5. Вперше синтезовано конвергентну генетичну модель структуроутворення для домінуючого класу дигібридних ЕМ-систем ЦЛ $(0.2y \times 0.2x)$, синтезовані 4 нові структури класів мотор-шпинделів і визначено оптимальну структуру шуканої суміщеної гібридної ЕМ – системи.

6. Синтезовані ЕМ-системи доведені до патентноспроможного рішення, які захищені патентами на корисну модель України.

7. Створений новий клас ЕМ-об'єктів: багатошпиндельних вузлів при одному статорі, реалізація яких можлива з мінімальними витратами з М-Ш, що виробляються різними фірмами.

Список посилань

1. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем. / В.Ф. Шинкаренко. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
2. Шинкаренко В.Ф. Генетична класифікація первинних джерел електромагнітного поля: навч. посіб./ В.Ф. Шинкаренко, А.А. Августович. – К.: ВПК «Політехніка», 2005. – 4 с.
3. Шинкаренко В.Ф. Словник із структурної та генетичної електромеханіки / В.Ф.Шинкаренко, А. А. Шиманська. – К.:НТУУ «КПІ», 2015. – 112 с.
4. Олійник К.О. Синтез шпиндельних вузлів на базі мотор-шпинделів з використанням системно-морфологічного підходу //Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 5-6/2020 (124-125). – С.133-138.
5. Oliynyk K.O. Operability analysis of spindle-motor hybrid electromechanical systems //Mech. Adv. Technol. Vol.5, No1, 2021, p.p. 89-96.

УДК 628.477:661.634:502.17

Гончар В.П. канд. техн. наук, технічний директор
Горошко В.В., директор
ТОВ «АРТІДЕК», м. Київ, artidek@i.ua

ШЛЯХИ ВАЛОРИЗАЦІЇ ФОСФОГІПСОВИХ ДЕПОЗИТІВ УКРАЇНИ: ВІД ЕКОЛОГІЧНОГО ТЯГАРЯ ДО СТРАТЕГІЧНОГО РЕСУРСУ

Сьогодні Україна стоїть перед унікальним історичним викликом. Понад 270 мільйонів тонн фосфогіпсу, накопичених у гігантських териконах поблизу великих хімзаводів, десятиліттями вважалися виключно екологічним баластом. Проте в епоху глобального енергетичного переходу та жорсткої боротьби за критичну сировину, ці гори відходів мають бути переосмислені як «техногенні родовища». У контексті європейського Critical

Raw Materials Act (CRMA), український фосфогіпс – це не проблема, а стратегічний актив, здатний забезпечити 25-річний обсяг споживання рідкоземельних елементів (РЗЕ) для всього ЄС. Але щоб відкрити цей скарб, нам потрібно змінити саму філософію переробки.

Головною науковою перешкодою на цьому шляху завжди була так звана «кристалічна пастка». Природа фосфогіпсу така, що цінні метали, зокрема неодим (Nd) та празеодим (Pr), не просто лежать на поверхні – вони інтегровані в саму кристалічну решітку сульфату кальцію. Традиційне поверхнєве вилуговування, яке десятиліттями намагалися застосувати вчені, у цьому випадку є тупиковим шляхом. Воно дає низький вихід корисного продукту і створює нові об'єми токсичних стоків.

Наш шлях базується на концепції «Матричної трансформації». Замість того, щоб намагатися «вимити» метали з поверхні, ми пропонуємо повне хімічне розчинення гіпсової матриці. Це дозволяє деструктурувати кристал і повністю звільнити РЗЕ, що заблоковані всередині. Результати на рівні TRL-4 підтверджують: такий підхід забезпечує 50-кратне збагачення, дозволяючи перейти від мізерних 0,12% вмісту неодиму в сировині до солідних 6,3% у первинному концентраті. Це критичний поріг, за яким подальша сепарація металів стає економічно доцільною.

Проте вилучення лише рідкоземельних металів часто є збитковим через колосальні енерговитрати. Тут на сцену виходить стратегія «Економічного айкідо». Ми не боремося з величезною масою відходу – ми використовуємо її інерцію для створення додаткової вартості. Справжня валоризація можлива лише через мультипродуктову модель. Поки рідкоземельні концентри працюють на глобальний ринок (магніти для електромобілів та вітряків), сама перетворена матриця гіпсу стає високоцінним в'язучим матеріалом (G10-G15). В умовах майбутнього масштабного відновлення України такий локальний ресурс для будівельної індустрії є безцінним. Більше того, регенерація сірчаної кислоти та вилучення сполук стронцію закривають петлю циркулярної економіки, перетворюючи витрати на реагенти в прибуткові товарні потоки.

Найскладніший етап цього шляху – подолання «Долини смерті». Це розрив між лабораторним успіхом і промисловим впровадженням. Бізнес часто вимагає «готових рішень», але для проривних технологій їх не існує в коробці. Перехід від пробірки до заводу потребує проміжної ланки – пілотної установки. Це етап, на якому за \$350–500 тисяч інвестор купує не прибуток, а «страховку» від краху багатомільйонного заводу. Масштабування TRL-4 до TRL-7 дозволяє валідувати масові баланси в реальних умовах, де кожен тип фосфогіпсу має свою унікальну хімічну «ДНК».

Валоризація фосфогіпсу в Україні – це не просто про хімію чи екологію. Це геополітичний інструмент. Створюючи незалежний ланцюжок постачання критичних металів у партнерстві з США та ЄС, ми стаємо частиною західної системи безпеки. Ми доводимо, що український інтелект здатен перетворити «брудну» спадщину минулого на фундамент для зеленого майбутнього світу.

СЕКЦІЯ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА СИСТЕМИ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

UDC 621.9.02

Radzevich S.P., Dr.Sci, Professor
EATON Corp., radzevich@usa.com

EVOLUTION OF THE CONJUGATE ACTION LAW: FOR GEAR DRIVES AND GEAR-CUTTING PROCESSES

A significant volume of precision gears is machined and finished on gear generators. During gear generating operations, a mandatory requirement is the fulfillment of a set of three fundamental laws of gearing [2]. Developed within the framework of theory of gearing [4], this set of three fundamental laws of gearing is utilized to refine the processes of gear manufacturing and finishing.

The aforementioned set of three fundamental laws of gearing includes:

1. The *Law of Contact*, formulated by *Franz Reuleaux* (in the mid-19th century) and mathematically described by Professor *V.A. Shishkov* (in the latter half of the 1940s);
2. The *Conjugate Action Law* (discussed in greater detail later in the text);
3. The *Law of Equal Base Pitches* [4].

Let's focus our attention here to the *Conjugate Action Law* [4], which is often referred to as the *second fundamental law of gearing*.

1. The *Conjugate Action Law* for parallel-axis gearing (P_a – gearing). Two gears with parallel

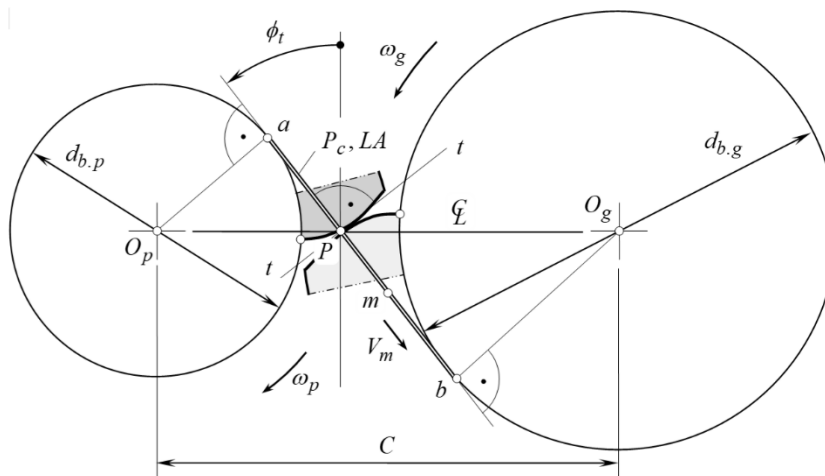


Fig. 1 – The Conjugate Action Law for gear drives with parallel axes.

axes of rotation, O_g and O_p , are schematically shown in Fig. 1.

The line of action, LA , is a straight line passing through the pitch point, P . The path of contact, P_C , is also a straight line passing through the pitch point, P . These straight lines, LA and P_C , coincide with each other if the mating gears are conjugate. These straight lines, LA and

P_C , are stationary, and their configuration relative to the gearbox housing remains unchanged. This constitutes the essence of the Conjugate Action Law for gear drives with parallel axes. The involute gearing proposed by Leonhard Euler (circa 1760) – also known as Euler gearing or, simply *Eu – gearing* – is the only type of **conjugate gearing** operating on parallel axes of rotation.

The Conjugate Action Law for gear drives with parallel axes, discussed herein, is commonly referred to as the Camus-Euler-Savary fundamental law of gearing (or just the *CES* – fundamental law of gearing, for brevity). [In the past, the Conjugate Action Law for gear drives with parallel axes was termed Willis's theorem of Gearing; however, this designation is incorrect, as Robert Willis made no contribution to this fundamental law of gearing [1, 5]. He merely actively disseminated this law of gearing, which had been known long before the commencement of R. Willis's scientific career].

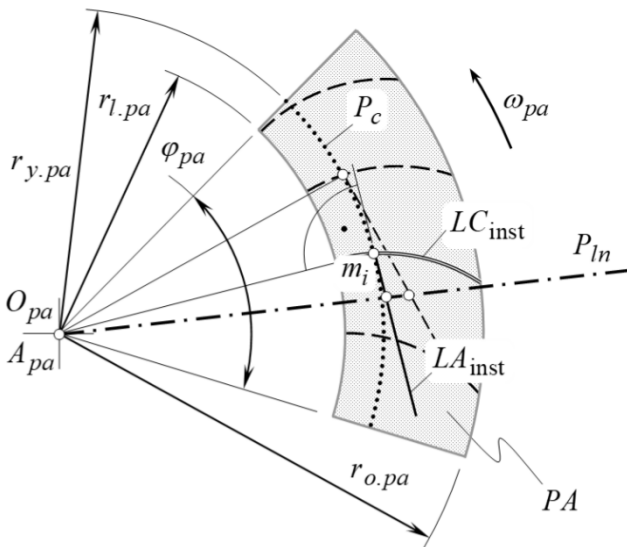


Fig. 2 – The Conjugate Action Law for gear drives with intersecting axes of rotation.

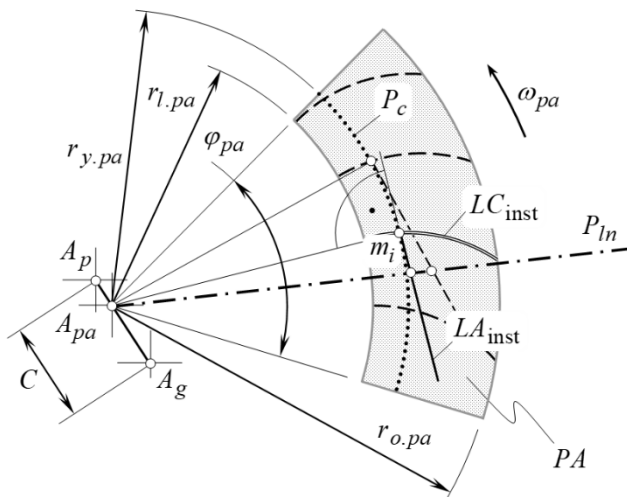


Fig. 3 – The Conjugate Action Law for gear drives with crossing axes of rotation.

axis of instantaneous rotation, P_{th} .

The gearing system developed by S.P. Radzevich (circa 2008) represents the sole type of **conjugate gearing** operating on crossing axes of rotation. Gearing of this type is customarily referred to as *R – gearing*.

Gearing of all three types – namely: (a) involute gearing (*Eu – gearing*), (b) Grant gearing (*Gr – gearing*), and (c) *R – gearing* – are geometrically-accurate gearing. This means that only gearing of these three types are capable of ensuring the smooth transmission of input rotational motion. The corresponding methods of gear machining and finishing are discussed in [3].

References

1. Pat. No. 407.437, (USA). *Machine for Planing Gear Teeth*./G.B. Grant, Filed: January 14, 1887 (serial No. 224,382), Patented: July 23, 1889.
2. Radzevich, S.P., *Development of the Scientific Theory of Gearing: Origins to the Present Day*, Springer Nature, 2026.

2. The *Conjugate Action Law* for intersected-axis gearing (*I_a – gearing*). The plane of action, PA , in a gear drive with intersecting axes of rotation, O_g and O_p , is shown in Fig. 2. Consider an arbitrary line of contact, LC_{inst} , between the gear, $\mathcal{G}$, and mating pinion, $\mathcal{P}$, tooth flanks. The instantaneous line of action, LA_{inst} , is a straight line lying within the plane of action, PA , passing through each point, m , of the line of contact, LC_{inst} , and intersecting the axis of instantaneous rotation, P_{ln} .

Grant's gearing (1889) – or, simply *Gr – gearing* – is the only type of **conjugate gearing** operating on intersecting axes of rotation, O_g and O_p .

See [2] for details regarding the contribution of G. Grant and S.P. Radzevich to the development of the *Conjugate Action Law* in intersected-axis gear drives (in *I_a – gearing*).

3. The *Conjugate Action Law* for crossed-axis gearing (*C_a – gearing*). The diagram presented in Fig. 3 is used to illustrate the key features of the *Conjugate Action Law* for *C_a – gearing*. C is the closest distance of approach of the axes, O_g and O_p . The line of contact, LC_{inst} , between the gear, $\mathcal{G}$, and its mating pinion, $\mathcal{P}$, tooth flanks is shown for an arbitrary configuration of gears in the gear drive. The instantaneous line of action, LA_{inst} , is a straight line lying within the plane of action, PA , passing through each point, m , of the line of contact, LC_{inst} , and intersecting the

3. Radzevich, S.P., *Gear Cutting Tools: Science and Engineering*, 3rd edition, CRC Press, 2024, 637 Pages.

4. Radzevich, S.P., *Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis*, 4th edition, CRC Press, 2026, 1190 pages.

5. Willis, R., *Principles of Mechanisms, Designed for the Use of Students in the Universities and for Engineering Students Generally*, London, John W. Parker, West Stand, Cambridge: J. & J.J. Deighton, 1841, 446 pages.

UDC 621.822.172

Fedorynenko Dmytro, D. Eng., professor

Tohoku University, Japan, fedorynenko.dmytro.b3@tohoku.ac.jp

Nakao Yohichi, D. Eng., professor

Kanagawa University, Japan, nakao@kanagawa-u.ac.jp

Sapon Serhii, PhD. Eng., associate professor

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, s.sapon@gmail.com

EFFECT OF GROOVE SHAPE AND ORIENTATION ON VISCOUS FRICTION IN SURFACE-TEXTURED HYDROSTATIC JOURNAL BEARINGS

Oil-lubricated hydrostatic journal bearings are widely used in ultra-precision spindles due to their high stiffness and load-carrying capacity [1]. Viscous friction in the bearing lands is a significant source of power loss, and surface microtexture offers a practical route to reduce it [2]. This study investigates groove geometry effects by steady laminar CFD (ANSYS Fluent) in a journal oil-lubricated hydrostatic bearing. The lands are split into circumferential lands (D1, pure Couette) and axial lands (D2, Couette–Poiseuille, pressure drop is 1 MPa over 5 mm). Rectangular baseline grooves have a depth of 10 μm , and a width spacing between adjacent grooves of 25 μm .

The first variant replaces the rectangular cross-section with a triangular (V-shaped) profile of equal depth and width. Area-averaged wall shear stress (WSS) on the moving wall increases by 30.9% for D1 transverse (WSS = 3452 vs. 2637 Pa for rectangular) and by 29.3% for D2 streamwise (WSS = 4659 vs. 3602 Pa). Full-bearing power loss is only 16.7% below the smooth baseline (424 W vs. 509 W), against 32.2% for rectangular straight grooves (345 W). The V-shape eliminates the flat groove floor required for a stable lid-driven cavity vortex. In a rectangular groove, the flat floor keeps the shear transmission factor at $k = 0.146$ (D1 transverse), whereas the V-shape forces convergent flow to the apex and prevents vortex formation.

The second variant retains the rectangular cross-section but applies a zigzag orientation on D2, with grooves alternating direction at a fixed angle. Area-averaged WSS on the textured strip drops to 3376 Pa - 6.3% below straight streamwise and 40.1% below smooth - with a mass flow rate of 1.871×10^{-4} kg/s.

Two conclusions are given as follows. First, groove cross-section is critical: the flat floor of a rectangular groove is essential for vortex stability, and V-shaped profiles yield less than half the friction reduction of rectangular ones (16.7% vs. 32.2%). Second, zigzag orientation on axial lands adds only 2.3 % friction reduction over straight streamwise grooves. The combined optimum is a transverse rectangular on circumferential lands and a zigzag rectangular on axial lands, achieving 34.5% total power loss reduction over the smooth reference.

This research was financially supported by the Machine Tool Engineering Foundation. The authors would like to express their profound gratitude to all concerned.

References

1. Fedorynenko D., Nakao Y. Evaluation of thermal stability of ultra-precision water-lubricated spindle. *Precis. Eng.* 2023, 80, 127–137.

2. Shang L., Ma D., Yu W., Zhu J. Drag reduction analysis of the surface texture in a hydrostatic bearing. *Appl. Sci.* 2022, 12, 10831

UDC 621.9-52:621.822:519.876

Roman Protasov, PhD., Ing., Mgr., assistant professor

Juraj Ondruška, PhD., Ing., associate professor

Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia

Votontsov Borys, DSc., professor

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, voronts@gmail.com

Bondarenko Oleksiy, CSc., associate professor

Ustynenko Oleksandr, CSc., associate professor

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, oleksandr.ustynenko@khpi.edu.ua

DESIGN OPTIMIZATION OF THE HOUSING OF A HIGH-SPEED SPINDLE WITH HYBRID DRIVE

Current trends in the development of high-speed spindles operating at rotational speeds of 100,000–120,000 rpm impose complex requirements on the drive system. One promising configuration is a hybrid drive combining a BLDC electric motor and a pneumatic turbine, arranged coaxially in series on a single axis of rotation. Among the several advantages of such a system is the possibility of cooling both the electric motor and the spindle bearings by means of the air exhausted from the turbine. However, providing effective cooling while minimizing the overall dimensions of the assembly constitutes a challenging optimization problem.

The present work addresses the development of an external housing component of complex geometry for such a spindle [1]. The housing has a fundamentally cylindrical shape and incorporates several groups of functional elements. This arrangement is dictated by the need to perform, through the housing alone, several distinct functions: high-stiffness fixation of the internal components, protection, and regulation of the air-cooling process. The air exhausted from the pneumatic turbine expands and cools, thereby providing thermal stabilization of the electric motor and the bearings. However, simple openings in the housing may prove insufficient for extending the operating range of the spindle. In the present project, it is proposed to supplement the main housing with additional movable rings featuring openings and linear guides that regulate the airflow upstream and downstream of the electric motor. Owing to the complex geometry of these housing components and the stringent requirements imposed on mass, overall dimensions, stiffness, and durability of the movable elements, additive manufacturing is proposed for their fabrication. This approach will permit the production of thin-walled parts with openings of complex cross-section, as well as variability in the design solutions for mounting the spindle to the machine tool. The geometric parameters of the movable rings will be established through CFD simulation of the airflow, while the load-bearing portion of the housing will be verified by finite element strength analysis, including determination of the natural vibration frequencies to ensure adequate dynamic stiffness.

The proposed approach is expected to provide effective thermal stabilization of the electric motor and bearings, to broaden the range of spindle variants without substantial modifications to the basic drive configuration, and to ensure flexibility in adapting the spindle to diverse technological requirements.

Acknowledgment. The research presented in this paper is an outcome of the project VEGA No. 1/0708/24 “Research on the design parameters of the high-speed spinning spindle of the progressive concept” funded by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, science, research and sport of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences and APVV-24-0641.

References

1. Juraj Ondruška, Lubomír Šooš, Jozef Babics, Miroslav Bošanský, Roman Protasov. Development Hybrid High-Speed Electro Pneumatic Spindles Drive Unit. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, Volume 74, Issue 2, 2024

UDC 621.548

Gaioz Partskhaladze, Professor

Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, gizo.partskhaladze@bs.edu.ge

Vladimer Chkhaidze, Professor

Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia

Gocha Chavleshvili, Professor

Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia

Boris Gitolendia, Professor

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

Borys Vorontsov, Professor

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, voronts@gmail.com

VERTICAL-AXIS WIND TURBINE

The article discusses the importance of wind energy as a renewable and environmentally friendly energy resource for the development of the country's energy potential. The paper analyzes the necessity of alternative energy sources caused by the radiation risks associated with nuclear energy and the environmental problems resulting from the intensive use of oil and natural gas.

Within the framework of the research, a group of researchers at Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi State Maritime Academy, Georgian Technical University, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" conducted theoretical and experimental studies of wind turbines. Theoretical relationships describing the kinetic energy of airflow and the power of wind turbines are presented, while the main factors affecting turbine efficiency - swept area, wind velocity, and wind energy utilization coefficient - are also discussed.

The paper describes an innovative vertical-axis wind turbine developed by the authors, designed to achieve a high wind energy utilization coefficient. A distinctive feature of the turbine is the special configuration of its blades, where, in addition to aerodynamic forces, an additional Magnus force is generated. This significantly increases the torque acting on the vertical shaft and improves the overall efficiency of the turbine.

Laboratory experiments demonstrated that the proposed model is characterized by a high wind energy utilization coefficient ($\xi=0.23\sim0.27$), which represents one of the best indicators for vertical-axis rotary-type wind turbines. The obtained results confirm that the proposed design is highly promising for the country energy system and can make a significant contribution to the efficient utilization of renewable energy resources.

References

1. Alom, N., Saha, U. K., & Maity, D. (2021). Savonius wind turbines: A review of recent advances in design and performance enhancements. *Materials Today: Proceedings*, 46, 567–575. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.653>
2. Bianchini, A., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2015). Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield. *Energy Conversion and Management*, 89, 690–707. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.038>
3. Castelli, M. R., Englaro, A., & Benini, E. (2011). The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy*, 36(8), 4919–4934. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.036>
4. Howell, R., Qin, N., Edwards, J., & Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(2), 412–422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>
5. Islam, M., Ting, D. S.-K., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087–1109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.023>

Maksym Lytvynenko, PhD student

Dmytro Lesyk, Associate Professor

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, lesyk_d@ukr.net

IMPROVING SURFACE QUALITY OF POLYCRYSTALLINE DIAMOND COMPONENTS USING WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Sintered polycrystalline diamond (PCD) is renowned for its exceptional hardness and wear resistance, making it a promising candidate for applications in micro cutting and grinding tools. The wire electrical discharge machining (WEDM) technique can precisely shape PCD tools, improving the material removal efficiency and machined surface quality of the PCD parts [1]. Zhang et al. also demonstrated that the short-circuit current had a greater effect on the material removal rate and a lesser impact on the electro-erosion layer depth.

It should also be noted that the efficiency of wire electrical discharge machining of high-entropy hard alloys and related superhard materials is relatively low, necessitating enhancements in the material removal rate, the electrode wear ratio and formation of cracks and chips on the PCD surface. It is hypothesized that WEDM performance is improved when conducted in water. Nevertheless, this process may induce electrochemical corrosion on the PCD surface.

In this study, the machinability of the PCD test parts (Fig. 1) was estimated using the WEDM Mitsubishi FA10 machine with a cutting speed of 1–10 mm/min, containing a 25 μm diamond size bimodal grain structure with diamond content $\sim 95\%$, using the WEDM process [2, 3]. The produced parts were subjected to grinding after the WEDM processing.

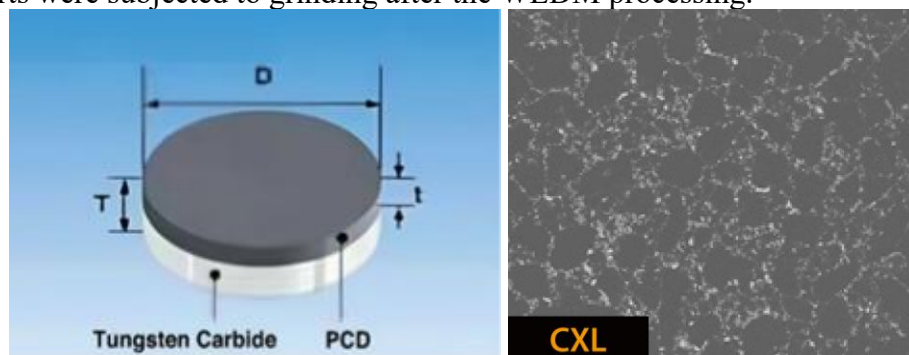


Fig. 1 – General view of the workpiece used ($D = 60$ mm; $T = 4.8$ mm; $t = 4.8$ mm) supplemented with image of PCD grain structure.

To reduce the number of key WEDM parameters that need to be considered during the experimental study, it was decided to leave all the parameters of the basic cutting mode unchanged, except for a peak current and WEDM discharge gap (pulse off-time). The peak current parameter was changed from 4 to 10 A, and the pulse off-time parameter from 1 to 16 μs . Experiments conducted with various cutting mode parameters showed that optimal performance and minimal edge defects can be achieved.

Referecnes

1. Zhang K. Experimental study on the wire electrical discharge machining of PCD with different grain sizes / K. Zhang, L. Zhu, Z. Chen, J. Shen, X. Zhao, X. Wu // *Diamond and Related Materials*, 2025. – 155. – 112331. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112331>
2. Tso P. Study on PCD machining / P. Tso, Y. Liu // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022. – 42(3). – С. 331 – 334. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00131-6)
3. Литвиненко М. М. Покращення цілісності поверхні твердосплавних пластин та продуктивності електроерозійним обробленням / М.М. Литвиненко, Д.А. Лесик // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», секція «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»*. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2025/paper/viewPaper/33281>

UDC 621.9

Kiyanovsky Mykola, Doctor of Engineering, Professor
Tsyvinda Nataliia, PhD (Engineering), Associate Professor
Pikilnyak Andrey, PhD (Engineering), Associate Professor
Ziuhan Uliana, engineer, assistant
Kryvyi Rih National University, civinda.n@knu.edu.ua

ENHANCING THE DURABILITY AND RELIABILITY OF CRUSHERS THROUGH THE IMPLEMENTATION OF NEW MATERIALS FOR FRICTION UNITS

In the technological cycle of the mining and metallurgical complex, cone crushers for various grinding stages are the key equipment for ore processing. Their operation occurs under conditions of significant loads: sliding bearings – including bushings and thrust bearings – operate under high specific pressures (up to 15–20 MPa), intensive abrasive wear, and vibrations caused by the ingress of non-crushable inclusions. This is particularly relevant for the ores of the Kryvyi Rih region, which are characterized by increased hardness.

The service life of crushers is largely determined by the durability of the friction units, which are traditionally manufactured using B12 Babbitt alloy. In addition to its limited wear resistance, a significant drawback of Babbitt is the inefficient technology used for its application – manual gas-flame surfacing onto bushings in layers up to 6 mm with preheating of the part to 150°C. This process is frequently accompanied by the formation of pores and delamination.

In this regard, research aimed at developing new wear-resistant composite materials and their application technologies for sliding bearings is particularly relevant. These developments are intended to provide enhanced tribological characteristics, increased seizure resistance, better damping properties, and superior abrasive resistance compared to B12 Babbitt.

Foreign manufacturers are already implementing modern polymeric and composite materials for the friction units of heavy-duty crushers. For instance, Sandvik utilizes a bronze matrix reinforced with dispersed particles of solid lubricants (MoS_2 , graphite) or ceramics (Al_2O_3 , SiC), providing a wear resistance 1.5–2 times higher than traditional BrO10F1 bronze [1]. For eccentric bushings, compositions based on polyetheretherketone (PEEK) and modified polyamide with the addition of carbon fiber and polytetrafluoroethylene (PTFE) have been investigated. For spherical thrust bearings, hybrid systems consisting of “steel – sintered bronze – PTFE layer + MoS_2 ” have been studied [2]. However, such materials are significantly more expensive than traditional analogs, and their application under production conditions is technologically complex.

Experts from the Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine have developed composite antifriction materials and technologies for their application onto the working surfaces of sliding bearings [3]. As a result, two types of materials were created:

- a composite based on a granulated compound infiltrated with LS-59-1brass;
- a composite featuring granules infiltrated with lead.

An analysis of the properties of the obtained materials and friction unit failure statistics revealed that traditional compositions possess several significant drawbacks. The most promising material for repair manufacturing is one formed from copper powder granules filled with graphite in the required proportions and infiltrated with a low-melting-point antifriction alloy (brass or other alloys). However, this approach requires further technical research.

Under industrial production conditions and within the framework of an R&D project, a new design for a repair bushing with a composite coating was developed for the eccentric of a KMD-2200T cone crusher operating at a mining and processing plant in the Kryvyi Rih Basin. Specialized tooling was created for applying the composite material layer onto the working surfaces of the bushing. The tooling consists of a steel casing with a sealed cavity designed to hold the composite granules for subsequent infiltration with LS-59-1brass.

Infiltration was performed via heat treatment in a gas-flame furnace according to a pre-established regime. After the soaking period, the tooling was disassembled, and the bushing underwent machining to expose the functional composite layer. Inspection revealed that uneven heating within the furnace led to variations in material properties along the height of the bushing, indicating a requirement for strict temperature control throughout the entire volume of the product. Overheating causes the partial dissolution of copper granules into the brass, thereby altering the composite's microstructure.

In the case of using a composite material based on granules infiltrated with lead, the required infiltration temperature is significantly lower. This reduces energy consumption and allows for the utilization of alternative equipment or the implementation of heat shields and trays to ensure uniform heating.

In conclusion, the developed composite materials meet the requirements for antifriction coatings in the sliding bearings of ore-grinding crushers. The most promising candidate is the composite with a lead matrix, characterized by superior antifriction properties, a simplified manufacturing process, and lower energy consumption. The use of such materials allows for a reduction in tin consumption (B12 Babbitt), a 30% increase in the mean time between repairs for crushers, and an improvement in the environmental sustainability of the production process. Practical results indicate that the service life of these units increases by a factor of 1.5–2 compared to bronze analogs. Future research should focus on “metal + high-molecular-weight polymer” coatings to further mitigate the impact of abrasive particles within the “shaft – bushing” interface.

References

1. Friedrich, K., & Schlarb, A. K. (Eds.). (2021). *Tribology of polymeric nanocomposites: Friction and wear of bulk nanocomposites and coatings* (2nd ed.). Elsevier.
2. Zhang, G., et al. (2021). A review of self-lubricating bronze-based composites: Manufacturing, friction, and wear properties. *Journal of Materials Science*, 56(12), 7345–7382. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05784-y>
3. Kindrachuk, M. V., Korniienko, A. O., et al. (2022). *Tribotechnological materials science: A textbook*. National Aviation University. (In Ukrainian).

UDC 62-231:621.9.04

**Kyrychenko Andrii, Dr. Tech. Sc., Professor
Amirseidov Mahomed, postgraduate**

Central Ukrainian National Technical University, kyrychenkoam@kntu.kr.ua

ANALYSIS OF VELOCITY AND FORCE TRANSMISSION IN A MACHINE TOOL WITH A PARALLEL MANIPULATOR

Machine tools with parallel manipulators are characterized by high stiffness, potentially high velocities of end-effector motion and the possibility of creating compact layouts of technological equipment. For three-coordinate machining, machine tools with combined kinematic structures are promising, in which a two-coordinate parallel manipulator is combined with a conventional linear axis [1, 2]. This approach makes it possible to simplify the machine-tool structure while preserving the advantages of parallel kinematics in the generation of end-effector motion.

The investigated machine tool with a bipod mechanism consists of two variable-length links that connect the end effector with the base by means of joints (Fig. 1). The parallel manipulator provides controlled motion in the Y and Z coordinates, while displacement along the X coordinate is realized by an additional linear table axis [2].

In previous studies [1, 2], inverse kinematic relations and actuator displacements were determined for this mechanism. To evaluate the technological capabilities of the machine tool, it is necessary to additionally analyze the transmission properties of the mechanism: velocity transmission coefficients, force transmission coefficients, manipulability indices and singularity indicators [3].

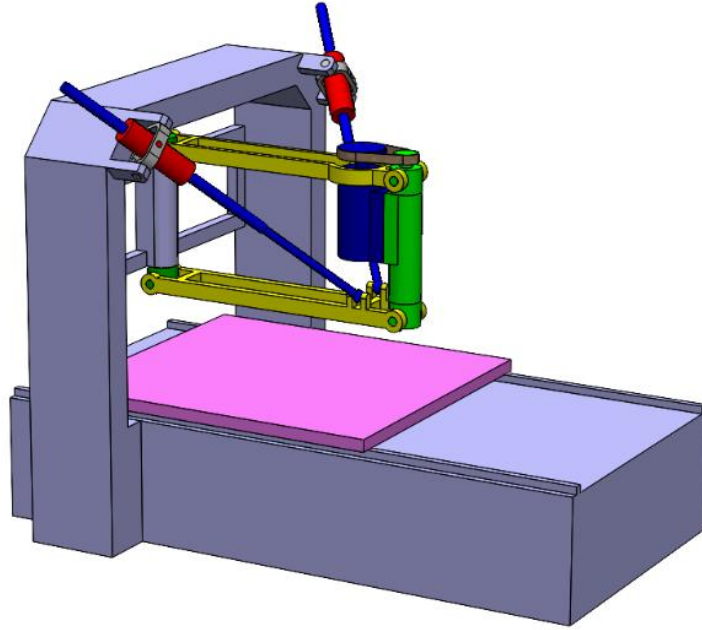


Fig. 1 – Machine-tool structure [2]

The position of the end effector is specified by the vector [1]

$$p = [X, Y, Z]^T, \quad q = [l_1, l_2, l_3]^T, \quad (1)$$

where l_1 and l_2 are the lengths of the variable-length links, and l_3 is the compensation displacement of the table. For the spherical motion of the end effector relative to joint O , the following relation is used:

$$x_s = \sqrt{L^2 - Y^2 - Z^2}. \quad (2)$$

The rotation angles of the end effector are defined as

$$\sin\psi = -\frac{Z}{L}, \quad \sin\theta = \frac{Y}{L\cos\psi}. \quad (3)$$

The lengths of the actuated links can be written in vector form as

$$l_1 = \|D_1\|, \quad l_2 = \|D_2\|, \quad l_3 = x_s - X, \quad (4)$$

where vectors D_1 and D_2 are determined by the geometric parameters of the mechanism and by the current coordinates Y and Z . This form is convenient for further differentiation, because the elements of the Jacobian matrix can be calculated as

$$\frac{\partial l_i}{\partial s} = \frac{D_i^T}{l_i} \cdot \frac{\partial D_i}{\partial s}, \quad s \in \{Y, Z\}, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

The inverse-kinematics Jacobian matrix has the form

$$J = \frac{\partial q}{\partial p}. \quad (6)$$

It establishes the relationship between the velocity of the end effector and the actuator velocities:

$$\dot{q} = J\dot{p}. \quad (7)$$

For end-effector motion in the direction of a unit vector e , the velocity transmission coefficient is defined as [3, 4]

$$k_v(e) = \|Je\|. \quad (8)$$

Force characteristics are determined from the condition of power equivalence [3, 4, 6]

$$F^T \dot{p} = Q^T \dot{q}, \quad (9)$$

from which it follows that

$$F = J^T Q. \quad (10)$$

Then the actuator-load coefficient for a unit force in the direction e is

$$k_Q(e) = \|J^{-T}e\| \quad (11)$$

and the force transmission coefficient from the actuators to the end effector is defined as

$$k_f(e) = \frac{1}{\|J^{-T}e\|}. \quad (12)$$

For numerical modeling, calculations were performed for the range $Y = -800 \dots 800$ mm at $Z = 0$, as well as for characteristic spatial points of the workspace. Fig. 2 shows the velocity and force transmission coefficients as functions of coordinate Y .

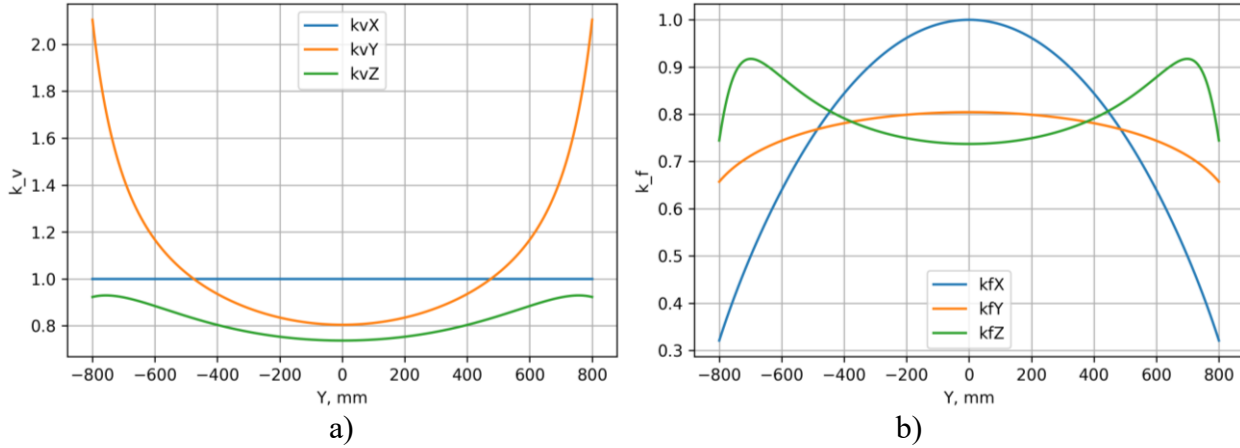


Fig. 2 – Velocity transmission coefficients a) and force transmission coefficients b) at $Z = 0$

The graphs show that velocity transmission along the X coordinate remains constant, since this coordinate is directly implemented by linear table motion. The coefficient k_{vY} has a minimum value near the center of the workspace and increases sharply near its boundaries. This means that, to provide the same end-effector velocity in the Y direction near the workspace boundaries, higher actuator velocities are required. The force characteristics show the opposite tendency: the force transmission coefficient in the X direction is maximal in the central part of the workspace and decreases significantly near the boundaries.

To estimate the proximity to singular configurations, the condition number and the minimum singular value of the Jacobian matrix were used [3, 5, 6]

$$\kappa(J) = \frac{\sigma_{\max}(J)}{\sigma_{\min}(J)}. \quad (13)$$

The results are shown in Fig. 3.

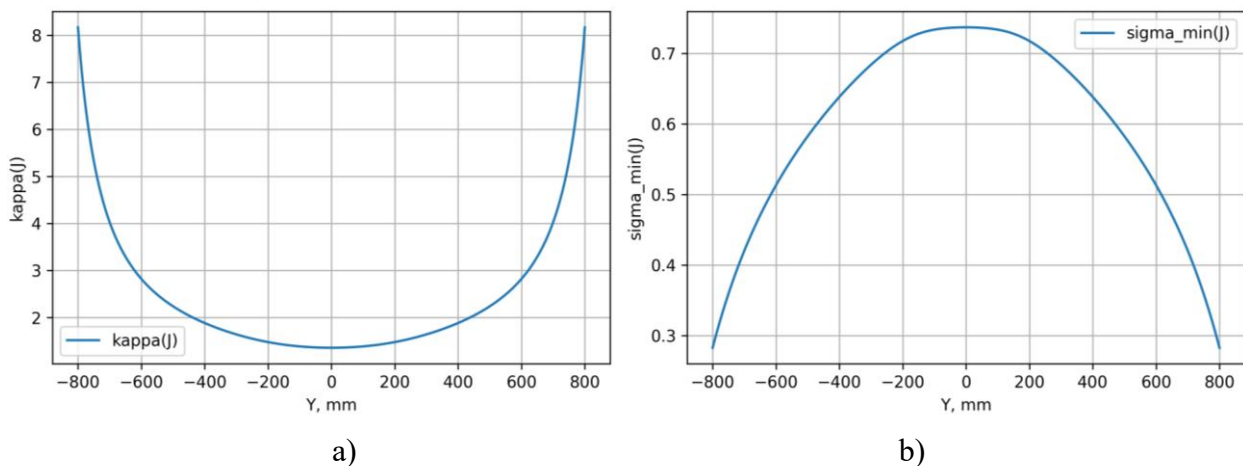


Fig. 3 – Condition number a) and minimum singular value b) at $Z = 0$

The minimum value of κ is observed near $Y = 0$, which corresponds to the best isotropy of the mechanism. When approaching the workspace boundaries, the condition number increases and $\sigma_{\min}$ decreases. Thus, the extreme positions of the end effector are less favorable for accurate and force-intensive machining, even if they are geometrically reachable [5, 6].

For a geometric interpretation of the local properties of the mechanism, spatial manipulability ellipsoids were constructed. This approach is based on the use of the Jacobian matrix and its singular values and is a development of the classical concept of manipulability of robotic mechanisms [4]. If the actuator velocity norm is limited, the velocity ellipsoid is described by the inequality

$$\dot{p}^T J^T J \dot{p} \leq 1, \quad a_i^{(v)} = \frac{1}{\sigma_i(J)}. \quad (14)$$

If the actuator-force norm is limited, the force ellipsoid is determined by the transformation $F = J^T Q$, and its semiaxes are $a_i^{(f)} = \sigma_i(J)$.

$$F = J^T Q, \quad a_i^{(f)} = \sigma_i(J) \quad (15)$$

Thus, the velocity and force ellipsoids are dual to each other [4, 6].

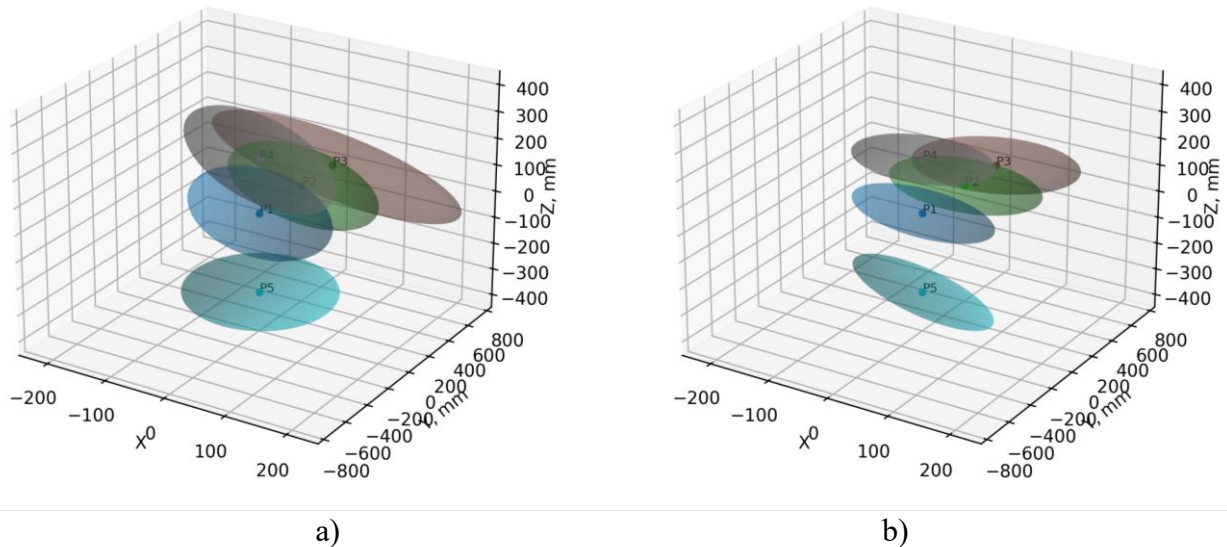


Fig. 4 – Spatial velocity a) and force b) manipulability ellipsoids at characteristic points of the workspace

The quantitative characteristics of the spatial ellipsoids are given in Table 1. Here η characterizes the local spatial isotropy of the mechanism.

Table 1 – Singular values of the full Jacobian matrix and isotropy index

Point	Y, mm	Z, mm	σ_1	σ_2	σ_3 / η
P1	0	0	1.000	0.804	0.737 / 0.737
P2	400	0	1.202	0.818	0.638 / 0.531
P3	700	0	1.693	0.921	0.421 / 0.248
P4	0	200	1.047	0.895	0.680 / 0.650
P5	0	-300	1.113	0.697	0.688 / 0.619

The analysis of the table confirms that the mechanism has the best spatial properties in the central part of the workspace. At point P_1 , the isotropy coefficient is $\eta = 0.737$, whereas at point P_3 , which corresponds to approaching the boundary along coordinate Y , it decreases to $\eta = 0.248$. This indicates a significant increase in anisotropy and deterioration of velocity and force transmission conditions near the workspace boundaries [5, 6]. Displacement along coordinate Z also worsens isotropy, but less sharply than displacement along Y .

Thus, when evaluating the workspace of the machine tool, it is not sufficient to consider only the geometric reachability of end-effector positions. It is necessary to introduce the concept of a rational working area, in which the velocity and force transmission coefficients, the condition number, the minimum singular value and the manipulability indices remain within acceptable limits [3-6]. The constructed dependences can be used for optimizing the geometric parameters of

the mechanism, selecting rational machining modes and forming constraints in the machine-tool control system.

Based on the inverse kinematic model of a machine tool with a two-coordinate parallel manipulator, the Jacobian matrix was determined and used for analyzing velocity and force transmission. It is shown that the velocity properties are described by the Jacobian matrix, while the force properties are described by its transposed form. The central part of the workspace has the best isotropy indices, whereas near the boundaries along coordinate Y the condition number increases and the minimum singular value decreases. The construction of 3D manipulability ellipsoids makes it possible to visually determine the directions of the best and worst velocity and force transmission.

References

1. Кириченко А.М., Ленченко Л.В., Заїка С.А. Аналіз кінематики верстата з двохкоординатним механізмом паралельної структури «біпод». *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2008. № 2. С. 74-81.
2. Кириченко А.М., Кропівний О.О., Амірсеїдов М.Е. Просторова жорсткість робочого органа верстата з комбінованою кінематикою. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. II. С. 127-134. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11\(42\).2.127-134](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11(42).2.127-134)
3. Rosyid, A., El-Khasawneh, B., and Alazzam, A. Review article: Performance measures of parallel kinematics manipulators. *Mech. Sci.* 2020. Vol. 11. P. 49-73. <https://doi.org/10.5194/ms-11-49-2020>
4. Yoshikawa T. Manipulability of Robotic Mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*. 1985. Vol. 4, No. 2. P. 3-9. <https://doi.org/10.1177/027836498500400201>
5. Gosselin C., Angeles J. A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators. *Journal of Mechanical Design*. 1991. Vol. 113. P. 220-226. <https://doi.org/10.1115/1.2912772>
6. Merlet J.-P. Jacobian, Manipulability, Condition Number and Accuracy of Parallel Robots. *Journal of Mechanical Design* 2006, 128(1). P. 199-206. <https://doi.org/10.1115/1.2121740>

UDC 621.9.06-233.1-83:539.319

Kosmach O., PhD, Associate Professor

Kovtun I., PhD Student

Chernihiv Polytechnic National University, heathenrl@stu.cn.ua

TRENDS AND PROSPECTS OF HIGH-SPEED SPINDLE UNITS

The fundamental role of motor-spindles in modern mechanical engineering is a primary driver of industrial evolution. Current trends are dictated by increasing requirements for machining precision and productivity, both of which are defined by operating speeds. As the spindle is the most critical machine component – providing the main cutting motion and energy transmission – its thermal stability directly determines the quality and consistency of the final product.

From a historical perspective, machining precision has evolved from millimeter to nanometer tolerances since the 1940s. The transition to hybrid ceramic bearings in the late 1990s allowed for a doubling of speed performance without significant changes to structural dimensions. Current scientific research focuses on resolving the conflict between power and heat generation, as thermal deformations remain the primary barrier to achieving maximum precision.

Historical development demonstrates continuous improvement in machining capabilities. Modern classification categorizes machining into normal, precision, and ultra-precision, with the latter operating at dimensional errors of less than $0.001\ \mu\text{m}$. Fig. 1 illustrates the evolution of machining accuracy over time, from the past into the near future [1].

A key technological leap was the introduction of ceramic rolling elements, which allowed the speed factor n_{d_m} to exceed values of $4.0 \cdot 10^6\ \text{mm/min}$. This reduced machining time and improved surface quality due to ultra-high cutting speeds [2, 3].

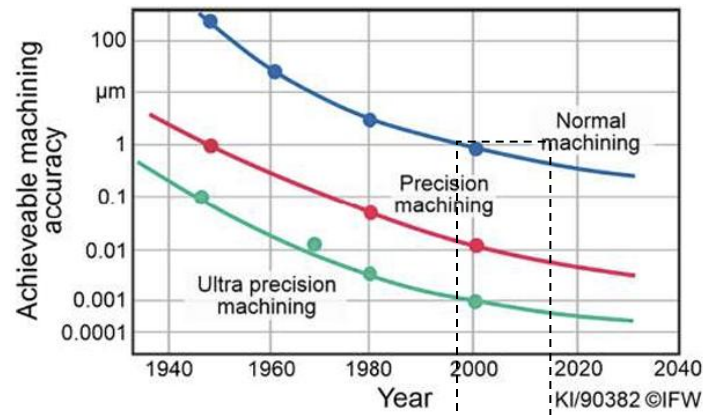


Fig. 1 – Evolution of achievable machining precision

The motor-spindle is the primary source of thermal load in a machine tool. Energy losses are distributed among electrical (stator and rotor), mechanical (bearing friction), and aerodynamic factors. Using a high-speed grinding unit as an example, total power losses reach nearly 20%, dominated by stator (11.2%) and rotor (5.4%) losses. This heating initiates a chain reaction of thermal deformations throughout the machine structure [2, 4].

Thermal loads lead to several negative effects: from geometric errors to premature aging of motor winding insulation. Statistical data indicate that thermal errors account for 7–17% of total machining error, and in some cases, up to 50% of defects are caused by tool displacement due to thermal influence. Beyond macroscopic deformations (spindle elongation of 0.1 mm or more), heat affects micro-geometry: changes in bearing preload due to heating can halve surface roughness (R_a), yet simultaneously drastically reduce the unit's lifespan due to accelerated wear [2, 5]. Fig. 2 shows the approximate energy losses of a traditional electric spindle unit with rolling elements and constant lubrication, corresponding to the highlighted zone in Fig. 1 [2].

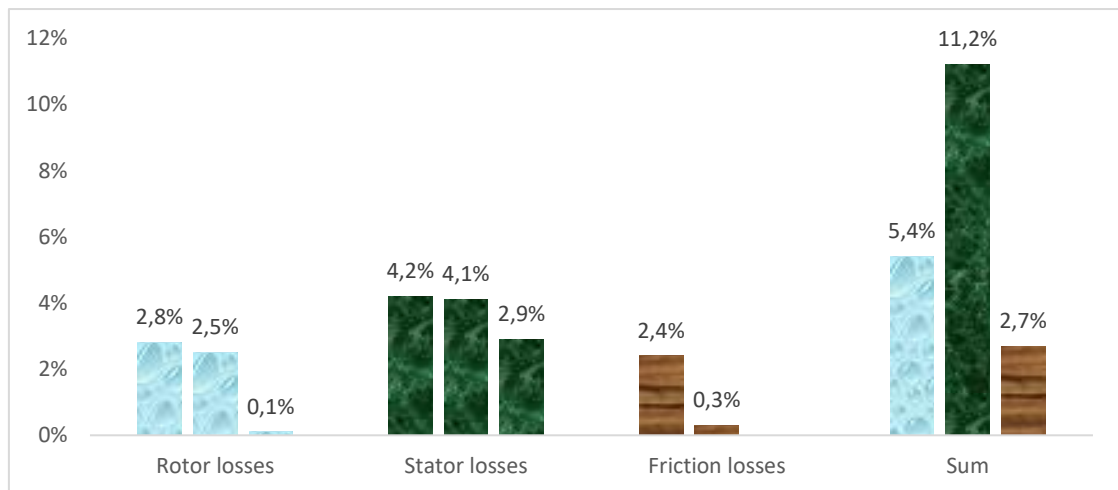


Fig. 2 – Energy efficiency analysis of electric spindle components

Two main approaches are used to counteract thermal effects: active compensation (cooling, specialized materials) and software correction (adjusting CNC parameters based on models). Promising research is focused on developing brushless spindles with air cooling and magnetic bearings, which will allow for the complete elimination of mechanical friction. Additionally, the development of universal dynamic balancing methods for both rigid and flexible spindles, along with the implementation of "digital twins" to predict thermal behavior at the design stage, is critically important. The future of manufacturing and operation technology lies in the integration of high-speed bearings with intelligent online compensation systems, enabling motor-spindles to fully replace traditional drives even in the most complex operations.

Consequently, the development of mechanical engineering is directed toward ultra-precision machining (up to 0.001 μm) through the use of ceramic bearings and high-speed processing. The primary challenge remains thermal losses (up to 20%), predominantly within the motor, which cause up to 50% of defects due to deformations of the spindle itself.

From the perspective of further productivity enhancement, a promising solution is the transition to magnetic or low-viscosity fluid bearings, as well as the use of detailed modeling tools for real-time software compensation of machining and motion errors.

References

1. Taniguchi N. Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing // CIRP Annals. 1983. Vol. 32, No. 2. P. 573–582. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60185-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60185-1)
2. Denkena B., Bergmann B., Klemme H. Cooling of motor spindles—a review // Int J Adv Manuf Technol. 2020. Vol. 110. P. 3273–3294. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06069-0>
3. Kakino Y. Latest trend of main spindle for NC machine tool // NTN Tech Rev. 2004. No. 72. P. 2–5.
4. Gebert K. Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnelldrehenden Motorspindeln : Dissertation. Aachen : Shaker, 1997. 198 P.
5. Fujii K., Shimizu S., Mori M. Preload control technology of rolling bearings for machine tool spindles // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 2001. Vol. 67, No. 3. P. 418–422. DOI: <https://doi.org/10.2493/jjspe.67.418>

УДК 621.822:536.2:539.3

Ковальов В.Д., докт. техн. наук, професор
Васильченко Я.В., докт. техн. наук, професор
Шоповалов М.В., канд. техн. наук, доцент
Міхєєв А.О., аспірант
Жила О.В. бакалавр

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, kovalov.viktor@gmail.com

ТЕПЛОПРУЖНІ ДЕФОРМАЦІЇ В ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

Експлуатаційні характеристики гідростатичних опор значною мірою визначаються параметрами мастильної рідини та конструктивними особливостями самої опори[1,2]. До основних регульованих параметрів належать тиск, витрата та температура мастила, що безпосередньо впливають на його в'язкість і режим роботи опори. Проте навіть оптимізація зазначених параметрів не забезпечує повної точності розрахунків, оскільки більшість процесів у гідростатичній опорі є взаємопов'язаними та нелінійними.

Під дією зовнішніх навантажень, тиску в кишені та температурних факторів виникають пружні й теплові деформації елементів опори. Це призводить до зміни зазору між робочими поверхнями, а отже — до зміни витрати та тиску мастильної рідини. У результаті параметри опори потребують повторного перерахунку з урахуванням нових умов роботи.

Сучасні методи розрахунку гідростатичних опор базуються переважно на врахуванні пружних деформацій. Однак результати практичних досліджень показують, що суттєвий вплив на працездатність опори мають також теплові деформації. Їх ігнорування може спричинити втрату точності або навіть заклинювання вузлів тертя. Особливо це характерно для великогабаритного обладнання, де сезонні температурні коливання та складність підтримання стабільного мікроклімату в цеху спричиняють значні лінійні теплові деформації.

Прикладом такого явища стало заклинювання вертлюга діаметром 1,5 м у вертлюжному супорті токарно-гвинторізного верстата моделі КЖ16234Ф3. Аналогічно, для високоточних верстатів навіть незначні температурні зміни можуть викликати втрату точності

позиціонування шпинделя. Тому актуальною науковою задачею є створення комплексної методики проектування опор рідинного тертя з урахуванням як пружних, так і теплових деформацій.

У роботі тепловий стан опори розглядається як стаціонарний процес, тобто аналіз проводиться для усталеного температурного поля. Після певного часу роботи температура мастильної рідини на вході та виході із системи стабілізується, що дозволяє вважати теплообмін сталим процесом. Основні теплові процеси, що виникають у гідростатичній опорі, наведено на рисунку 1.

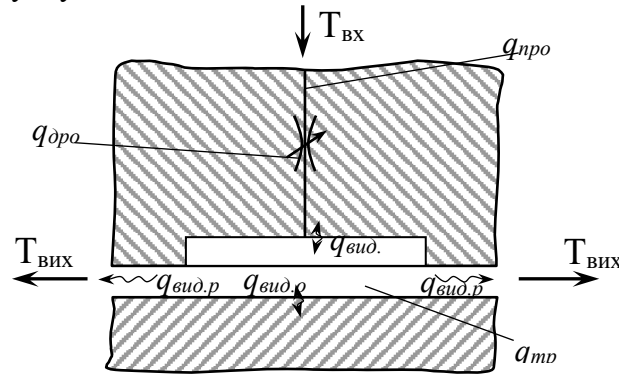


Рис. 1 – Схема протікання теплових процесів у опорі рідинного тертя

У процесі роботи в опорі виникають такі джерела тепла:

- тепло від прокачування мастила через систему $q_{прок}$;
- тепло, що виділяється під час проходження мастила через дросель $q_{дрo}$;
- тепло рідинного тертя $q_{тр}$.

Частина тепла відводиться мастильною рідиною $q_{вид.р}$, а інша частина передається елементам опори $q_{вид.о}$. Зовнішнім фактором є температура навколишнього середовища, яка також впливає на тепловий стан конструкції.

Для визначення температурного поля елементів опори необхідно розв'язати крайову задачу теплопровідності. Для стаціонарного режиму теплопровідність описується рівнянням:

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0$$

де q_v - об'ємна густина джерел тепла;

∇^2 - оператор Лапласа.

У прямокутній системі координат оператор Лапласа має вигляд:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$$

Після визначення температурного поля методом скінченних елементів теплові деформації можуть бути знайдені через коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу. Використання спрощених моделей із середньою температурою є недоцільним, оскільки опори важких верстатів мають складну геометричну форму.

Пружні деформації в опорі визначаються рівняннями теорії пружності, які враховують геометричні параметри опори, тиск у мастильному шарі, величину зазору та властивості мастильної рідини. Важливим параметром є динамічна в'язкість мастила μ , що залежить від температури.

Комплексне врахування пружних і теплових деформацій дозволяє точніше визначити реальний стан опори під час роботи. Спочатку задаються початкові параметри системи, після чого виконуються розрахунки температурного поля та пружних деформацій. Далі визначається зміна зазору в опорі й уточнюються параметри мастильного шару. Процес повторюється ітераційно до досягнення необхідної точності розрахунку.

Запропонований підхід передбачає ітераційний процес уточнення параметрів до досягнення необхідної точності. Для цього рівняння теплового балансу та рівняння пружності доцільно об'єднати в єдину крайову задачу. Найефективнішим методом її розв'язання є метод скінченних елементів, який дозволяє спростити обчислення та підвищити точність результатів.

Таким чином, врахування тепло-пружних деформацій є необхідною умовою підвищення точності та надійності гідростатичних опор важких верстатів. Комплексний підхід до моделювання дозволяє більш повно оцінити вплив температурних і силових факторів на працездатність вузла та забезпечити стабільність його роботи в реальних умовах експлуатації.

Список посилань

1. Федориненко Д.Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники: монографія / Д. Ю. Федориненко, С.П. Сапон – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – 405 с.
2. Сапон С. П. Моделювання траєкторій руху шпинделя на регульованих гідростатичних опорах / С.П. Сапон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – №2(73). – С. 83 – 92.

УДК 536.46:621.785.3:681.7.067.2

Салій С. С., асистент

Головко Л. Ф., докт. техн. наук, професор

Кагляк О.Д., канд. техн. наук, доцент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, saliysergiys@gmail.com

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФРОНТУ ПЛАВЛЕННЯ В ЗАДАЧІ СТЕФАНА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ

Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів передбачає одночасну дію гарячого розплаву на поверхню, яка попередньо опромінювалась лазерним випромінюванням. При цьому формування якісного металургійного з'єднання залежить від динаміки плавлення поверхневого шару функціональної складової та розвитку зони дифузійного контакту. Математичне моделювання цих процесів вимагає розв'язання класичної задачі Стефана про міжфазний перехід з рухомою границею розділу фаз, що є першочерговим для оптимізації режимів обробки та передбачення якості біметалу[1-3].

Задача Стефана при лазерно-ливарному формуванні біметалу характеризується високою нестационарністю термічного поля, яке визначається потужністю лазерного пучка ($P = 500\text{--}2000$ Вт), його розмірами у фокусі ($d = 1\text{--}5$ мм), швидкістю сканування ($v = 5\text{--}50$ мм/с) та теплофізичними параметрами матеріалів системи ХН60ВТ–Ст3. Фронт плавлення рухається з нестійкою межею контакту твердої і рідкої фаз, що вимагає застосування явних числових схем для адекватного відтворення цього процесу[4-5].

У роботі розроблено та апробовано метод числового розв'язання задачі Стефана з рухомою межею фаз для умов лазерного опромінення. Задача вирішується у двовимірній постановці з розрахунком температурного поля в обох фазах (твердій та рідкій) із врахуванням граничних умов типу Робіна та Діріхле. Умовна межа розділу фаз визначається за критерієм $T = T_{пл}$ з ітераційним уточненням положення фронту на кожному часовому шарі. Для дискретизації часової змінної застосовується явна схема Ейлера з адаптивним кроком, а для просторової дискретизації — метод скінченних різниць на рівномірній прямокутній сітці із кроком $\Delta x = \Delta y = 0,1$ мм.

Результати моделювання показали, що за потужності лазера $P = 1500$ Вт та швидкості сканування $v = 20$ мм/с на функціональному шарі формується зона плавлення глибиною 40–60 мкм, що відповідає експериментальним спостереженням. Фронт плавлення рухається нестійко з локальним утворенням мікроступів на межі розділу, що сприяє інтенсифікації

дифузійного контакту. Проведений аналіз залежності глибини зони плавлення від потужності лазера виявив близько квадратичну залежність, що узгоджується з теоретичними передбаченнями для напівнескінченного тіла при поверхневому нагріванні поверхні до температури плавлення.

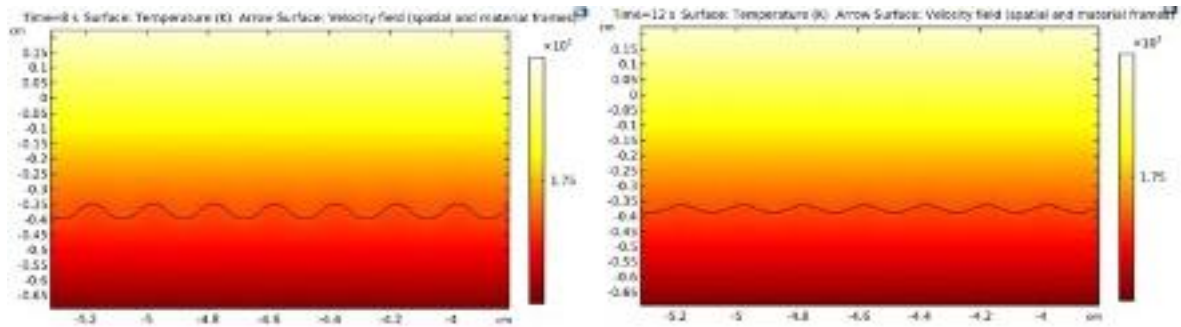


Рис. 1 – Зміна температурного поля і межі фаз середовищ в області розрахунку

Критичним фактором, що впливає на форму та стійкість фронту плавлення, виявилася конвекція розплаву, причому урахування конвективного переносу маси та енергії привело до зменшення температури на межі розділу фаз на 80–120 К порівняно з випадком чистої теплопровідності. Гідродинамічне моделювання потоків розплаву виконано на основі рівнянь Нав'є–Стокса в наближенні Буссінеска з урахуванням температурної залежності в'язкості розплаву нікелевого сплаву $\eta(T) = \eta_0 \exp(E/(RT))$. Максимальні швидкості конвективних потоків у зоні розплаву досягають 50–80 см/с, що суттєво впливає на форму зони з'єднання та розподіл легувальних елементів.

Комбінований числово-експериментальний аналіз дав змогу встановити оптимальні режими лазерного опромінення для забезпечення глибини плавлення 40–50 мкм, яка забезпечує максимальну міцність з'єднання біметалу. Розроблені рекомендації щодо вибору параметрів сканування лазерного пучка залежно від товщини функціонального шару та хімічного складу матеріалів.

Висновки. Чисельне моделювання задачі Стефана для лазерно-ливарних процесів виготовлення біметалів підтвердило основні експериментальні спостереження щодо глибини зони плавлення (40–60 мкм) та характеру нестійкості фронту плавлення. Врахування конвекції розплаву виявило суттєвий вплив на динаміку міжфазної границі та передбачуваний розподіл легувальних елементів. Розроблена числова модель дозволяє оптимізувати режими обробки для досягнення максимальної якості металургійного з'єднання та може бути розширена на тривимірні постановки з урахуванням електромагнітних ефектів індукційного нагрівання основи.

Список посилань

1. Vela, E., Hafez, M., & Régnier, S. Laser-Induced Thermocapillary Convection for Mesoscale Manipulation. *International Journal of Optomechatronics*, 3(4), 2009. 289–302. <https://doi.org/10.1080/15599610903389477>
2. W.H. Yu, S.L. Sing, C.K. Chua, C.N Kuo, X.L. Tian, Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting: A state of the art review, *Prog. Mater. Sci.* 104, 330–379 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.04.006>
3. O. Politano, Florence Baras. Thermocapillary convection in a laser-heated Ni melt pool: A molecular dynamics study. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134 (9), (10.1063/5.0167061). <https://doi.org/10.1063/5.0167061>
4. Головка Л. Ф., Романенко В. В., Блощин М. С., Кагльак О. Д., Салій С. С., Савченко О. А., Свічкарь І. В. Виготовлення біметалів з використанням ливарного процесу і лазерної обробки [Електронний ресурс]: монографія. – Київ : КІП ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 220 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53932>
5. Salii S., Golovko L., Kaglyak O., Kapustynskyi O., Višniakov N. The Formation of a Low-Carbon Steel/Ni-Cr-W Alloy Bimetallic Material via Liquid–Solid Compound Casting with a Laser Assisted Solid Surface. *Machines*. 2024. Vol. 12. P. 522. <https://doi.org/10.3390/machines12080522>

УДК 621.735.3

Колісник К.Д., аспірант

Чухліб В.Л., докт. техн. наук, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
kolesnik2195@gmail.com, profdnepro@gmail.com**ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОТЯГУВАННІ ПОКОВОК
ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГАКІВ**

Гаки є важливими елементами вантажопідйомних систем, які працюють в умовах високих навантажень, тому до якості таких виробів ставляться підвищені вимоги. Одним із важливих факторів забезпечення якості поковок є рівномірне опрацювання металу під час кування. Однією з основних ковальських операцій при виготовленні гаків є протягування, яке забезпечує подовження поковки та покращення структури металу [1]. При цьому характер деформування металу значною мірою залежить від ступеня деформації за прохід. Ступінь деформації при протягуванні суттєво впливає на розподіл пластичної деформації та якість поковки. Тому дослідження впливу ступеня деформації при протягуванні є актуальним для вдосконалення технології кування гаків.

Метою роботи є дослідження впливу ступеня деформації при протягуванні поковок для виготовлення гаків на розподіл пластичної деформації. Дослідження виконано методом комп'ютерного моделювання у програмному комплексі QForm UK [2] для комбінованого процесу, що включає осаджування та подальше протягування. Аналіз результатів проведено для ступенів деформації 10 %, 15 % та 20 %.

Моделювання показало, що характер розподілу пластичної деформації в поковці залежить від ступеня обтиснення за прохід. Нерівномірність деформації оцінено за коефіцієнтом K_n [3]. При значенні 10 % спостерігається недостатнє пророблення центральної зони поковки. Зі збільшенням ступеня обтиснення розподіл пластичної деформації стає більш рівномірним. Найкращий результат отримано при значенні 20 %, що сприяє підвищенню якості поковок для виготовлення гаків.

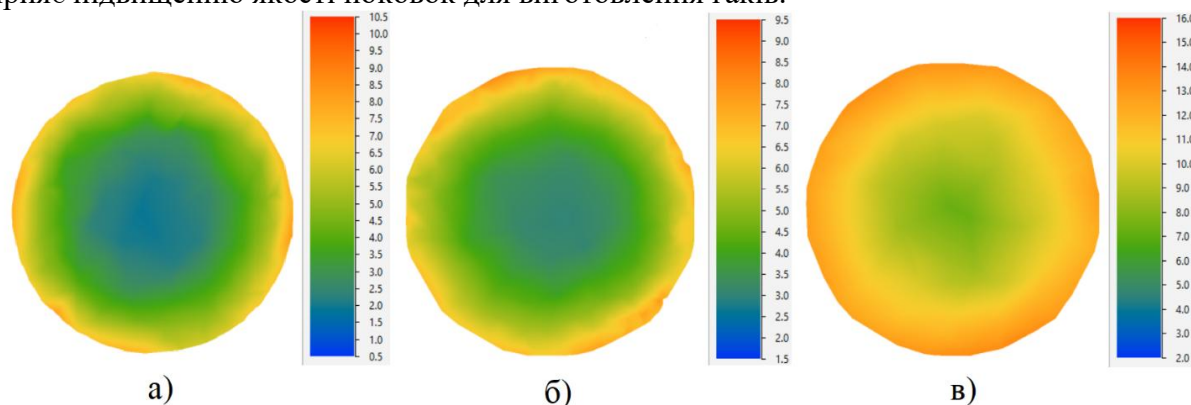


Рис. 1 – Розподіл пластичної деформації після третього проходу протягування при ступені деформації: а) $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 15\%$; в) $\varepsilon = 20\%$

Список посилань

1. Chen K., Yang Y. T., Shao G. J., Liu K. J. Simulation of large forging flat-anvil stretching process and its optimization // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). – 2011. – Vol. 16, № 2. – С. 199–202.
2. QForm UK [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://qform3d.com/>
3. Chukhlib V., Ashkelianets A., Gubskii S. et al. Development of a technological concept for designing forging processes taking into account the influence of the deformation mode on the quality of forging pieces // Bulletin of the National Technical University «KhPI». – 2021. – № 1. – С. 95–103.

УДК 621.833

Грицай І.Є., докт. техн. наук, професор
Вергун В.А., аспірант

Національний університет «Львівська політехніка», ihor.yhrytsai@lpnu.ua

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ІНТЕНСИВНОСТІ ШУМУ ЗУБЧАСТОЇ ПЕРЕДАЧІ, ЗУМОВЛЕНОГО ПОХИБКАМИ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ

Зубчасті передачі та трансмісії є і на перспективу будуть залишатися невід'ємними компонентами сучасних машин і механізмів, які в приводах, редукторах, скринях передач і швидкостей забезпечують зміну швидкості, крутного моменту і напрямку виконавчих ланок. Шестерні використовуються у продукції практично усіх галузей машинобудування, проте, основним виробником шестерень є автомобілебудування, на яке припадає 80%. При щорічному випуску автомобілів 60 мільйонів, тільки в цій галузі виробляють щороку порядку 900 млн. шестерень.

У наш час одним з найважливіших параметрів експлуатаційної якості машин загалом, та автомобільної техніки зокрема, є шум приводу. Акустичне навантаження від роботи коробки швидкостей створює. Особливо важливою ця проблема є для виробників електроавтомобілів, в яких електропривід доповнюють 2 - 8-ми ступеневими механічними коробками швидкостей, що дає змогу значно покращити якість приводів та збільшити їх життєвий цикл. В таких автомобілях шум від роботи коробки швидкостей не маскується роботою кривошино-шатунної і поршневої групи двигуна внутрішнього згорання і створює для користувачів негативний тоновий ефект високої частоти. Це підносить вимоги до акустики зубчастих передач на новий рівень, тому дослідження закономірності виникнення звукових хвиль та розроблення заходів для зменшення їх рівня є актуальною задачею сучасного автомобіля – та машинобудування в цілому.

Аналіз виникнення шуму та вібрацій під час роботи машин, механізмів, обладнання, устаткування і різних технічних засобів показує, що основною причиною звуку є просторові відхилення поверхонь, які перебувають в рухомому контакті з певною частотою, при цьому основним джерелом шуму є редуктори і коробки швидкостей. Найвищий рівень звукових коливань виходить від зубчастих коліс, а при тривалій експлуатації редукторів – також від їх підшипників.

Діапазон частот, в якому діють похибки коліс як джерела звуку ми ділемо на дві групи: 1 — ті, що проявляються за один оберт колеса (нижчої частоти); 2 – похибки, що генерують звук при контакті зубчастих профілів. Відхилення першої групи: похибки кроку зачеплення, радіальне биття, відхилення напрямку зубців, непаралельність осей і коливання міжцентрової віддалі викликають ударні навантаження з частотою, кратною кількості зубців колеса. Другу групу утворюють макро- і мікрівідхилення профілів, які, залежно від кроку можуть мати вид хвилястості рельєфу зубців, або шорсткості і є джерелами коливань вищих частот. Якщо завершальною операцією є зубошліфування, або зубохонінгування, то мікронерівності профілів виникають внаслідок вібрацій пружної системи верстата на різних частотах. Ці відхилення є основним джерелом шуму передачі, а механічна природа утворення звуку полягає в тому, що під дією навантаження поверхні зубців, які мають виступи, пружно деформуються. Енергія, що витрачається на це деформування, після виходу зубця з контакту і пружної релаксації нерівності перетворюється в енергію одиничного звукового імпульсу, а при постійному контакті в передачі генерується звукова хвиля.

Пружні деформації похибок профілів спряжених зубців в процесі динамічного контакту розглядаємо як *два види пружного деформування – стиску та зсуву*. На основі базових положень теорії пружності твердого тіла виведено залежності для розрахунку величини таких деформацій:

- стиск в напрямку нормалі до профілю:

$$\Delta y = 0,83 \cdot \left[\frac{2 \cdot P_n^2}{r \cdot E} \cdot (1 - \mu^2)^2 \right]^{1/3}; \quad (1)$$

- зсув в напрямку дотичної до профілю:

$$\Delta x \approx \frac{10^{-3}}{G} \cdot \frac{P_\tau}{H \cdot \Delta y} \cdot R_a, \quad (2)$$

де – P сили в передачі;

μ , E , і G – відповідно, коефіцієнт Пуассона, модуль пружності і модуль зсуву;

H – ширина вінця колеса і шестерні в передачі.

Обидва види пружної деформації мікроступу – «стиск - пружне відновлення» і «зсув - пружне відновлення» відбуваються одночасно. Приймаючи до уваги, що звукова хвиля поширюється сфероподібно, то можемо прийняти, що амплітуда зміщення внаслідок пружних нормальній Δy і дотичній Δx деформацій мікронерівності з початковою висотою h буде рівна:

$$a = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \text{ мм}, \quad (3)$$

Рівень звукового тиску, який створює звукова хвиля в повітрі від джерела механічного коливання з такою амплітудою, визначений відносно опорного акустичного тиску, або акустичного порогу p_0 становить:

$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{\rho \cdot C \cdot a \cdot \nu}{p_0} \right), \text{ дБ}, \quad (4)$$

де ρ – густина повітря;

C – швидкість звуку в повітрі;

ν – частота похибки, Гц;

a – амплітуда джерела; $p_0 = 20$ мкПа.

На рис. 1, а показано залежність інтенсивності звукової хвилі, що поширюється в повітрі, від похибки профілю, по якому відбувається рухомий контакт із шестернею, та від частоти цієї похибки. На рис. 1, б наведено графік рівня шуму передачі, в якій колесо і шестерня виготовлені за 10 ступенем точності.

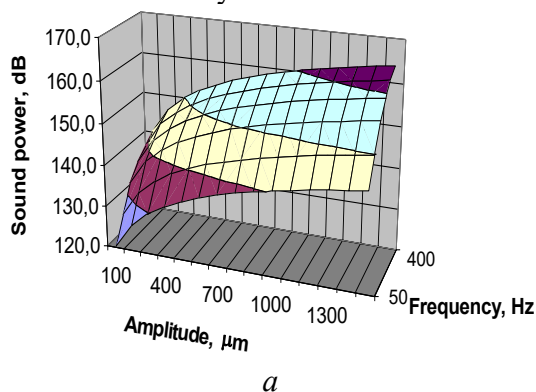


Рис. 1 – Залежність рівня звукового тиску від величини похибки профілю і її частоти а) та рівень інтенсивності звуку передачі б)

Отримані залежності для прогнозування інтенсивності звуку дають основу для встановлення обґрунтованої точності фінішної обробки коліс з метою забезпечення допустимих рівнів шуму під час експлуатації приводів на основі розрахунку відповідних робочих режимів різання, зокрема, швидкості різання.

УДК 004.896:621.9.048

Ковалевський С.В., докт. техн. наук, професор

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, kovalevskii61@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ЯК ДРАЙВЕР ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ

Історичний контекст промислових революцій демонструє, що якщо Industry 4.0 фокусувалася на кіберфізичних системах (CPS), зв'язності та ефективності, то Industry 5.0 ставить у центр людину, сталий розвиток та стійкість (resilience). Цифрові двійники в цій новій парадигмі розглядаються як інтелектуальні помічники, що підсилюють когнітивні можливості інженера, забезпечуючи перехід від автоматизації до справжньої колаборації людини та машини. Інноваційні процеси в сучасному машинобудуванні характеризуються високою складністю, оскільки вони одночасно охоплюють нові матеріали, складні конструкції та динамічні технології обробки. Традиційні CAD-рішення втрачають ефективність, коли мова йде про прогнозування поведінки системи під час різання на високих швидкостях або в умовах адитивного виробництва. Саме тому нове покоління інтелектуальних цифрових двійників (DT) базується на гібридному підході, де фундаментальні фізичні закономірності поєднуються з алгоритмами штучного інтелекту [1].

Узагальнена математична структура інтелектуального цифрового двійника може бути представлена як часова функція:

$$DT(t)=F(Mp, Ds, AI, \Delta t) ,$$

де: Mp – фізична модель процесу (mechanistic model), що базується на першопринципах (рівняння мас-балансу, енергії, кінематики);

Ds – потік сенсорних даних у реальному часі (sensor data), що забезпечує актуальність стану; AI – модуль штучного інтелекту, що відповідає за розпізнавання аномалій та самонавчання на накопичених даних;

Δt – часовий інтервал оновлення, який у сучасних системах 2026 року скорочується до мілісекунд (менше 50 мс для критичних систем захисту).

Одним із найбільш перспективних напрямків є використання фізико-інформованих нейронних мереж (Physics-Informed Neural Networks – PINN). Традиційний глибокий розвиток AI часто критикують за "фізичну невігластво", коли модель видає математично вірні, але фізично неможливі результати. PINN вирішує цю проблему шляхом вбудовування фізичних законів (диференціальних рівнянь у частинних похідних) безпосередньо у функцію втрат нейронної мережі.

Переваги використання PINN у цифрових двійниках машинобудування:

1. Навчання на малих вибірках, оскільки фізика виступає як додатковий регуляризатор, а мережа потребує значно менше розмічених даних для навчання.
2. Гарантована фізична коректність, оскільки прогнози моделі завжди відповідають законам збереження енергії, маси та імпульсу, що критично для розрахунку міцності деталей.
3. Відсутність сітки (Mesh-free), оскільки, на відміну від класичного методу скінченних елементів (FEM), PINN не потребує ресурсомісткої генерації сітки для складних геометрій, що прискорює симуляцію в рази.

У 2025-2026 роках спостерігається стрімка конвергенція цифрових двійників з великими мовними моделями (LLM). Це перетворює DT з пасивних аналітичних дашбордів на інтелектуальних експертів, з якими персонал може взаємодіяти природною мовою.

Попри очевидний прогрес, впровадження інтелектуальних цифрових двійників стикається з низкою бар'єрів, які потребують системного вирішення:

1. Дані часто замкнені у "функціональних колодязях" – конструктори тримають CAD-дані, виробництво – дані SCADA, а сервіс – дані про ремонти в SAP. Створення цілісного двійника потребує руйнування цих бар'єрів та впровадження єдиних стандартів (ISO, Digital Twin Consortium).

2. Цифровий двійник, що містить повну інформацію про технологічний процес, є критично вразливою ціллю для промислового шпигунства та саботажу. Забезпечення безпеки каналів зв'язку та довіри до моделей є пріоритетом №1.
3. Створення цифрового двійника, який би адекватно відображав знос інструменту на мікрорівні або хімічні перетворення матеріалу, потребує величезних обчислювальних потужностей та складних алгоритмів, що здорожує проект.
4. Перехід до управління на основі даних вимагає зміни мислення від керівництва до лінійного персоналу. Багато підприємств побоюються втрати контролю на користь алгоритмів ШІ.

Розвиток інтелектуальних цифрових двійників до 2026 року визначався трьома ключовими трендами:

1. Виконувати цифрові двійники, якими є компактні, самодостатні моделі, які можуть бути розгорнуті безпосередньо на граничних пристроях або вбудованих контролерах верстатів. Вони не потребують постійного зв'язку з хмарою для виконання симуляцій, що забезпечує миттєву реакцію системи на зміну умов обробки.

2. Мультиагентні системи та Enterprise Twins, які спілкуються між собою. Так, цифровий двійник верстата буде домовлятися з двійником логістичного робота про підвезення заготовок, а двійник енергосистеми — оптимізувати графік роботи всього цеху залежно від тарифів на електроенергію в реальному часі.

3. Цифровим паспортом продукту, що відстежуватимуть історію навантажень на кожну критичну деталь, дозволяючи точно визначати момент, коли її потрібно не просто замінити, а відновити (remanufacture) або переробити, максимізуючи збереження цінності матеріалів.

Висновки та рекомендації.

Інтелектуальні цифрові двійники перетворюються на центральну нервову систему сучасного машинобудування. Вони є не просто засобом візуалізації, а фундаментальним інструментом генерації інновацій, який дозволяє підприємствам бути гнучкими, сталими та людиноцентричними в умовах Industry 5.0.

Для успішної реалізації потенціалу DT підприємствам машинобудівної галузі рекомендується:

1. Сфокусуватися на гібридних моделях, оскільки поєднання фізичних знань (PINN) та аналізу великих даних забезпечує надійність, необхідну для критичних промислових застосунків.
2. Інтегрувати LLM як експертні системи, що дозволить скоротити розрив між складними даними та прийняттям рішень персоналом, створюючи проактивне середовище управління.
3. Впроваджувати DT поетапно, починати з критичних вузлів (наприклад, шпинделя верстата або лінії зварювання), де ROI від предиктивного обслуговування є найбільш очевидним, з поступовим розширенням до рівня "підприємства-двійника".
4. Інвестувати в людський капітал, оскільки технологія є ефективною лише тоді, коли персонал володіє навичками інтерпретації результатів моделювання та довіряє підказкам інтелектуальних систем.

Завдяки синергії граничних обчислень, штучного інтелекту та людиноцентричного підходу, цифрові двійники стають не просто відображенням сьогодення, а справжнім оракулом майбутнього для промислового сектору, забезпечуючи стійкий розвиток у світі, що постійно змінюється. Використання таких систем дозволяє скоротити шлях від ідеї до готового продукту, мінімізуючи ризики та максимізуючи цінність для суспільства.

Список посилань

1. Tripicchio, P., Satler, M., & Alberto Avizzano, C. (2026). Artificial Intelligence and Digital Twins Applications in Industry 4.0 and 5.0. In Industry 4.0 - Transforming the Future Beyond Manufacturing - Volume 1, Digital Technologies and Smart Industrial Systems [Working Title]. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1013146>.

УДК 62-5

Яковенко І.Е., канд. техн. наук, професор
Пермяков О.А., докт. техн. наук, професорНаціональний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
ihor.e.yakovenko@khpі.edu.ua

СУЧАСНИЙ РЕВЕРС ІНЖИНІРИНГ

Причини виникнення реверс інжинірингу зароджувалися з виникнення ремісничого і кустарного виробництва, як засіб копіювання трофейних і захоплених у війнах технічних виробів у особистому побуті. Реальне становлення реверс інжинірингу як окремого напрямку інженерної діяльності починається з кінця 90-х початку 2000-х років. Цьому сприяли значні успіхи в суміжних областях, що вплинули з одного боку на нове ставлення до життєвого циклу виробу, а з іншого, що дали можливість швидкого отримання більш якісної цифрової моделі об'єкта.

Найбільший вплив на підвищений інтерес до цієї технології надали кілька напрямків.

По-перше, розвиток CALS технологій на виробництві та зміна підходу до життєвого циклу, спрямованого на продовження терміну експлуатації виробів. У класичному варіанті експлуатація, як етап життєвого циклу деталі, припиняється після досягнення максимального допустимого зносу або пошкодження, що призводить до припинення роботи всього механізму. Для продовження життєвого циклу таких деталей доцільно використовувати різні технології їхнього оновлення (рис. 1). Ці технології принципово відрізняються від технологій виготовлення нової деталі, хоча кінцевим продуктом виробництва і в першому, і в другому випадку є та сама готова деталь зі своїми службовими функціями.



Рис. 1 – Життєвий цикл виробу, сучасний підхід

По-друге, виникнення та розвиток технологій та обладнання сканування 3-х мірних об'єктів: лазерних триангуляційних сканерів; сканерів, що працюють на технології структурованого світла; настільних і ручних сканерів та ін. Це дало можливість мінімізувати або навіть взагалі виключити суб'єктивний фактор при проведенні вимірювань, значно спростити та прискорити отримання інформації про геометрію об'єкта, зберегти цю інформацію в цифровому вигляді для подальшого використання та перетворення (наприклад, хмари точок, отриманого в результаті сканування, в 3-х вимірні вирівнювання, побудови триангуляцією полігональної сітки) і, зрештою, отримання CAD поверхні (NURBS).

По-третє, розширення можливостей обчислювальної техніки та програмного забезпечення. Це відноситься до процесу створення та дослідження 3Д моделей, розвитку промислових системи твердотілого та параметричного моделювання. Твердотілі моделі

починають використовувати не тільки для креслень, але і як єдине джерело даних (“digital master”) тріумвірату CAD/CAM/CAE. Велику роль у становленні сучасного підходу до реверс інжинірингу також відіграв бурхливий розвиток штучного інтелекту та нейронних мереж у питаннях обробки великих обсягів інформації (“big data”), як при аналізі одержуваних моделей, так і в управлінні та прогнозуванні виробничих процесів.

По-четверте, еволюційний розвиток субтрактивних технологій на базі багатофункціонального автоматизованого обладнання та бурхливий розвиток адитивного виробництва дозволили не тільки відновлювати деталі за класичною схемою, а й формувати зміни в конструкції на підставі аналізу зносу та пошкоджень деталі, які орієнтовані на застосування нових матеріалів та технології виробництва.

Така взаємодія різних наукових напрямів потребує нового підходу до процесу проектування та виробництва виробу в порівнянні з традиційним конструюванням та відкриває нові напрямки використання технології реверс інжинірингу не тільки в машинобудуванні (рис.2).

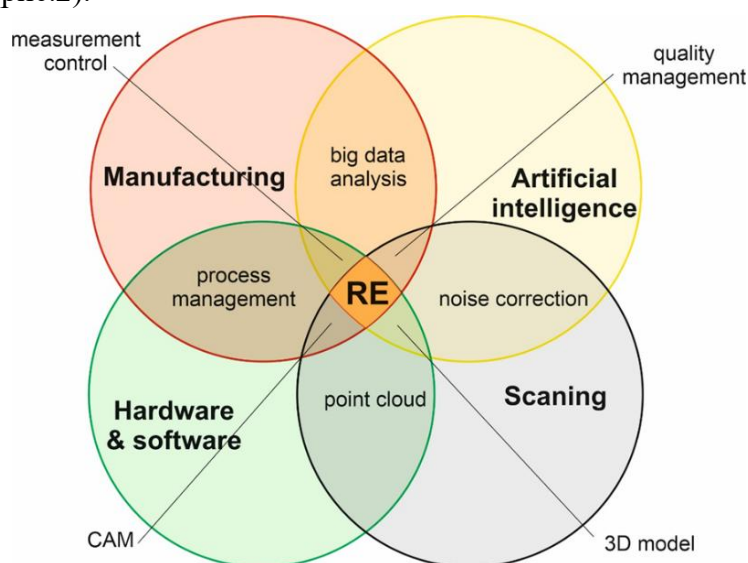


Рис. 2 – Схема синергії компонентів реверс інжинірингу

На підставі синергії розглянутих компонентів, відкриваються нові широкі можливості використання технології реверс інжинірингу при створенні цифрових двійників та архівів 3Д моделей складних та унікальних конструкцій, формуванні прототипів, кастомізації індивідуальних виробів (в основному в медицині), виконанні зворотного контролю якості виробів від постачальників та власного виробництва, тощо.

Список посилань

1. Bradley, K., Persson, O.: Community repair in the circular economy – fixing more than stuff. Local Environment, 27(10–11), 1321–1337 (2022). <https://doi.org/10.1080/13549839.2022.2041580>
2. Пермяков О.А., Яковенко І.Е., Калініченко В.А., Скиба О.С., Южкович П. Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 91–99. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2\(8\).10](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2(8).10).
3. Яковенко І.Е., Пермяков О.А., Перспективи розвитку реверсивного інжинірингу в машинобудівній галузі. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», № 1(11). 2025. С. 89-97. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1\(11\).11](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1(11).11).
4. Яковенко І.Е. Моделювання процесу проектування системи базування портативних верстатів / І.Е. Яковенко, О.А Пермяков // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС –2024): матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – Т. 1. – с.38-39.

УДК 621.791.92

Лавріненко В.І., докт. техн. наук, професор

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, lavrinen52@gmail.com

Солод В.Ю., канд. техн. наук, доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, v_solod@ukr.net

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ЗАСТОСУВАННІ «СКРИНЬОК РІЗНОГО КОЛЬОРУ» ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Актуальним питанням залишається напрямок підвищення точності прогнозування зносу різального інструменту та збільшення його адекватності. Нас, в даному випадку зацікавили основні напрямки досліджень, якими опікуються сучасні дослідники, які є у наукових публікаціях за 2025–2026 р.р.

Титанові сплави широко застосовуються у аерокосмічній, медичній і автомобільній промисловості завдяки своїй високій міцності і корозійній стійкості. Але обробка титана спряжена із значними труднощами, що включають високі механічні навантаження, надмірне тепловиділення і, відтак, підвищений знос інструмента [1]. Традиційні методи моніторингу для прогнозування зносу інструмента, такі як періодичні перевірки і простий аналіз порогових значень, часто неефективні і трудоємні. Штучний інтелект став потужним інструментом для виявлення складних моделей зносу, що дозволяє точно прогнозувати термін служби інструмента і оптимальний час його заміни. Але моделі штучного інтелекту часто застосовуються як моделі «чорної скриньки» і, відтак, не мають інтерпретованості. На відміну від них, моделі «білої скриньки», основані тільки на фізичних принципах, часто не здатні уловити складну динаміку зносу. Моделі «сірої скриньки» сполучають обидва підходи, інтегруючи знання предметної області з алгоритмами машинного навчання для підвищення точності і надійності прогнозування [1]. Особлива перевага даного дослідження полягає в тому, що набір даних охоплює повну криву зносу, включаючи фазу прогресуючого зносу, а не тільки до зазвичай застосованої граничної межі зносу в 0,3 мм. Це дозволяє навчати і оцінювати модель на всіх стадіях зносу інструмента. Але її не можна порівнювати із іншими сучасними підходами до прогнозування зносу інструмента, оскільки зазвичай не визначається уся крива даних [1].

В дослідженні [2] представлений інший інноваційний підхід, що сполучає чисельне моделювання з експериментальними даними для підвищення точності прогнозування зносу інструмента. Застосовується гібридна стратегія моделювання, що інтегрує фізично обґрунтований метод скінченних елементів з методами машинного навчання, основаними на даних. Були проведені експерименти по визначенню ресурсу інструмента при токарній обробці, і розроблена залежна від стану зносу інструмента модель скінчених елементів, а також модель регресії екстремального градієнтного посилення на основі акустичної емісії. Сили різання, розраховані за допомогою моделі скінченних елементів, були інтегровані в модель машинного навчання для підвищення точності прогнозування. Результати свідчать [2], що включення даних моделювання процесу значно поліпшує можливості і точність прогнозування зносу у порівнянні з моделями, основаними виключно на даних. Це демонструє потенціал гібридних підходів до моделювання, так званих «сірих скриньок», для подолання розриву між розумінням фізичного процесу і прогнозами машинного навчання, мінімізуючи необхідність збору великих об'ємів експериментальних даних.

PVD-покриття з високою зносостійкістю зазвичай застосовуються для захисту різальних інструментів від зносу при високих термомеханічних навантаженнях в процесі різання. В дослідженні [3] вивчався вплив двох вмістів кобальту у WC/Co твердосплавних підкладках і товщини міжшарового шару в системі покриття TiAlCrN на знос інструмента і термомеханічне навантаження. Встановлено, що товщина міжшарового простору PVD-покриттів спричиняє лише незначний вплив на знос інструмента в експериментах по

різанню. Більш високий вміст кобальту в твердосплавних інструментах призводить до більшого зносу інструмента. Моделювання показує, що напруження в інструменті є вищими із збільшенням вмісту кобальту. Вміст кобальту впливає на опір пластичній деформації. Результати моделювання узгоджуються з результатами експериментів по токарній обробці і будуть застосовані у подальших дослідженнях у якості моделі «білої скриньки» (моделювання методом скінченних елементів) і у рамках підходу «сірої скриньки» (модель, що сполучає моделювання методом скінченних елементів і метод машинного навчання на основі даних).

PVD-покриття розглядалося і в статті [4]. Однак точне прогнозування терміну служби інструмента залишається складною задачею, оскільки тонкі шари потребують дуже дрібної сітки, механізми зносу покриття є складними, а межа поділу покриття-підкладка створює складні теплові і механічні граничні умови. Традиційні моделі «білої скриньки» часто нехтують ефектами покриття через спрощені припущення, в той час як моделі «чорної скриньки» відображають складність, але не мають фізичної інтерпретованості. Підходи «сірої скриньки» пропонують багатообіцяючий компроміс, але потребують докладних даних, що залежать від покриття та навантаження. В цьому дослідженні розроблена скінченно-елементна модель для прогнозування термомеханічного навантаження в процесі обробки твердосплавних інструментів з PVD-покриттям. Модель «білої скриньки» підтримує великі експериментальні випробування, зазвичай необхідні для створення таблиць термомеханічних навантажень для прогнозування терміну служби інструмента за допомогою моделі «сірої скриньки». Багатошарове покриття TiAlCrSiN і двошарове покриття TiAlCrSiN/TiAlCrSiON – комерційно доступні і репрезентативні для промислового застосування у якості теплозахисного шару – були протестовані при ортогональній різці сталі C45+N. Сили різання і температура інструмента вимірювалися за допомогою динамометра і вбудованого двокольорового пірометра для перевірки моделі. Модель відтворює сили і температури з відхиленнями менше 10 % і показує, що знос інструмента сильно впливає на локальний розподіл термомеханічного навантаження, в той час як глобальні навантаження залишаються схожими для обох покриттів. Характеристика тертя виявляє трибологічну перевагу двошарового покриття, яка полягала у зниженні тертя на межі поділу і більш гладеньких поверхнях. Високоточні поля напружень і температур корелюються з властивостями покриття для поліпшення моделювання зносу і надання структурованих вхідних даних для подальшої розробки моделей типу «сіра скринька».

Тобто, основні сучасні напрацювання по підвищенню точності прогнозування зносу різального інструменту переважно полягають у гібридних підходах до моделювання у вигляді так званих «сірих скриньок».

Список посилань

1. Tool wear prediction for coated cutting inserts during milling of Ti-6Al-4V using a grey box model / Laura Zinnel, Moritz Goeldner, Daniel Piendl, Yair Shneor, Michael F. Zaeh. *Wear*. Volumes 584–585, 15 January 2026, 206352.
2. A novel grey-box approach to tool wear prediction using machine learning and finite element methods / Maximilian Berndt, Hagen Schmidt, Lars Müller, Eberhard Kerscher, Jörg Seewig, Benjamin Kirsch. *Wear*. Volumes 582–583, 15 November 2025, 206330.
3. Influence of the interlayer and the substrate on the wear behavior of PVD tool coatings during turning of C60+N / Benjamin Bergmann, Berend Denkena, Nico Junge, Christian Kalscheuer, Kirsten Bobzin, Xiaoyang Liu. *Wear*. Volumes 584–585, 15 January 2026, 206396.
4. Development of a white-box model for predicting in-process thermo-mechanical loading on PVD-coated carbide tools / T. Bergs, M. Meurer, M. Abouridouane, K. Bobzin, C. Kalscheuer, M. Tayyab. *Wear*. Volume 586, 1 February 2026, 206458

УДК 621. 9.025.7

Клименко С.А., чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, професор

Манохін А.С., канд. техн. наук, ст. дослідник

Копейкіна М.Ю., канд. техн. наук, ст. наук. співробітник

Клименко С.Ан., канд. техн. наук, ст. дослідник

Мельничук Ю.О., канд. техн. наук, ст. наук. співробітник

Чумак А.О., канд. техн. наук

Найденко А.Г., канд. техн. наук

Пошванюк В.А., аспірант

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, atmu@meta.ua

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЛЕЗА ІНСТРУМЕНТА З РсBN НА ЕТАПІ ВРІЗАННЯ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ

У зв'язку з широким використанням у промисловості сучасних конструкційних сталей і сплавів з високими механічними властивостями існує стала тенденція поширення застосування різальних інструментів, оснащених композитами на основі кубічного нітриду бору (РсBN). Такий інструмент дозволяє задовольнити зростаючі вимоги до якості й точності деталей при одночасному підвищенні продуктивності їх обробки, при цьому фрези із різальною частиною з РсBN є другим за вживаністю типом інструменту після різців із полікристалічними різальними елементами.

У цій праці наведені результати моделювання напружено-деформованого стану різального леза однозубої торцевої фрези, оснащеної РсBN «борсиніт», на етапі врізання у процесі обробки сталі AISI52100 (53 HRC). При моделюванні методом кінцевих елементів була використана модель Джонсона-Кука [1], що описує зв'язок між деформаціями і напруженнями в оброблюваному матеріалі.

При вирішенні зв'язаного термомеханічного завдання у 2D постановці граничні умови склалися в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки і переміщенні пружної моделі інструменту, модель фрези при цьому обертається навколо осі X , забезпечуючи швидкість різання, а товщина зрізу змінюється при врізанні зуба фрези від 0 до $a_{\max}$.

Чисельний експеримент виконувався відповідно з реплікою плану типу 3^{k-p} , що дозволяє отримати нелінійну залежність другого порядку для поверхні відгуку досліджуваного параметру. При врізанні інструменту в оброблюваний матеріал відбувається ковзання леза на певному куті $\psi_{\text{ск}}$ до тої пори, поки пластичні деформації не перейдуть безпосередньо від мікрорізання до різання, тобто коли товщина зрізу не досягне певного значення глибини a , відносно проникнення лезу інструменту з радіусом заокруглення різальної кромки r . Вказана особливість реалізована за рахунок поступового наростання глибини різання при русі леза за дугової траєкторії.

На рис. 1 зображені етапи занурення різця в оброблюваний матеріал на прикладі інструменту з $r = 50$ мкм. Аналіз розподілу напружень у зоні контактування демонструє, що максимальні їх значення на початковому етапі різання знаходяться на задній поверхні різця на ділянці біля вершини. Отримані результати показують, що для умов обробки інструментом з $r = 50$ мкм довжина l_p відрізка пластичного деформування оброблюваного матеріалу до початку мікрорізання складає 0,22 мм, для обробки інструментом з $r = 10$ мкм – $l_p = 0,13$ мм. Ступінь деформації після початку різання у поверхневому шарі заготовки становить 6,7–7,0 та 2,9–3,2 для інструментів з $r = 50$ та 10 мкм, а напруження в зоні зсуву суттєво більші для меншого радіусу – 1850–1970 МПа та 1600–1800 МПа відповідно.

При розрахунках еквівалентних напружень, що формуються в інструменті, використано вираз, запропонований Г.С. Писаренком та А.О. Лебедевим.

За результатами реалізації факторного експерименту типу 3^{k-p} отримані результати, що дозволяють встановити розмір еквівалентних напружень в інструменті залежно від

коефіцієнту тертя, радіусу заокруглення різальної кромки та швидкості різання, яка впливає на контактні навантаження опосередковано через зміну механічних властивостей оброблюваного матеріалу (рис. 2).

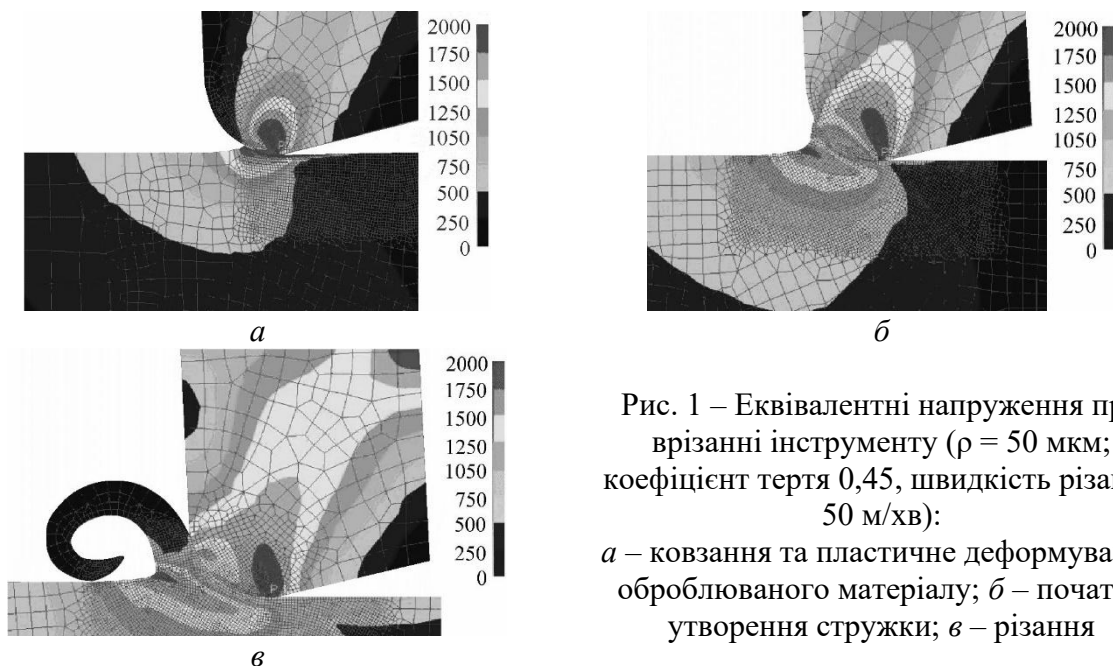


Рис. 1 – Еквівалентні напруження при
врізанні інструменту ($\rho = 50$ мкм;
коефіцієнт тертя 0,45, швидкість різання
50 м/хв):

a – ковзання та пластичне деформування
оброблюваного матеріалу; *б* – початок
утворення стружки; *в* – різання

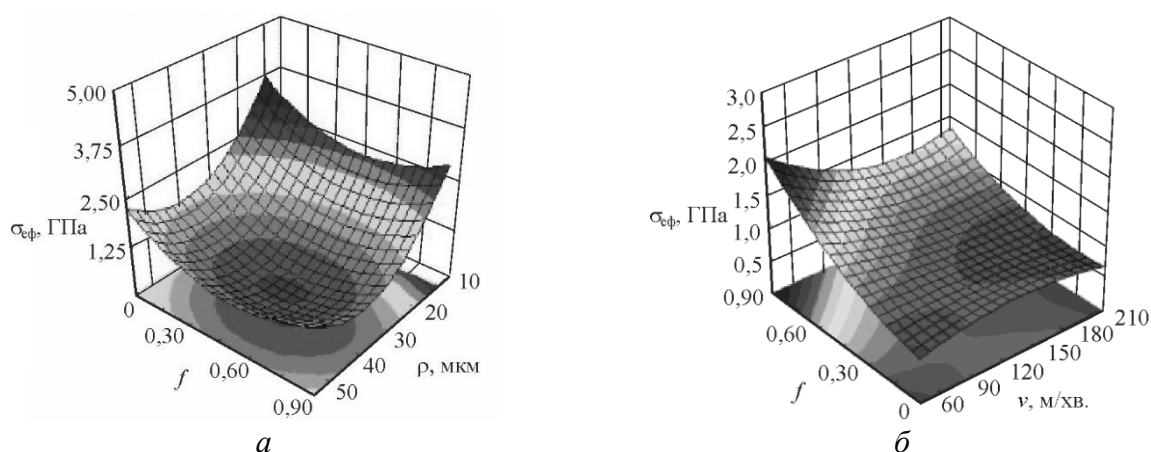


Рис. 2 – Залежності максимальних еквівалентних напружень в небезпечній точці
інструменту від радіусу заокруглення та коефіцієнту тертя $v = 125$ м/хв. (*a*) та від
швидкості різання і коефіцієнту тертя $\rho = 40$ мкм (*б*)

Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану леза інструменту показав, що за умов, коли обробка виконується товщиною зрізу – що досягає максимального значення – еквівалентні напруження в небезпечній зоні розташовані з боку передньої поверхні інструменту, на відміну від випадку обробки в умовах ковзання інструмента та пластичного деформування оброблюваного матеріалу.

Величина еквівалентних напружень в небезпечній зоні у першому випадку складає 725 МПа, що менше за критерій руйнування (границя міцності під час розтягування $R_m = 800$ МПа) і свідчить про можливість фрезерування загартованої сталі інструментом, оснащеним РсВН «борсиніт».

Список посилань

1. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний посібник / Д.В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач. – Суми : Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.

УДК 621.01

Четербух О. Ю., докт. філософії

Шахбазов Я. О., докт. техн. наук, професор

Національний університет «Львівська політехніка», ostap.uad@gmail.com

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ КОНСТРУКЦІЇ ПЛОСКОГО ШТАНЦЮВАЛЬНОГО ПРЕСА НА ЙОГО КІНЕТОСТАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ

Продукція, не залежно від конкретного галузевого ринку, на якому вона реалізується, потребує пакування, яке забезпечує наступні вимоги: збереження зазначеної кількості та якості продукції; захист від впливу як навколишнього середовища, так і від іншої продукції; захист від можливих механічних пошкоджень; безпечне і зручне зберігання та транспортування; приваблення потенційних споживачів.

Як стверджується в роботі [1], найпопулярнішим матеріалом для виготовлення як споживчого, так і промислового пакування є папір і картон, частка яких від загального обсягу пакування становить від 35 до 60 %, залежно від конкретної країни.

Раціональний вибір геометричних розмірів елементів конструкції плоского штанцювального преса, на якому виконується технологічна операція формування контуру та конфігурації розгортки картонних пакувань, впливає не тільки на мінімальні габаритні розміри самого преса, а й на кінетостатичні параметри його роботи.

Оскільки в плоских штанцювальних пресах продуктивність роботи доволі висока (до 8000 примірників/год. [2]), а рухомі виконавчі елементи конструкції переміщуються із значними швидкостями, то можна стверджувати про необхідність зосередження особливої уваги щодо дослідження їхніх енергосилових параметрів під час розроблення нового або удосконалення наявного штанцювального устаткування. Принципово важливим дане питання постає щодо: рухомої натискної плити, яка виконує штанцювання картонних заготовок, що володіє значною масою та здійснює зворотно-поступальне переміщення на великих швидкостях; механізму привода натискної плити, який здійснює переміщення натискної плити, та забезпечує необхідне технологічне навантаження.

Виконання дослідження впливу зміни геометричних розмірів елементів конструкції плоского штанцювального преса, зокрема механізму привода натискної плити, на його кінетостатичні параметри дозволяють обрати, окрім оптимальних геометричних розмірів конструкції, які будуть задовольняти умовам матеріалоемності та компактності самого устаткування, ще й здійснювати аналіз результатів подальших досліджень, наприклад, кінетостатичних параметрів, споживаної потужності тощо.

Здійснюючи відповідні дослідження, звісно, необхідно враховувати всі технологічні та конструкційні параметри плоского штанцювального преса, зокрема: забезпечення оптимальної величини переміщення (величини ходу) натискної плити, що обумовлена технологічними особливостями даного устаткування; забезпечення відповідної продуктивності роботи.

Варто зазначити, що виконання вище озвучених аналітичних досліджень для кожного нового або удосконаленого плоского штанцювального преса передбачає необхідність розроблення індивідуальних методик розрахунку геометричних розмірів конструкції. Це, звісно, зумовлено тим, що преси містять оригінальні механізми привода натискної плити, які суттєво відрізняються один від одного.

Список посилань

1. Кривошей В.М. Упаковка в нашому житті. Київ: ІАЦ «Упаковка», 2001. 160 с.
2. Регей І.І. Споживче картонне пакування (матеріали, проектування, обладнання для виготовлення): навч. посіб. – Львів: Укр. академ. друкарства, 2011. 144 с.

УДК 621.01

Четербух О. Ю., докт. філософії

Шахбазов Я. О., докт. техн. наук, професор

Національний університет «Львівська політехніка», ostap.uad@gmail.com

ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ПЛОСКИХ ШТАНЦЮВАЛЬНИХ ПРЕСАХ

Процес виготовлення як споживчого, так і промислового картонного пакування передбачає виконання різноманітних технологічних операцій, починаючи від формування заготовок, закінчуючи декоративними та оздоблювальними роботами. За ступенем важливості їх можна поділити на: 1) основні, результатом яких є надання пакуванню потрібних властивостей, конфігурації, форми; 2) додаткові, які використовують з метою оздоблення пакування; 3) допоміжні, що призначені для підготовки напівфабрикату до виконання основних і додаткових операцій. [1]

Найважливішою технологічною операцією є формування контуру розгортки картонних пакувань, яка, здебільшого, виконується на плоских штанцювальних пресах.

Робота плоских штанцювальних пресів характеризується значними технологічними навантаженнями, що можуть досягати десятки та сотні тон, які виникають під час здійснення операції штанцювання картонних заготовок. Це спричинено тим, що всі різальні інструменти, які зафіксовані на плоскій штанцювальній формі, одночасно та по всій своїй довжині різальної кромки контактують із картонною заготовкою. Величина зусиль, які виникають під час штанцювання, залежать від наступних чинників: загальної довжини різальних інструментів; властивостей матеріалу картону; характеру розташування різальних інструментів відносно напрямку волокон картону; величини затуплення різальних інструментів; технічної справності штанцювального устаткування; точності та якості налагодження штанцювальної форми відносно натискної плити.

Для зменшення технологічних навантажень, які виникають під час штанцювання картонних заготовок, необхідно враховувати рекомендації досліджень [2]:

1) використовувати різальні інструменти, які закріплені на штанцювальній формі, потрібно в межах їхньої тиражостійкості, оскільки експериментальні дослідження продемонстрували, що зусилля, які виникають під час виконання штанцювання картонних заготовок, збільшуються, в середньому, на 25-30% при застосуванні затуплених різальних інструментів;

2) за можливості, картонні заготовки розміщувати на натискній плиті таким чином, щоб волокна картону були спрямовані перпендикулярно до переважної кількості різальних інструментів, які закріплені на штанцювальній формі;

3) налагодження висікальних лінійок, які недовисікають картонні заготовки, виконувати за рахунок збільшення їх висоти, а не шляхом збільшення загального технологічного натиску плити;

4) під час проектування картонного пакування, за можливості, бігувальні лінійки замінювати на перфораційні;

5) під час проектування штанцювальної форми необхідно враховувати допустимі технологічні навантаження плоского штанцювального преса, оскільки їхнє перевищення буде супроводжуватися пришвидшеним спрацюванням як різальних інструментів, так і самого преса.

Список посилань

1. Регей І.І. Споживче картонне пакування (матеріали, проектування, обладнання для виготовлення): навч. посіб. – Львів: Укр. академ. друкарства, 2011. 144 с.

2. Банах Ю.О. Технологічні навантаження в процесі штанцювання і шляхи їх зменшення. *Поліграфія і видавнича справа*. 1997. № 32. С. 67 – 70.

УДК 621.923

Майборода В. С., докт. техн. наук, професор

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, maiborodavs@gmail.com

Налімов Ю. С., канд. техн. наук, с.н.с.

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ

ВПЛИВ КОМПЛЕКСНОЇ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ НА СТАН ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ І ОПІР УТОМІ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ ЕП 962

В попередніх дослідженнях було показано, що стан поверхні виробів, а саме градієнт зміни твердості, характер розподілення залишкових напружень в поверхневому шарі суттєво впливають на експлуатаційні властивості як різального інструменту [1], так і таких відповідальних деталей, як лопатки газотурбінних двигунів [2, 3]. Встановлено, що раціональне застосування методів поверхневого зміцнення подібних виробів дозволяє позитивно впливати як на їх зносостійкість, так і на характеристики міцності, а саме опір утомі. Дослідження поверхонь зламів деталей після випробувань на опір утомі показали, що зародження тріщин, які виникають при знакозмінному багато цикловому навантаженні відбувається не тільки на поверхні, а і в при поверхневому шарі на певній глибині [4]. Саме тому цілеспрямоване керування властивостями поверхневого шару шляхом застосування технологій комбінованого оброблення є актуальним.

В попередніх дослідженнях наведено позитивні результати комбінування методів магнітно-абразивного оброблення (МАО) і хіміко-термічної обробки, МАО і нанесення PVD покриттів з подальшою МАО, комбінування двох стадійного оброблення методом МАО порошковим матеріалами з різними розмірами частинок і різною формою. Тому **метою роботи** було дослідження впливу комплексної двох стадійної МАО зразків корсетного типу з круглим поперечним перерізом на зміну твердості поверхневих шарів і опір утомі.

МАО виконували в два етапи. На першому етапі з метою зниження шорсткості робочих поверхонь зразків з одночасним зміцненням поверхневого шару обробку виконували на верстаті типу кільцева ванна [3] оскольчастим порошком Феромап з розміром частинок 315/200 мкм протягом 4 хв. при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 300 об/хв. і навколо власної осі зразків 700 об/хв. В результаті такої обробки шорсткість поверхні знизилась з Ra 1,5 мкм до Ra 0,15 мкм. На другому етапі МАО виконували при аналогічних технологічних умовах округлим порошком ДЧ з розміром частинок 1400/1000 мкм. При цьому шорсткість поверхні дещо збільшилась до Ra 0,29 мкм. Випробування на опір утомі виконували за умов створення в робочій частині зразків напружень на рівні $\sigma_a = 500$ МПа. В разі відсутності руйнування зразків рівень напружень збільшували на 20 і 50 МПа. Встановлено, що після МАО тільки порошком 315/200 мкм руйнування відбулося після 1,77 млн. циклів навантаження. МАО порошком 1400/1000 мкм показало, що при рівні напружень $\sigma_a = 500$ МПа руйнування не відбулося після 10,15 млн. циклів навантаження. Збільшення рівня напружень при іспитах до $\sigma_a = 520$ МПа призвело до руйнування зразків ще після 1,1 млн. циклів навантаження. МАО зразків виконаних в два етапи – порошком з розміром частинок 315/200 мкм і в подальшому порошком 1400/1000 мкм показала, при видобуваннях при $\sigma_a = 500$ МПа руйнування не відбулося після 10 млн. циклів навантаження, а збільшення рівня напружень до $\sigma_a = 550$ МПа призвело до руйнування зразків ще після 1,97 млн. циклів навантаження.

Пояснення отриманих результатів може бути пов'язано з зміною характеристик поверхневого шару зразків після різних етапів МАО. Поверхню зразків після кожного етапу МАО окремо і після комплексної обробки аналізували за результатами зміни мікротвердості за глибиною їх поверхневого шару. Мікротвердість вимірювали на косих

шліфах вирізаних із робочої частини зразків під кутом 5° щодо до осі зразка після випробувань на втому. Результати вимірювання мікротвердості наведено на рис. 1.

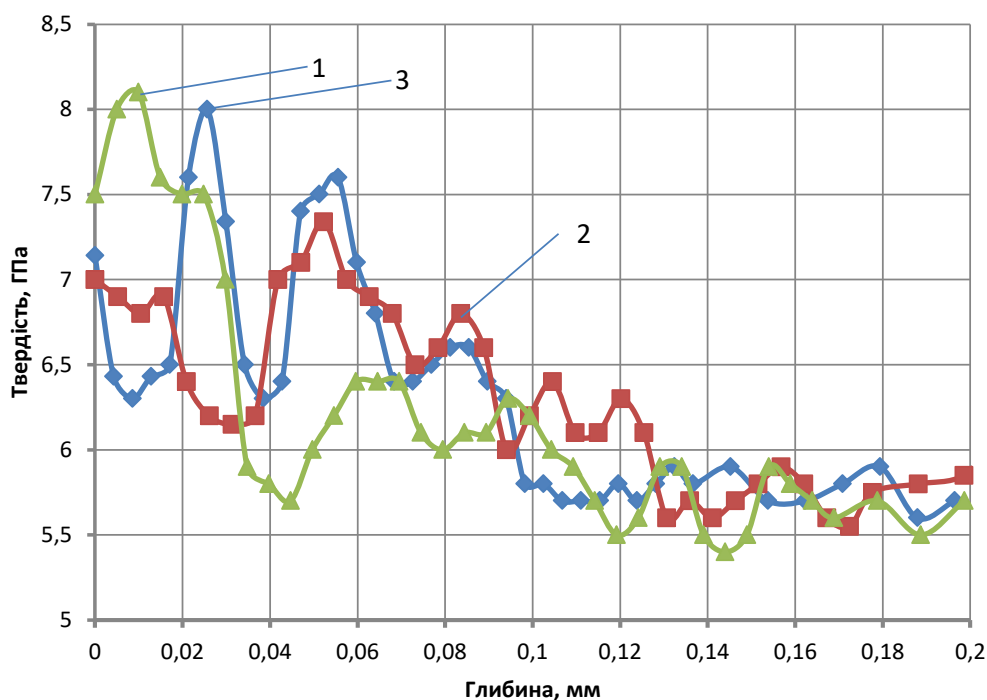


Рис. 1 – Зміна твердості залежно від глибини поверхневого шару робочої частини зразків після MAO порошком 315/200 мкм – 1, порошком 1400/1000 мкм – 2 і комплексної двох етапної MAO порошками 315/200 і 1400/1000 мкм – 3

Встановлено, що після MAO порошком з розміром частинок 315/200 мкм має місце зростання твердості поверхневого шару до 8 ГПа на глибині 0,01 мм при твердості серцевини зразків 5,5-6 ГПа, а при обробленні округлим порошком 1400/1000 мкм пік твердості на рівні 7,5 ГПа розташований на глибині 0,05 мм. Залежність зміни твердості після комплексної двох етапної MAO має дві зони з підвищеною твердістю – на глибині 0,03 мм і на глибині 0,05 мм. Наявність двох сплесків твердості в поверхневому шарі відіграє певну роль в процесах зародження і розповсюдження тріщини втомі. Перша зона з підвищеною твердістю зменшує вірогідність її зародження, а друга зона на глибині 0,05 мм гальмує її розповсюдження. Зазначене припущення в певній мірі може бути поясненням більш високого опору втомі зразків після комплексної двох етапної обробки, але потребує проведення додаткових досліджень і ретельної перевірки з використанням сучасних фізичних методів.

Список посилань

1. Бобіна М.М. Структура та властивості поверхневого шару інструменту з сталі Р6М5 після магнітно-абразивної обробки / М.М. Бобіна, В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко, А.Б. Бобін // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т.3, №4. – С. 577 – 580.
2. Nalimov Y.S. Effect of Combined Ion-Plasma Thermocyclic Nitriding and Magnetic Abrasive Treatment on the Fatigue Resistance of the EK61 Alloy.//Y.S. Nalimov, V.S.Maiboroda, A.V. Rutkovskiy, M.M.Teslyuk // Strength of Materials, 2023, p. 1-8.
3. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – К., 2001. – 404 с.
4. Maiboroda V.S. Effect of complex magnetic-abrasive and chemical/thermal treatment on VT9 alloy fatigue resistance/ V.S.Maiboroda, Yu. S. Nalimov, A.N. Solovar, M. N. Bobina, M.M.Teslyuk// Strength of Materials, Vol. 48, No. 5, September, 2016, P.704-712.

УДК 621.924 : 62-253.51

Гребенніков М.О., аспірант

Національний університет «Запорізька політехніка», mg.asp.2023@gmail.com

АТ «Івченко-прогрес», GrebennikovMA@ivchenko-progress.com

Гончар Н.В., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Запорізька політехніка», gonchar@zpu.edu.ua

ОБҐРУНТУВАННЯ УНІФІКАЦІЇ ЧАСУ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ГТД З РІЗНИМ ВИХІДНИМ МІКРОРЕЛЬЄФОМ

У даній роботі досліджується феномен конвергенції параметрів шорсткості (R_a , R_z) лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) з жароміцного сплаву, що мають різну технологічну передісторію (профіль лопаток сформовано фрезеруванням кінцевими фрезами $\varnothing 3,2$ мм та $\varnothing 12$ мм), при віброабразивній обробці. На підставі експериментальних даних та аналізу існуючих математичних моделей обґрунтовується необхідність встановлення єдиного часового інтервалу обробки для досягнення «межі шорсткості» та формування однорідної опорної поверхні, незалежно від вихідного стану та способу фіксації заготовок.

Вступ. Фінішна обробка пера лопаток ГТД є критичним етапом, що визначає аеродинамічний ККД та втомну довговічність двигуна. Одним із завдань сучасного авіабудування є створення відтворюваних технологічних процесів особливо відповідальних деталей, таких як лопатки авіаційного двигуна, що можуть забезпечити задану якість поверхні ($R_a \leq 0,2$ мкм) при збереженні жорстких геометричних допусків аеродинамічних профілів. Віброабразивне полірування є фінішною обробкою, що дає прогнозований результат при варіативності вихідних параметрів процесу, таких як наповнювач, тривалість обробки і амплітуда коливань. Особливий інтерес становить використання високоефективного наповнювача RMB/D1, який належить до категорії швидкорізальних керамічних середовищ [1]. Незважаючи на значні відмінності у вихідній шорсткості після фрезерування інструментами різного діаметра, практика показує необхідність уніфікації часу обробки до 8 годин, що потребує теоретичного обґрунтування.

Аналіз сучасних теорій вібраційної обробки. Процес формування поверхні при віброабразивному впливі традиційно описується як «чорний ящик» через стохастичний характер взаємодії тіл [2]. Однак ряд фундаментальних досліджень дозволяє систематизувати цей процес.

Правила Хашимото [3]. Згідно з першою теорією, шорсткість поверхні знижується експоненційно до досягнення постійного значення, яке називається «межею шорсткості», що є інваріантним для конкретної комбінації «матеріал-наповнювач». Друге правило стверджує – чим вища різниця між вихідною шорсткістю поверхні та межею шорсткості, тим вища швидкість знімання матеріалу на початковому етапі.

Теорія «Тетраедра взаємозалежності» [4]. Якість поверхні визначається взаємодією чотирьох факторів: обладнання, наповнювача, деталі та технологічної рідини. Середовище RMB/D1, маючи високу щільність та різальну здатність, виступає домінуючим фактором, що нівелює вплив вихідного мікрорельєфу.

Механізм зношування за Арчардом [5]. Обсяг матеріалу, що видаляється, прямо пропорційний нормальній силі та шляху тертя. У закріпленому стані нормальні сили різання, враховуючи масу наповнювача, вищі, що прискорює досягнення межі шорсткості, але підвищує ризик виникнення браку за геометрією.

Експериментальні дані та обговорення. У ході випробувань порівнювалися лопатки, які були оброблені в установках R220 у вільному стані (без закріплення) та FBA 24 з закріпленням по хвостовій частині у спеціальному пристосуванні, з використанням наповнювача RMB/D1 в обох випадках. Результати вимірювань показників шорсткості

представлено в таблиці 1. Графічна залежність цих показників від часу обробки показана на рис. 1.

Таблиця 1 – Зміна показників шорсткості Ra (мкм) після віброабразивної обробки

Спосіб обробки лопаток / Установка	Діаметр фрези, якою сформована поверхня, мм	№ дослідження	Вихідний стан профілю лопатки	Час обробки, годин				Зниження Ra (мкм)
				2	4	6	8	
з закріпленням / FBA 24	3,2	1	0,70	0,31	0,19	0,11	0,09	0,61
	12	2	0,39	0,27	0,25	0,16	0,10	0,29
у вільному стані / R220	3,2	3	0,77	0,40	0,26	0,19	0,13	0,64
	12	4	0,39	0,28	0,17	0,14	0,11	0,28

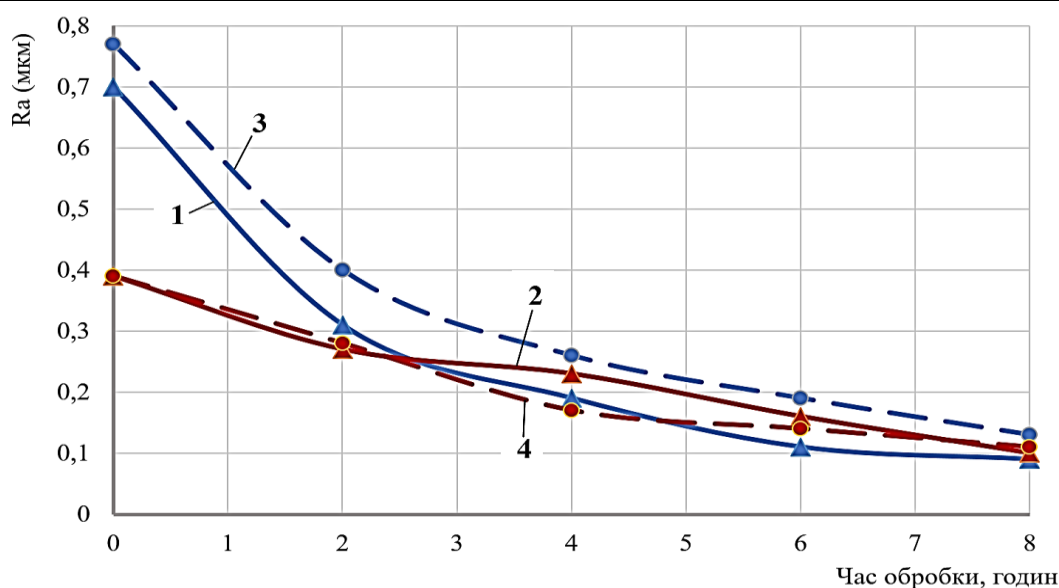


Рис. 1 – Графічна залежність показників шорсткості від часу обробки (цифрами вказані криві за номерами дослідження з Таблиці 1).

Аналіз конвергенції. Вихідна різниця в шорсткості між поверхнями після фрез $\varnothing 3,2$ мм та $\varnothing 12$ мм сягала 0,31...0,38 мкм (майже в 2 рази). Однак, до 8-ї години обробки ця різниця скорочується, до статистично незначущих 0,01...0,015 мкм. Це підтверджує друге правило Хашимото: поверхні з більш грубим рельєфом втрачають шорсткість значно швидше (0,61...0,64 мкм проти 0,28...0,29 мкм за весь цикл).

Обґрунтування 8-годинного циклу. Як видно з рис. 1, в інтервалі 6...8 годин крива шорсткості виходить на асимптотичне плато – межа становить близько 0,09...0,11 мкм. Припинення процесу на 4-й або 6-й годині не забезпечило б гарантованого запасу за якістю для поверхні після фрези діаметром 3,2 мм, де Ra на 6-й годині все ще може становити 0,19 мкм (на межі допуску 0,2).

Еволюція топографії (R_z/R_a). Аналіз коефіцієнта $K=R_z/R_a$ (табл. 2) показує його зростання в часі.

Таблиця 2 – Зміна співвідношення $K = R_z/R_a$ в часі (для обробки у вільному стані).

Діаметр фрези, якою сформована поверхня, мм	Час обробки, годин				
	Вихідний стан	2	4	6	8
3,2	6,77	7,28	6,73	8,16	8,54
12	4,56	5,93	7,41	8,79	9,72

Зростання коефіцієнта K з 4,5...6,7 до 8,5...9,7 свідчить про перехід від видалення піків поверхні після фрезерування до формування специфічного плато. Згідно з Ульманом [6], це вказує на завершення трансформації профілю – 8 годин це час, необхідний для «стирання технологічної пам'яті» матеріалу.

Висновки.

1. Експериментально доведено справедливість правил Хашимото для віброабразивного полірування з наповнювачем RMB/D1 – швидкість покращення поверхні прямо пропорційна початковій шорсткості, що веде до конвергенції результатів незалежно від діаметра фрези до 8-ї години обробки.

2. Час віброабразивної обробки 8 годин є раціональним для гарантованого досягнення межі шорсткості ($Ra \approx 0,1$ мкм) на ділянках з найбільш грубою поверхнею (фреза 3,2 мм) за умови використання обробки лопаток без закріплення.

Рекомендації для подальших досліджень. Впродовж досліджень впливу вібраційної обробки на якість бажано провести вивчення поверхневого наклепу, а саме впливу 8-годинної обробки на створення залишкових напружень стискання (віброзміцнення) та їх зв'язку з втомною міцністю лопаток.

Список посилань

1. Rosler Ceramic Tumbling Media [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.precisionfinishinginc.com/rosler-ceramic-media> (дата звернення: 31.03.2026).
2. State-of-the-Art on Vibratory Finishing in the Aviation Industry [Електронний ресурс] / DR-NTU. – Режим доступу : <https://dr.ntu.edu.sg/bitstreams/e0116e96-5d12-4a54-9139-b1aa6376c20a/download> (дата звернення: 31.03.2026).
3. Hashimoto F., DeBra D. B. Modelling and Optimization of Vibratory Finishing Process // CIRP Annals. – 1996. – Vol. 45. – P. 303–306.
4. Kittredge J. Understanding Vibratory Finishing Revisited // Products Finishing. – 1998. – Vol. 62. – P. 8.
5. J. F. Archard та W. Hirst, "The Wear of Metals under Unlubricated Conditions", Proceedings of the Royal Society A, Vol. 236, No. 1206, pp. 397–410, 1956
6. Uhlmann E., Dethlefs A., Eulitz A. Investigation into a geometry-based model for surface roughness prediction // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 75. – P. 815–823.

УДК 621.438

Уланов С. О., PhD, доцент

Качан О. Я., докт. техн. наук, професор

Національний університет «Запорізька політехніка», kachantad@gmail.com

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ ГТД ВІЛЬНИМ АБРАЗИВОМ

Основною тенденцією сучасного авіадвигунобудування є підвищення надійності й ресурсу деталей авіаційних газотурбінних двигунів у процесі їхнього виробництва із застосуванням прогресивних технологічних методів. Аналіз пошкоджень і руйнувань дисків, валів, лопаток авіаційних двигунів у процесі експлуатації показав, що основною їхньою причиною є зниження опору втомленості. Обідна частина дисків через наявність пазів «ластівкин хвіст», гострих кутів, міжпазових виступів, усіляких радіусних сполучень та кромок визначає високий рівень концентрації напружень.

Для підвищення продуктивності на фінішних операціях дисків компресора й зварених барабанів одержала поширення обробка в псевдозрідженому абразиві із застосуванням повітряних струменів. Встановлено, що обробка зварених барабанів псевдозрідженим абразивом із застосуванням повітряних струменів підвищує їх довговічність в 2,2 рази.

Мета роботи полягає у розробці моделі процесу обробки поверхонь кромок деталей у псевдозрідженому шарі абразиву із застосуванням повітряних струменів для визначення основних параметрів процесу обробки.

Експериментальні дослідження впливу схем обробки та технологічних умов проводилися на зразках – дисках з алюмінієвого сплаву Д1Т, а також на натурних деталях – типових представників дисків компресорів, виготовлених зі сплавів ВТЗ-1, ВТ9 та ЭИ698-ВД.

Дослідження проводилися на дослідно-промислових установках моделі АПС-600А. Застосовувалося стандартне шліфувальне зерно карбіду кремнію зеленого 63С й електрокорунду білого 24А різної зернистості, а також їх суміші. У процесі дослідження вихідними рівняннями були відомі залежності для динамічного тиску повітряних струменів, що натікають на перешкоду, а також зміна параметрів плоских струменів на шляху їхнього розширення від зрізу сопла до оброблюваної поверхні.

Відповідно до запропонованої моделі:

- обробка поверхні кромки деталі 1 виконувалась при впливі на абразивне середовище 2, яке перебуває в псевдозрідженому стані, повітряним струменем 3. При цьому вісь симетрії $O - O_1$ повітряного струменя 3 спрямована по бісектрисі кута грані кромки деталі 1 (рис. 1);
- при витіканні із сопла повітряний струмінь розширюється симетрично щодо осі;
- розподіл динамічного тиску нерівномірний з максимумом на осі й рівний нулю на границях поверхні кромки деталі.

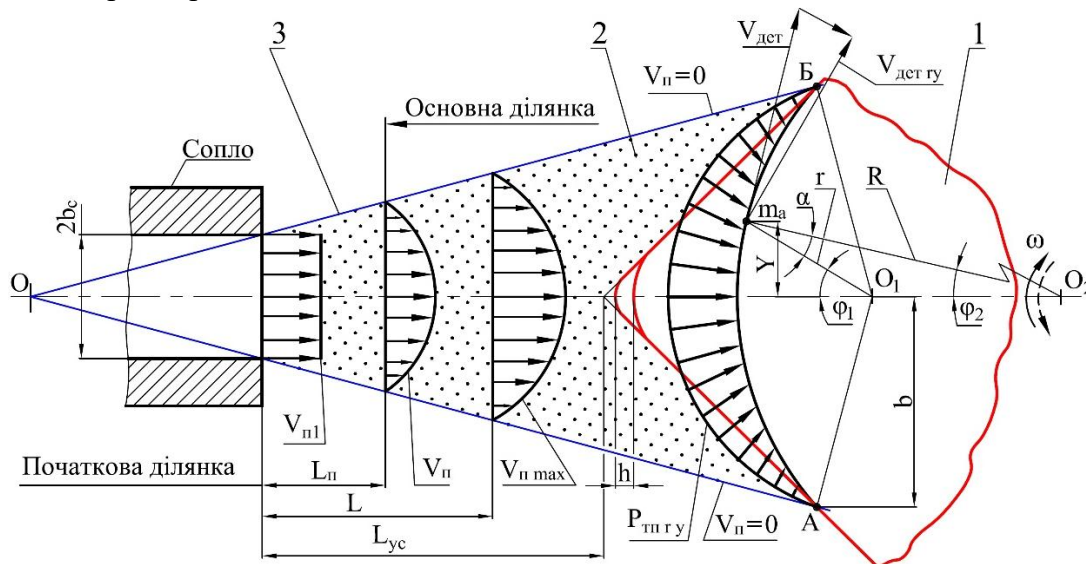


Рис. 1 – Модель процесу обробки кромки деталі вільним абразивом із застосуванням повітряного струменя

Динамічний тиск повітряного струменя в точках поверхні визначається як функція від густини повітря та квадрату швидкості струменя в заданій точці. Абразивна частка масою m_a буде робити обробку поверхні кромки в точці з координатою Y за умови, що тиск повітряного струменя перевищує граничний тиск мікрорізання.

Реалізація запропонованої схеми на практиці дозволила встановити такі технологічні особливості:

- обробка дисків у суміші 63С50 + 63С25 дозволила скоротити час їхньої обробки до 6...8 хвилин, тобто в 1,5 рази в порівнянні з обробкою монозерном;
- обробка диска з матеріалу ЭИ698-ВД у суміші із накладенням на деталь вібрацій із частотою 20-55 Гц й амплітудою 2...3 мм скоротило час обробки до 16 хвилин;
- одночасно з округленням кромки забезпечується полірування полотна до шорсткості 0,16...0,32 мкм на титанових дисках і 0,32 мкм на дисках із жароміцного сплаву. Знімання металу по полотну становить 0,01...0,04 мм;
- за результатами експериментальних випробувань дисків із титанового сплаву ВТЗ-1 сполучення збільшення радіуса викружки з наступною обробкою підвищує довговічність до появи тріщини в 6 разів, а живучість диска з тріщиною в 5,5 разів.

На основі проведених досліджень розроблено модель процесу обробки поверхонь кромки деталей вільним абразивом у псевдозрідженому стані із застосуванням повітряних струменів, що дозволило отримати основні закономірності для визначення параметрів процесу та встановити його ключові технологічні характеристики відповідно до запропонованої моделі.

Список посилань

1. Агишев Б. М., Елашов А. А., Моисеенко Н. В. Применение методов поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной прочности дисков компрессора авиационных ГТД. *Проблемы прочности*. 1977. № 3. С. 114–116.
2. Качан О. Я., Уланов С. О. Встановлення закономірностей обробки дисків в псевдозрідженому шарі абразиву. *Космічна наука і технологія*. 2023. Т. 29. № 6. С. 62-67. <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.062>
3. Качан О. Я., Уланов С. О. Підвищення довговічності зварних барабанів роторів компресорів обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2022. – № 1. – С. 53–57. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2022-1-7>
4. Качан О. Я., Уланов С. О. Модель процесу обробки кромки деталей авіакосмічної техніки вільним абразивом із застосуванням повітряних струменів. *Космічна наука і технологія*. 2024. Т. 30. № 5. С. 29–35. <https://doi.org/10.15407/knit2024.05.029>

УДК 621.438.4

Омельченко Ю.В., аспірант
Уланов С.О., PhD, доцент

Національний університет «Запорізька політехніка», yuomelch45@gmail.com

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ЛОПАТОК ГТД

Сучасні робочі лопатки є одними з найбільш високонавантажених деталей газотурбінних двигунів (ГТД). Вони функціонують у надзвичайно складних експлуатаційних умовах. Це високі температури та циклічні термомеханічні навантаження, які супроводжуються інтенсивною газовою корозією. Окрім цього, матеріал отримує значний вплив природніх абразивів (пісок, пил і т. д). Такі фактори впливу зумовлюють прискорену деградацію поверхневих шарів матеріалу. З'являється втомне руйнування деталі та ерозійний знос. Також часто можна спостерігати ефект кавітаційного пошкодження пера лопатки.

В сучасних умовах експлуатації повітряних суден, пріоритетним завданням є мінімізація експлуатаційних витрат та підвищення ресурсу експлуатації ГТД без радикальної зміни його конструкції та без заміни базових сплавів. Таку задачу можна вирішити шляхом збільшення показників втомної міцності та зносостійкості критичних деталей ГТД через використання технологічних методів зміцнюючої поверхневої обробки матеріалу цих деталей.

Метою даної роботи є систематичний аналіз ефективності окремих технологій поверхневого зміцнення та дослідження синергетичного ефекту, що виникає при їх комплексному застосуванні, для досягнення максимального приросту ресурсу авіаційних деталей.

Аналіз окремих методів зміцнення.

Сучасний арсенал методів фінішної обробки дозволяє цілеспрямовано впливати на фізико-механічні властивості поверхні.

На основі аналізу ефективності використання 13 найпоширеніших методів поверхневої зміцнювальної обробки було визначено найбільш практичні та економічно обґрунтовані:

1. Механічне зміцнення (LSP). Лазерно-ударна обробка (Laser Shock Peening) змінюється через дію мікровибухової плазмової хвилі, ініційованої лазерним імпульсом.

Зміцнений шар — від 1.0 до 1.2 мм. Це запобігає розвитку втомних мікротріщин, збільшує загальний ресурс деталі до 150% [2].

2. Гаряче ізостатичне пресування (HIP). Метод термічної обробки. При високих температурах відбувається об'ємне ущільнення матеріалу, що призводить до зростання ресурсу до 90% [5, 6].

3. Хіміко-термічна та іонно-плазмова обробка. Іонно-плазмове азотування дозволяє формувати на поверхні нітридні фази високої твердості (до 1200 HV), що підвищує ресурс на 50–80% [3]. Борування титанових сплавів підвищує ресурс 80–150% [4].

Для захисту від високотемпературної ерозії застосовуються PVD-покриття (TiN, AlTiN). Вони створюють хімічно інертний та зносостійкий бар'єрний шар [1].

Дослідження синергетичного ефекту комплексних методів.

Ключовим об'єктом дослідження був синергетичний ефект комплексного застосування вказаних технологій при переході від одиничного застосування. Такий підхід забезпечує кратно зростання експлуатаційних характеристик.

LSP + PVD + азотування. Дана трикомпонентна схема є найбільш результативною. Забезпечує рекордний приріст ресурсу на рівні 400–500%. Механізм синергії реалізується через створення багаторівневої зміцненої структури із захистом від ерозії.

LSP + азотування. Поєднання механічного наклепу та дифузійного насичення азотом дозволяє підвищити ресурс до 300%. Радикально підвищує опір втомному руйнуванню в умовах високочастотних вібрацій.

HIP + азотування. Забезпечує підвищення ресурсу до 250%.

HIP + термомеханічне старіння (TMC). Підхід гарантує приріст ресурсу до 250% при глибині зміцненого шару 0.8–1.5 мм.

Проведений аналіз встановив, що інтеграція комплексних методів обробки є найбільш перспективним шляхом модернізації виробництва ГТД.

Найбільш ефективними комбінаціями визнано LSP + азотування, LSP + PVD + азотування та HIP + азотування.

Застосування трикомпонентної обробки (LSP + PVD + азотування) дозволяє досягти синергетичного ефекту з приростом ресурсу деталей на рівні 400–500%.

Комплексне зміцнення забезпечує радикальне покращення характеристик лопаток без втручання в їхню геометрію.

Список посилань

1. Clauer A. H. Laser shock peening for fatigue resistance / Clauer A. H. // Surface Performance of Titanium. – 1996. – Р. 217–230. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/237562436_Laser_shock_peening_for_fatigue_resistance

2. Fatigue fracture behavior of Ti6Al4V PVD coated / Pitanga M., Cioffi M. O. H., Venditti M. L. R., Woorwald H. // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2. – Р. 1859–1864. [Електронний ресурс] – Режим доступу: DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.200

3. Bhavsar V. Characterization of Ti–6Al–4V alloy modified by plasma nitriding process / Bhavsar V., Jhala G., Shankar J. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/322386952>

4. Kaouka A. Characterization and properties of boriding titanium alloy Ti6Al4V / Kaouka A., Benarous K. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/341320762_Characterization_and_Properties_of_Boriding_Titanium_Alloy_Ti6Al4V

5. Fatigue characterization of titanium Ti–6Al–4V samples produced by additive manufacturing / Chastand V., Tezenas A., Cadoret Y. et al. // Materials Today: Proceedings. – 2016. – Vol. 3, № 10. – Р. 4270–4279. DOI: 10.1016/j.matpr.2016.02.336.

6. Качан О. Я., Уланов С. О. Підвищення довговічності зварних барабанів роторів компресорів обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2022. – № 1. – С. 53–57. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-1-7.

УДК 621.002.3: 621.89

Роїк Т.А., докт. техн. наук, професор
Гавриш О.А., докт. техн. наук, професор
Майстренко Ю.Ю., канд. техн. наук, доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, vitsiuk.iuliia@iit.kpi.ua

АНТИФРИКЦІЙНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ ЛАТУНІ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН

Подальший розвиток поліграфічного машинобудування, неможливий без покращення трибологічних властивостей деталей вузлів тертя, насамперед, антифрикційних. При цьому науковці мають поєднувати технічні аспекти нових композитів з економічними питаннями. Тому перед спеціалістами постали завдання пошуку і застосуванню нових видів сировини для створення ефективних матеріалів, зокрема, композитів, коли високі функціональні характеристики поєднуються з економічною доцільністю їх використання.

Через це автори [1, 2] приділили увагу цінному і дешевому джерелу сировини для створення нових антифрикційних композитів – шліфувальним відходам чорних і кольорових металів, які стали основою для розробки нових видів матеріалів. Велика кількість цінних легувальних елементів Cr, Ti, Ni, Zn, Pb, Sb, Bi та ін. міститься у складі таких шліфувальних відходів, які не використовуються у подальшому виробничому циклі через забрудненість абразивом від шліфувальних кругів, а вивозяться у відвали.

Автори [2] розробили низку технологічних процесів з регенерації шліфувальних відходів деяких легованих сталей та окремих кольорових сплавів, зокрема, алюмінієвих, які стали металевою основою для створення нових ефективних антифрикційних композитів для різних умов експлуатації. Втім на сьогодні відсутні відомості про особливості шліфувальних відходів різних сплавів на основі міді, можливості використання таких відходів для створення нових матеріалів.

Вказане стало мотивацією для проведення досліджень щодо використання шліфувальних відходів латуні Л63 для створення нових антифрикційних композитів, призначених для деталей вузлів поліграфічних машин трафаретного способу друку.

В роботі представлено результати досліджень впливу технології виготовлення на формування структури і трибологічних властивостей нового антифрикційного композиту на основі шліфувальних відходів латуні Л63 з твердим мастилом CaF_2 , що призначений для роботи за навантажень до 3,0 МПа і швидкостей ковзання до 2,0 м/с у вузлах тертя друкарських машин трафаретного способу друку.

Застосування розробленої технології виготовлення забезпечило формування двофазної структури антифрикційного композиту, яка поєднує металеву α -латунну матрицю, і рівномірно розподілені в ній частинки твердого мастила CaF_2 (рис. 1).

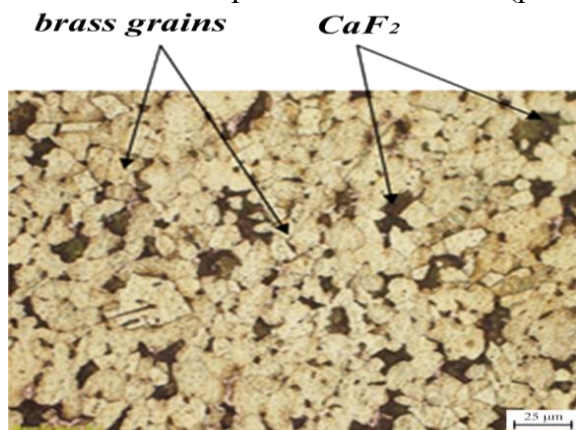


Рис. 1 – Структура композиту порошки-відходи латуні Л63+7% CaF_2

Порівняльні випробування нового композиту зі шліфувальних відходів латуні Л63+(6,0–9,0)%CaF₂ продемонстрували переваги у антифрикційних властивостях досліджуваного матеріалу порівняно з литою латунню Л63 (табл. 1).

Таблиця 1 – Трибологічні властивості досліджених матеріалів

Склад, мас.%	Швидкість ковзання, м/с, навантаження 3,0 МПа						Примітка
	1,0		2,0		3,0		
	Коеф. тертя	Інтенс. зносу, мкм/км	Коеф. тертя	Інтенс. зносу, мкм/км	Коеф. тертя	Інтенс. зносу, мкм/км	
Композит Л63+(6,0–9,0) CaF ₂	0,15-0,17	47,0-52,0	0,18-0,19	68,0-74,0	0,25-0,26	252,0-258,0	Режим само-змащення, наявні плівки тертя
Лита латунь Л63 [1]	0,35-0,36	352,0-366,0	0,38-0,39	928,0-944,0	—		Поверхні не захищені, посилений знос, схоплення

Новий композит з регенованих шліф-відходів латуні Л63 з твердим мастилом CaF₂, за режимів тертя V до 2,0 м/с, Р до 3,0 МПа утворює антизадиру захисну плівку, яка присутня на обох поверхнях контакту. Це мінімізує коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування композиту. Аналіз трибологічних властивостей (табл. 1) дозволяє рекомендувати антифрикційний композит на основі промислових шліфувальних відходів латуні Л63 з домішками твердого мастила CaF₂ для деталей вузлів друкарських машин трафаретного способу друку, що працюють за умов V до 2,0 м/с, Р до 3,0 МПа.

Список посилань

1. Roik T.A., Gavrysh O.A., Maistrenko Iu.Iu. Structure and tribological properties of wear-resistant composites produced from brass waste for screen printing machine parts// Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Springer Nature, Switzerland AG, part of Springer Nature 2025, Vol. 64, Nos. 1-2, May, 2025.- P. 27-35. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-025-00503-2>
2. Zemlik M., Roik T., Gavrysh O., Jamroziak K. Using silumin grinding waste for new self-lubricating antifriction composites for post-printing equipment// Advances in Science and Technology Research Journal, Poland, 2025, 19(12), pp. 129–137, ISSN is 2299-8624. <https://doi.org/10.12913/22998624/209742>

УДК 538.95

Широкий Ю.В., канд. техн. наук, доцент

Семененко О.Д., асистент

Національний аерокосмічний університет «ХАІ», м. Харків, o.semenenko@khai.edu

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЗМУ ЗНОШУВАННЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТУ З ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ

Сучасні технології механічної обробки вимагають підвищення продуктивності різання, що досягається за рахунок застосування твердосплавного інструменту з зносостійкими покриттями. Період працездатності такого інструменту складається з двох чітко виражених етапів. Перший і основний – це час роботи до моменту руйнування покриття на передній та задній поверхнях. Другий етап – робота інструменту з уже зруйнованим покриттям до досягнення граничної величини фаски зношування по задній поверхні. Саме така двоетапна

природа зношування принципово відрізняє механізм руйнування покритого твердосплавного інструменту від непокритого.

У непокритого твердосплавного інструменту при напівчистовому точінні інтенсивність зношування визначається переважно адгезійно-втомними, окислювальними та дифузійними процесами на контактних поверхнях. У цих умовах деформування різального клина (опускання передньої поверхні та випирання задньої) проявляється незначно. Зовсім інший характер має зношування інструменту з покриттям, особливо при режимах максимальної продуктивності, коли період стійкості обмежується 15–20 хвилинами. У таких умовах швидкості різання зростають до 200–300 м/мін, а розрахункова температура в зоні різання досягає 750–800 °С. Цей температурний рівень є близьким до граничного навіть для сучасних комбінованих нітридних покриттів типу TiAlN та їх модифікацій [1].

Зносостійке покриття суттєво знижує інтенсивність дифузійних, адгезійних та окислювальних процесів у твердосплавній матриці. Завдяки низькій теплопровідності покриття до моменту його прориву основна частина теплоти відводиться в оброблювану заготовку. Однак підвищені температури активізують процес повзучості різального клина, який визначається якістю твердосплавної матриці. Після руйнування покриття тепловий потік у інструмент різко зростає, що ще більше інтенсифікує повзучість матриці та загальний знос.

Дослідження Костюка Г.І. та його учнів детально розкрили роль повзучості різального клина як визначального фактору руйнування інструментів з покриттям [2]. Найбільш пластичною складовою твердого сплаву є кобальтова зв'язка, саме її хімічний склад і вміст визначають інтенсивність повзучості. Чим вищий вміст кобальту в сплаві, тим інтенсивніше проявляється повзучість. У межах однієї марки сплаву інтенсивність повзучості залежить від кількості розчиненого вольфраму в кобальтовій зв'язці: чим менше вольфраму, тим вища повзучість.

Важливо підкреслити, що процес зношування покриття та повзучість матриці відбуваються паралельно в часі. На перший погляд може здатися, що до моменту руйнування покриття інструмент практично не зношується. Однак мікрошліфи різальних кромок спростовують цю думку. Так, уже через 3 хвилини різання на твердосплавному інструменті покриттям TiC ($V = 100$ м/мін, $S = 0,3$ мм/об, $t = 1,5$ мм) по задній поверхні покриття ще повністю збережене, фаска зношування відсутня, але чітко спостерігається опускання передньої поверхні та випирання задньої – класичні ознаки повзучості матриці. На передній поверхні одночасно фіксується зародження лунки зношування та початкова стадія прориву покриття.

Схема деформування різального клина (рис. 1) ілюструє, що через смугу повзучості відбувається «протаскування» об'ємів твердого сплаву в напрямку задньої поверхні. Узагальненими характеристиками повзучості є величина опускання передньої поверхні та розмір контактної площадки по задній поверхні.

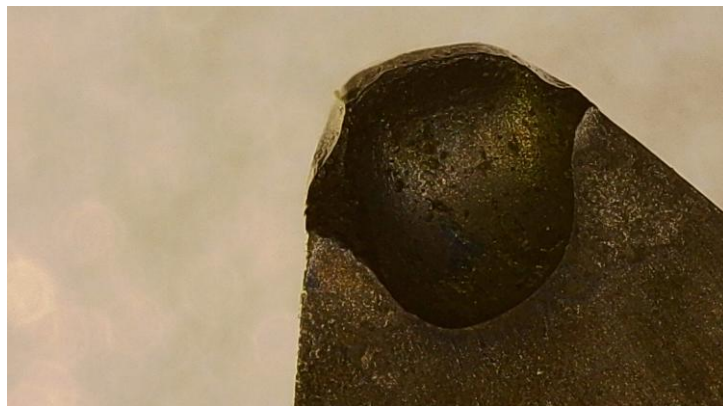


Рис. 1 – Деформування різальної частини твердосплавного інструменту

Деякі автори вважають, що працездатність покриття не залежить від марки твердосплавної матриці та визначається лише хімічним складом, товщиною та кількістю шарів покриття. Не заперечуючи впливу параметрів покриття, слід зазначити, що така незалежність можлива лише за умови ідеальної та стабільної якості матриць, що важко забезпечити через особливості технології спікання. Насправді між зношуванням покриття та повзучістю матриці існує тісний взаємозв'язок: опускання передньої поверхні створює додаткові розтягувальні напруження в покритті, що прискорює його руйнування.

Покриття виконує двоїсту роль у механізмі зношування. З одного боку, воно підвищує стійкість інструменту. З другого – утворена під час роботи мережа тріщин призводить до відшарування фрагментів покриття, які втягуються в рух оброблюваним матеріалом і «пропахують» матрицю, спричиняючи додаткові пошкодження. Тому критичним є вибір раціональних режимів різання, що відповідають оптимальній температурі в контактній зоні.

Отже, працездатність твердосплавного інструменту з покриттям визначається сукупністю двох взаємопов'язаних факторів: зносостійкістю самого покриття та якістю (опором повзучості) твердосплавної матриці. Ці процеси протікають паралельно, і їх інтенсивність у конкретних умовах металообробки остаточно визначає ресурс інструменту.

Перспективи вдосконалення технології полягають не лише в оптимізації хімічного складу та структури покриттів, але й у суттєвому підвищенні якості твердосплавної матриці – насамперед її здатності протистояти повзучості при високих температурах різання. При розробці методів оперативної діагностики різальних властивостей такого інструменту обов'язково необхідно враховувати як властивості покриття, так і характеристики матриці.

Список посилань

1. Широкий Ю. В. Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. Д. Семененко, О. В. Торосян // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2025. – № 106. – С. 84–107.
2. Kostyuk G. I. Influence of the method of setting thermophysical and thermomechanical characteristics of B3 hard alloy on the nature and efficiency of nanostructure formation / G. I. Kostyuk, O. D. Semenenko // Вісник НТУ «ХПІ». – 2018. – № 34 (1310). – С. 40–46.

УДК 621.371

Філатов Ю.Д., докт. техн. наук, професор

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, filatov2045@gmail.com

Сідорко В.І., докт. техн. наук, доцент

ДП “Інженерно-виробничий центр АЛКОН” НАН України, sidorko@ism.kiev.ua

Ковальов С.В., канд. техн. наук

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, skovalyov2@gmail.com

Ковальов В.А., канд. техн. наук, доцент

Юрчишин О.Я., канд. техн. наук, доцент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, urchyshynoks@ukr.net

УТВОРЕННЯ НАЛЬОТУ НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ ПРИТИРА ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ МІДІ

Підвищення якості деталей оптотехніки з міді можливе лише за удосконалення технології їх полірування та розробки нових полірувальних дисперсійних систем, які б забезпечували високу швидкість зняття оброблюваного матеріалу і необхідні точність форми і шорсткість полірованої поверхні за відсутності нальоту на поверхні притира, що спричиняє зниження показників полірування [1]. Метою даного дослідження є вивчення закономірностей розсіювання наночастинок зносу оброблюваного матеріалу (шламу) і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування міді та утворення нальоту з цих наночастинок на поверхні притира.

Визначення показників полірування деталей оптотехніки з міді здійснювалось під час оброблення плоских поверхонь зразків діаметром 42 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з замші діаметром 100 мм за зусилля притискання 55,5 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення 10 мм та довжини штриха 20 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Полірування здійснювали за допомогою дисперсних систем, в яких в якості дисперсної фази використовували мікро- та нанопорошки метаборату міді (CuB_2O_4) [2], а як дисперсне середовище – гас (DM1) або воду (DM2). Частоти власних коливань частинок метаборату міді визначали за спектрами ІЧ-поглинання за допомогою Фур'є-спектрометра Nicolet 6700. Середній розмір частинок метаборату міді визначали за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss EVO50 із системою мікроаналізу Aztec. Кінематичну в'язкість дисперсних систем визначали за допомогою віскозиметра мод. ВЗ-246, густину – за допомогою Density Meter DMA 35N, коефіцієнт поверхневого натягу – крапельним методом та за висотою підняття рідини к капілярі, а кути змочування дисперсними системами поверхонь оброблюваної деталі та притира – за допомогою мікроскопу Мир-12. Наліт з наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку на робочій поверхні притира спостерігали за допомогою оптичного мікроскопа ЛОМО Метам Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200.

У відповідності до сучасних уявлень про механізм полірування деталей оптотехніки з міді [3] видалення оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок перенесення енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні за механізмом ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками (QD-FRET). При перенесенні енергії у зворотному напрямку – відбувається зношування полірувального порошку. Наночастишки шламу (ЧШ) і наночастишки зносу полірувального порошку (ЧП), які утворюються під час полірування, рухаються між поверхнями оброблюваної деталі і притира та розсіюються одна на одну, характеризуючись величиною повного перерізу розсіювання [4–6].

Результати визначення швидкості зняття оброблюваного матеріалу V_m , інтенсивності зношування полірувального порошку V_p та параметрів розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу (σ_m , σ_p) наведено в таблиці.

Таблиця 1. – Показники полірування поверхонь деталей оптотехніки з міді

Показники полірування	Дисперсна система	
	DM1	DM2
Швидкість зняття матеріалу, $V_m, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	19,6	3,9
Експер. $10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ (мг/хв.)	20,5 (1,1)	3,7 (0,2)
Інтенсивність зношування полірувального порошку, $V_p, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	11,4	9,7
Повний переріз розсіювання: ЧШ на ЧП - σ_m , Мб	1,78	0,09
ЧП на ЧШ - σ_p , Мб	0,53	0,37

В результаті досліджень показано, що під час полірування міді за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді з дисперсним середовищем з гасу (DM1), відбувається ефективне знімання оброблюваного матеріалу ($V_m/V_p = 1,7 > 1$), а значення повного перерізу розсіювання ЧШ на ЧП σ_m більш, ніж втричі перевищує значення повного перерізу розсіювання ЧП на ЧШ σ_p , що свідчить про більш вірогідне утворення нальоту з наночастинок міді (ЧШ) на робочій поверхні притира, а з водяним дисперсним середовищем

(DM2), навпаки, відбувається ефективне зношування полірувального порошку ($V_m/V_p = 0,4 < 1$), $\sigma_m/\sigma_p = 0,2$ і більш вірогідним є утворення наношару з наночастинок зносу полірувального порошку метаборату міді (ЧП) на поверхні притира, що підтверджено експериментально за мікроскопічними зображеннями поверхні притира.

Список посилань

1. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. К.: Наук. думка, 2017. 248 с.
2. Патент України № 161049, МПК B24D 3/34, Спосіб полірування оптичних деталей / Філатов Ю.Д., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І., Ковальов С.В., Ветров А.Г., № u202500659; Заявл. 14.02.2025; Опубл. 05.11.2025, Бюл. № 45.
3. Filatov Yu.D. Energy transfer during the polishing of metal optic parts with disperse systems of copper metaborate micro- and nanopowders. *J Superhard Mater.* 2026. Vol. 48, no 2. P. 142–152.
4. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Scattering of sludge nanoparticles during the polishing of optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 5. P. 370–378.
5. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Scattering of polishing powder wear nanoparticles on sludge nanoparticles during the polishing of polymer optical materials *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 6. P. 451–459.
6. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Yu., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Deposition and localization of polishing powder wear nanoparticles on the processed surface of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 1. P. 55–64.

УДК 621.891

Широков В. В., докт. техн. наук, професор

Шахбазов Я. О., докт. техн. наук, професор

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, shah-nika@ukr.net

Максимук О.В., докт.фіз.мат.наук, професор

Львівський національний університет ім. Івана Франка, м. Львів

Білоус О.В., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ЗАРОДЖЕННЯ ВТОРИННИХ СТРУКТУР ЗА ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІДІ ЗІ СТАЛЛЮ 38Х2НМА

Вторинні структури на поверхнях тертя і в прилеглих до них об'ємах необхідно брати до уваги при моделюванні та встановленні механізмів утворення третього тіла між матеріалами за їх тертя. Проблема актуальна і недостатньо вивчена. В першу чергу це зумовлено необхідністю застосування для досліджень високоточних методів та відповідного сучасного обладнання. Мідь і сплави на її основі та антифрикційні композиції з її добавками широко застосовуються в реальних парах тертя та більш складних трибологічних системах. Відомо, що в трібоспряженнях з міддю можлива незношуваність, але її прояви не піддаються прогнозуванню, а механізм до кінця не розкритий і залишається гіпотетичним. В даній роботі моделювався процес тертя за схемою “палець – диск” між мідними взірцями і сталлю 38Х2НМА (контр тіло) у мастилі з галогеновмісними (хлор) присадками. Проводили мікрорентгеноспектральне дослідження на рентгенівському мікросонді MS-46, САМЕСА. В процесі сканування поверхні основного металу і шарів вторинних структур в напрямку перпендикулярному до поверхні, здійснювався запис розподілу основних хімічних елементів та їх концентрації. Попередньо для проведення кількісного аналізу були виготовлені косі шліфи від поверхонь тертя взірців і контртіл (на поверхнях було знайдено вторинні структури). Це дозволило збільшити лінійні розміри

шарів до 30 раз. Аналіз проводився по точках за режиму $U=20$ кВ, $I = 25$ нА. Інтенсивності отримуваних спектральних ліній порівнювалися відносно інтенсивностей цих же ліній чистих елементів – еталонів. Інтенсивність $K\alpha$ - ліній СІ вимірювалися відносно NaCl. Розрахунок концентрації проводився за програмою, яка враховує поправки на атомний номер, поглинання і флуоресценцію. Отримані концентрації нормувалися до 100%. В таблицях 1 та 2 наведено хімічні склади відповідних шарів вторинних структур.

Таблиця 1 – Хімічний склад вторинних структур на взірці (мідь) після тертя

ELEMENTS	WEIGHT, %	ATOMIC, %
17(Cl)	5,6449	9,5813
24 (Cr)	0,0000	0,0000
25 (Mn)	0,0000	0,0000
26 (Fe)	0,2605	0,2836
28 (Ni)	0,0203	0,0210
29 (Cu)	94,0743	90,0141

Таблиця 2 – Хімічний склад вторинних структур на контртілі (сталь 38Х2НМА) після тертя

ELEMENTS	WEIGHT, %	ATOMIC, %
17(Cl)	6,0400	10,2866
24 (Cr)	0,0098	0,0114
25 (Mn)	0,0663	0,0729
26 (Fe)	3,2269	3,4888
28 (Ni)	0,0000	0,0000
29 (Cu)	90,6569	85,1402

Отримані результати свідчать про факт супроводження процесу тертя інтенсивним масоперенесенням міді та участь у формуванні поверхневих (вторинних) структур хлору.

УДК 621.923

Вовк О.В., аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка», aleksey1740vovk@gmail.com

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗОНІ КОНТАКТУ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА І ЗАГОТОВКИ

Процес шліфування є одним із основних видів фінішної обробки металів. Так як розглядається підвищення ефективності шліфування плоских поверхонь шляхом регулювання температури в зоні різання, то експеримент проводиться при шліфуванні безпосередньо заготовок із плоскою поверхнею. На плоскій поверхні вивільнення тепла із зони обробки відбувається значно гірше в порівнянні із циліндричними поверхнями, що має більш негативні наслідки на поверхневі шари оброблюваної поверхні, а саме, виникнення припалів, мікротріщин та інших дефектів.

Експеримент проводиться на плоскошліфувальному верстаті моделі 3Б722 з прямокутним столом із зворотньо-поступальним рухом. Закріплення заготовки здійснюється на електромагнітній плиті стола верстата. Обробка проводиться периферією шліфувального круга.

В якості робочого інструменту використовується шліфувальний круг з білого електрокорунду 25А. Розміри шліфувального круга $\varnothing 400 \times 63 \times 203$ мм. Вихідні заготовки - прямокутні бруски розміром $35 \times 25 \times 70$ мм зі сталі 45. На рис. 1 наведено загальний вигляд заготовок та тривимірну модель із зазначенням розмірів заготовки.

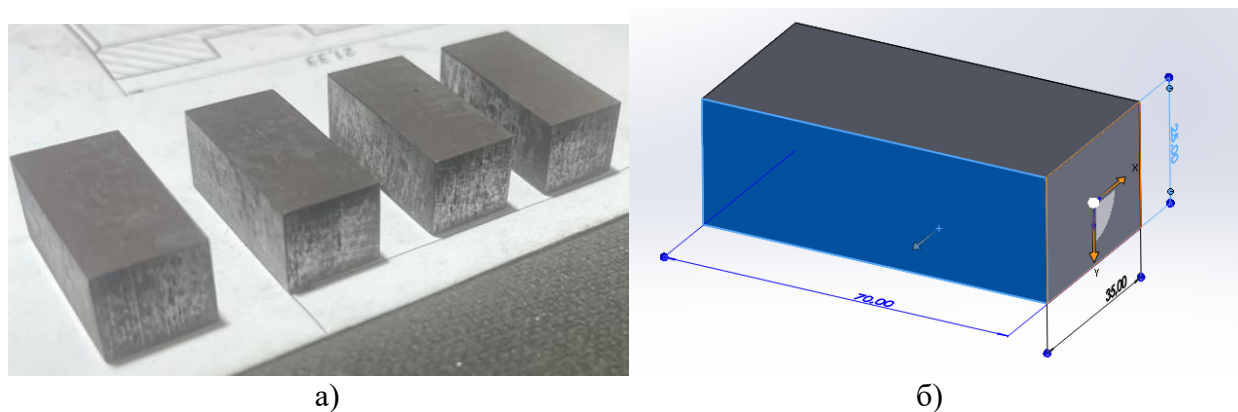


Рис.1 – Вихідна заготовка: а) загальний вигляд, б) тривимірна модель

Найрозповсюдженіші методи контролю температури в зоні обробки:

- 1) за допомогою термопар;
- 2) безконтактні методи [1, 2].

В даному експерименті проводиться вимірювання температури в зоні обробки безконтактним методом. Для цього виконується вимірювання температури на поверхні заготовки максимально швидко після виконання обробки. Головною умовою для коректності результатів є забезпечення повного охолодження заготовки до початкової температури між експериментами. Контроль виконується тепловізором марки UNI-T UTi160S.

Фактори, які впливають на температуру в зоні обробки: глибина різання, величина подачі, частота обертання круга, наявність мастильно-охолоджуючих рідин (МОР), їх склад тощо. Під час проведення експериментів обробка зразків проводиться зі сталою швидкістю різання ($V=31,4$ м/с) та подачею ($f=1$ мм/хід). Для можливості використання тепловізора та фіксації коректних даних МОР не використовується. При проведенні експерименту саме глибина різання буде тією величиною, яка буде змінюватися у межах 0,005 - 0,15 мм.

План експеримента наступний.

1. Налаштування верстата та тепловізора.
 2. Фіксація температури навколишнього середовища та заготовки.
 3. Виконання 2 експериментів для перевірки обладнання із фіксацією температури.
 4. Повне охолодження заготовки до початкової температури.
 5. Виконується сам експеримент, а саме перший прохід із глибиною шліфування 0,005 мм, подальші проходи виконуються із поступовим збільшенням глибини обробки.
 6. Фіксація температури заготовки (в зоні обробки) тепловізором одразу після обробки та відведення шліфувального круга.
 7. Повне охолодження заготовки на відкритому повітрі до температури близької до початкової виміряної в п.2;
 8. Виконання другого проходу із повторенням п.5-7.
- Всього проводиться 24 експерименти до досягнення максимальної глибини шліфування (0,15 мм).

Список посилань

1. Toenshoff H. K., Denkena B. Basics of cutting and abrasive processes. – 2013.
2. Сипайлов В.А. Теплові процеси при шліфуванні та управління якістю поверхні. М., «Машиностроение», – 1978 г. – 165 с.

УДК 621.791

Піонткевич О.В., канд. техн. наук, доцент
Шевчук Б.Р., студент

Вінницький національний технічний університет, piontkevych@vntu.edu.ua

РОЗРАХУНКОВА ТОЧНІСТЬ ЗВАРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Виконано тривимірну модель зварювального комплексу (рис. 1) для оцінки колізій та перевірки міцності обладнання [1, 2, 3]. Для розрахунку загальної похибки позиціонування пальника зварювального комплексу у просторі враховано похибки самого маніпулятора та похибки лінійної осі [4]. Розрахунок виконується за методом середньоквадратичного підсумовування, оскільки похибки є випадковими величинами [5]. Негативною особливістю проектних робіт може бути відсутність аналізу зношення обладнання [6, 7, 8], яке варто врахувати в подальших дослідженнях.

Вихідні дані для розрахунку: паспортна похибка позиціонування $\pm 0,03$ мм для зварювального робота Fanuc Arc Mate 120iD; рейкова передача має модуль зуба 3 мм, кількість зубів 25 та дільний діаметр 75 мм; кутовий люфт редуктора 3 кутові хвилини; клас точності рейки приймаємо Q6 за ISO 1328 при якому накопичена похибка кроку $\Delta_{\text{track}} = 0,03$ мм на 1000 мм довжини.

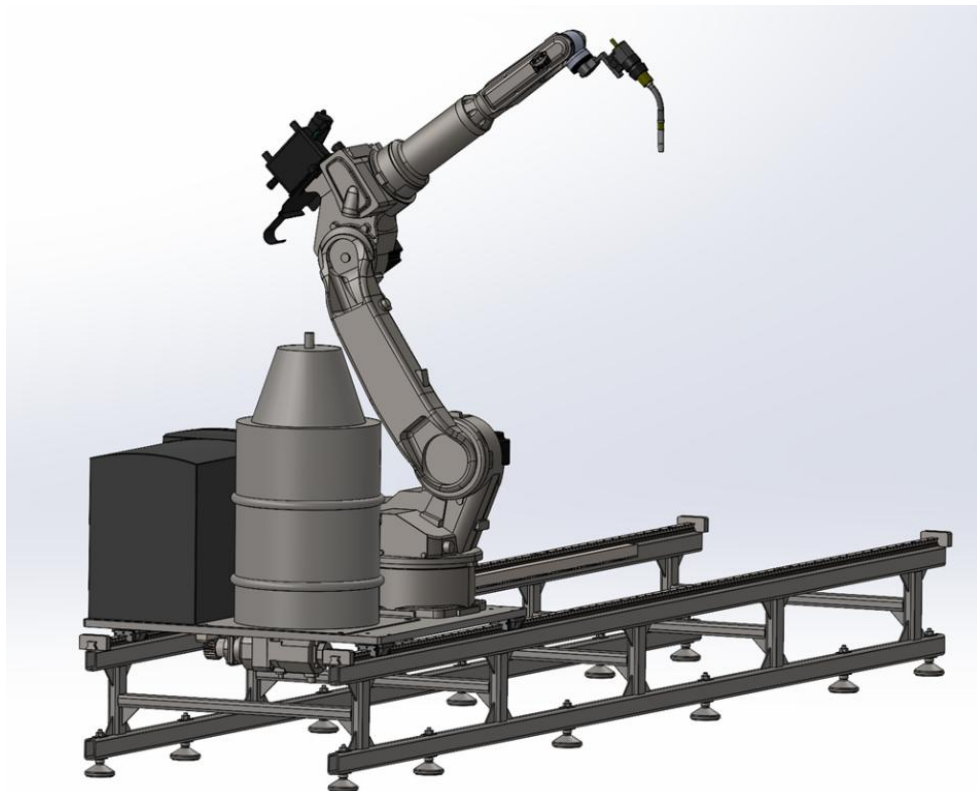


Рис. 1 – Тривимірна модель зварювального комплексу

Похибка від люфту в редукторі Δ_{trans} призводить до лінійного зміщення каретки при реверсі руху. Формула перерахунку кутового люфту у лінійний:

$$\Delta_{\text{trans}} = \pi \cdot D \cdot \alpha / (360 \cdot 60) \text{ [мм]}, \quad (1)$$

$$\Delta_{\text{trans}} = \pi \cdot 75 \cdot 3 / (360 \cdot 60) = 0,033 \text{ (мм)}.$$

Причому похибка виготовлення рейки Δ_{geom} розраховується для рейки класу Q6 на довжині робочого ходу (приймати зону зварювання 3 м, оскільки робот може варити на цю відстань без зупинки, рухаючись по платформі):

$$\Delta_{\text{geom}} = \Delta_{\text{track}} \cdot 3 \text{ [мм]}, \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{geom}} = 0,03 \cdot 3 = 0,09 \text{ (мм)}.$$

В результаті сумарна похибка лінійного модуля буде враховувати середньоквадратичне цих похибок:

$$\Delta_{\text{axis}} = \sqrt{\Delta_{\text{trans}}^2 + \Delta_{\text{geom}}^2} \text{ [мм]}, \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{axis}} = \sqrt{0,033^2 + 0,09^2} = 0,096 \text{ (мм)}.$$

Визначення загальної точності комплексу проводимо з врахуванням точності зварювального робота. Повна точність позиціонування зварювального пальника Δ_{Σ} визначається як середньоквадратична сума похибки лінійної осі та власної похибки зварювального робота Fanuc Arc Mate 120iD:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{axis}}^2 + \Delta_{\text{robot}}^2} \text{ [мм]}, \quad (4)$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,096^2 + 0,06^2} = 0,113 \text{ (мм)}.$$

Отримане значення похибки має високий показник по точності. Для дугового зварювання допустимим відхиленням пальника вважається $\pm 0,5$ мм (половина діаметра зварювального дроту 1.0 мм). Отримана похибка дозволяє в 9 разів краще забезпечити необхідний параметр позиціонування. У випадку значного збою в програмі зварювального робота передбачені спеціальні методи, якими він може підлаштовуватися та знаходити відповідну зону зварювання.

Список посилань

1. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Петров О. В., Сердюк О. В. «Комп'ютеризовані системи проектування» для здобувачів вищої освіти зі спеціальності «Прикладна механіка»: електронний лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2025. 142 с.
2. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.
3. Піонткевич О. В., Березюк О. В., Лозінський Д. О., Кавецький О. І. Застосування CAD/CAE-системи Autodesk Inventor для удосконалення фрезерногравірувального верстата з ЧПК. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Вінниця: ВНТУ, 2025. Вип. 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-178-186>
4. Ling T., Zhang X., Tu D., Zhang X. A robot kinematic calibration approach for measuring the pose errors of a robot end-effector using a laser interferometer. Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, 2025. P. 1-10. <https://doi.org/10.1108/IR-02-2025-0058>
5. Jia B., Pan H., Cai Y., Zhang L., Chen X., Chen L. Enhancing the absolute positioning accuracy of welding robots based on joint error compensation. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025. No. 158, 111302. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111302>
6. Bereziuk O.V., Savulyak V.I., Kharzhevskiy V.O. The influence of auger wear on the parameters of the dehydration process of solid waste in the garbage truck // Problems of Tribology. 2021. No 26(2/100). P. 79-86. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-79-86>
7. Bereziuk O.V., Savulyak V.I., Kharzhevskiy V.O. Establishing the peculiarities of tire wear of garbage trucks during the transportation of municipal solid waste // Problems of Tribology. 2023. No 28(1/107). P. 59-64. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-59-64>
8. Bereziuk O.V., Savulyak V.I., Kharzhevskiy V.O., Semichasnova N.S., Harbuz Ye.S. Establishing the regularity of wear of a cylindrical brush of the mounted sweeping equipment of a garbage truck depending on its rotation frequency // Problems of Tribology. 2024. No 29(2/112). P. 31-36. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-112-2-31-36>

УДК 621.9.02:004.94:621.762

Лисенко О.В., канд. техн. наук, доцент
Трембіцький М.А., студент

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ас74@i.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ ТА АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПРОЕКТУВАННІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Сучасне машинобудування вимагає постійного підвищення режимів різання, що призводить до проблеми виникнення автоколиваний інструменту. Традиційні методи виробництва корпусів механічною обробкою (фрезерування, точіння) накладають певні фізичні обмеження на конструктивне виконання інструменту. Це призводить до використання суцільних масивних конструкцій корпусних деталей інструменту, які мають високу інерційність та схильність до вібрацій. Крім того, ці методи обмежують можливості виконання каналів для охолоджувальних рідин прямими лініями, що знижує ефективність тепловідведення. Вирішити зазначені проблеми можна застосуванням адитивних технологій у симбіозі з алгоритмами генеративного дизайну.

Застосування адитивних технологій знімає більшість технологічних обмежень формоутворення, оскільки застосовується принцип пошарового формування виробу. Це дозволило сформулювати новий клас різальних інструментів. Як правило, основою нових методів проектування інструменту є метод топологічної оптимізації конструкцій SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [1]. Він дозволяє з високою обчислювальною ефективністю знаходити оптимальний розподіл матеріалу. Проте алгоритми обов'язково мають включати специфічні фільтри. До них належать обмеження кута нахилу (зазвичай на рівні 45°) для створення самонесучих структур без підтримок та заборона замкнених порожнин для безперешкодного видалення невикористаного металевих порошку [2].

Топологічна оптимізація дозволяє вилучити матеріал із ненавантажених зон, полегшивши конструкцію корпусу інструменту з одночасним підвищенням статичної жорсткості. Наприклад, при зменшенні маси на 10%, жорсткість корпусу може зрости до 6% [2]. Ще більш ефективним є застосування ґратчастих структур всередині корпусу. Якщо таку надруковану порожнину цілеспрямовано залишити заповненою несплавленим металевим порошком, тертя між тисячами частинок розсіюватиме кінетичну енергію вібрацій. Практичні тести на прикладі фрезерування титану показали, що границя стабільності роботи такого інструменту збільшується вдвічі [3].

Ефективність запропонованих технологій підтверджується прикладами розробки та впровадження конкретних конструктивних рішень різальних інструментів провідними світовими інструментальними компаніями.

Sandvik Coromant: Компанія розробила надлегку фрезу Lightweight CoroMill® 390 з титанового сплаву для роботи з довгими вільотами [4]. Використання генеративного дизайну дозволило зменшити масу інструменту на 80%. Поєднання з антивібраційними оправками дозволила збільшити швидкість різання, при цьому швидкість знімання матеріалу зросла до 200%.

Kennametal: Для німецької компанії Voith було створено комбінований багатоступеневий розточувальний інструмент [5]. Традиційний монолітний аналог був би масою не менше 25 кг, що перевищувало допустиму вантажопідйомність механізму автоматичної зміни інструменту верстата. Адитивне рішення з біонічною структурою корпусу дозволило надрукувати інструмент масою лише 11,5 кг. Впровадження конформних каналів та оптимізованої конструкції інструменту скоротило загальний час обробки деталей до 50%.

Maral: Компанія Maral застосовує технології селективного лазерного плавлення (SLM) для оптимізації інструментів зовнішньої обробки [6]. Завдяки заміні суцільного металу на

внутрішню стільникову структуру, масу інструменту було знижено на 30%, а за рахунок демпфуючого ефекту стільників стійкість інструменту зросла до 40%.

Використовуючи запропоновані методики, було проведено практичне моделювання тримача токарного різця (на базі конструкції Sandvik Coromant QS) у середовищі Autodesk Fusion 360. Розрахунок виконувався для легованої сталі 17-4 PH (AISI 630 або X5CrNiCuNb16-4), оскільки вона добре підходить для технологій металевого 3D-друку, за умов невисоких навантажень (чистового або легкого напівчистового точіння) заготовки зі сталі 45. Були задані наступні граничні навантаження на різальну кромку різця: тангенціальна технологічна складова сили різання $P_z = 250$ Н, радіальна – $P_y = 160$ Н, осьова – $P_x = 100$ Н. В результаті генеративних обчислень отримано біонічну конструкцію державки різця, яка забезпечує високий коефіцієнт запасу міцності при суттєвому зниженні маси (до 85 г). При цьому отримана біонічна структура (рис. 1) має достатню статичну жорсткість і здатна витримувати режими напівчистового точіння.

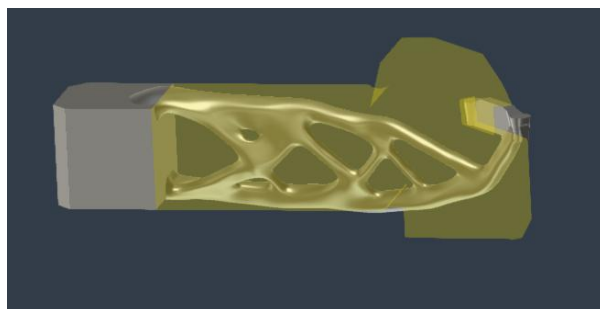


Рис. 1 – Біонічний внутрішній каркас тримача різця зі сталі 17-4 PH

Для практичного застосування на виробництві пропонується концепція інтеграції наведеної згенерованої структури як внутрішнього силового каркаса у суцільний тонкостінний зовнішній корпус інструменту. Утворені порожнини між біонічними ребрами та зовнішньою оболонкою частково заповнюються нерозплавленим металевим порошком. Під час виникнення автоколивань частинки порошку вільно переміщуються у порожнинах, стикаючись між собою та з внутрішніми ребрами жорсткості. Це створює ефект демпфування, перетворюючи кінетичну енергію вібрацій на теплову за рахунок тертя, що дозволяє додатково знизити амплітуду коливань.

Отримані результати доводять обґрунтовану перспективність використання генеративного дизайну. Аналіз досвіду провідних світових інструментальних компаній підтверджує технологічну та економічну ефективність. Проведене комп'ютерне моделювання тримача токарного різця у САПР Fusion 360 корелює з відомими промисловими рішеннями. Оптимізація дозволила зменшити масу інструменту до 85 г (економія до 70% матеріалу) при розрахункових навантаженнях напівчистового точіння.

Список посилань

1. SIMP Method for Topology Optimization [електронний ресурс]. - Режим доступу: https://help.solidworks.com/2025/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?id=26.19.6 (дата звернення: 05.05.2026)
2. Costa I. B., Cunha B. R., Marouvo J., Figueiredo D., Guimarães B. M., Vieira M. F., Costa J. M. Topology Optimization of a Milling Cutter Head for Additive Manufacturing. Metals. 2025. Vol. 15, No. 7. Article 729. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15070729>
3. Kelliger T., Meurer M., Bergs T. Potentials of Additive Manufacturing for Cutting Tools: A Review of Scientific and Industrial Applications. Metals. 2024. Vol. 14, № 9. Article 982. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14090982>
4. How 3D-printing and titanium became game-changers for lightweight CoroMill® 390. Sandvik Metal Powder. 2020. 8 July. URL: <https://www.metalpowder.sandvik/en/news-media/news/2020/07/additive-manufacturing-and-titanium-optimized-the-lightweight-coromill-390/> (дата звернення: 05.05.2026)

5. Kennametal Revs Up Innovation with 3D Printed Tool. Kennametal. URL: <https://www.kennametal.com/us/en/about-us/news/kennametal-revs-up-metal-cutting-innovation-with-3d-printed-tool.html> (дата звернення: 05.05.2026)
6. With additive manufacturing to more productivity – Bell tool for external machining from MAPAL. MAPAL. 2020. 17 Jan. URL: <https://mapal.com/en-int/a/additiv-manufactured-bell-tool> (дата звернення: 05.05.2026).

УДК 621:004.85

Ханас М.-Ю. Р., аспірант
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ПЕРСПЕКТИВИ РЕАЛІЗАЦІЇ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

Машинне навчання (ML) та штучний інтелект (AI) відіграють дедалі важливішу роль у забезпеченні якості технологічних процесів та трансформації методів машинобудування. Незважаючи на значну кількість оглядових праць, присвячених конкретним застосуванням AI та ML, існує потреба у всебічному аналізі, який би пов'язував досягнення в одній галузі з проблемами, що впливають на інші. Останні дослідження продемонстрували нові адаптивні та гібридні моделі, що покращують профілактичне обслуговування та розширюють сферу застосування AI за межі традиційних галузей. Зокрема, гібридні підходи, що поєднують статистичні моделі та нейронні мережі, виявилися точнішими у прогнозуванні відмов — деякі виробничі системи завдяки їм стали працювати на понад 30% ефективніше [1].

Прогнозоване технічне обслуговування є одним із ключових напрямків впровадження ML у машинобудування. На відміну від превентивного обслуговування за фіксованими інтервалами або реактивного після виникнення несправності, прогнозоване обслуговування передбачає відмову заздалегідь на основі аналізу даних датчиків. Впровадження трансферного навчання дозволяє адаптувати моделі до різноманітного обладнання, зменшуючи потребу в інтенсивному перенавчанні [2]. Процес проектування в машинобудуванні також зазнає змін завдяки AI: алгоритми нейронних мереж та еволюційні алгоритми досліджують великий простір проектних рішень та знаходять оптимальні конфігурації параметрів. Зокрема, підкріплювальне навчання дозволило оптимізувати конструкції крил в аерокосмічній галузі зі зменшенням аеродинамічного опору на 15% при збереженні структурної цілісності [2].

У сфері контролю якості системи комп'ютерного зору на базі AI оцінюють продукцію на наявність дефектів значно швидше та точніше за ручні методи. Алгоритми ML можуть передбачати проблеми з якістю ще до їх виникнення, забезпечуючи проактивне управління виробничим процесом. Системи моніторингу стану конструкцій (SHM) на основі глибокого навчання виявляють та класифікують структурні аномалії в режимі реального часу – застосування цих методів підвищує точність локалізації пошкоджень на 40% [3]. Аналізуючи метеорологічні дані та продуктивність обладнання, AI максимізує ефективність систем відновлюваної енергетики: вітрогенераторів і сонячних панелей.

Важливим аспектом є також застосування AI та ML для оптимізації систем відновлюваної енергетики. AI може передбачати оптимальні кути нахилу сонячних панелей або прогнозувати необхідність технічного обслуговування вітрогенераторів, мінімізуючи простой та підвищуючи надійність енергопостачання [4].

Нейронні мережі, генетичні алгоритми та підкріплювальне навчання є найчастіше використовуваними алгоритмами в перерахованих задачах. Популярні програмні пакети TensorFlow, PyTorch та MATLAB ефективно реалізують ці алгоритми шляхом розробки та впровадження моделей глибокого навчання. Наявність різноманітних наборів даних

суттєво впливає на навчання та оцінку моделей AI: дані датчиків для профілактичного обслуговування, дані CAD та моделювання для оптимізації проектування, а також дані зображень для контролю якості є найпоширенішими [5].

Розвиток робототехніки та автоматизації в машинобудуванні значною мірою залежить від AI та ML. Без цілеспрямованого перенавчання роботи на базі AI можуть навчатися на основі навколишнього середовища та адаптуватися до нових завдань. Для автоматизованих складальних ліній, де роботи виконують різноманітні завдання та працюють з різними деталями, ця універсальність є надзвичайно важливою [6]. Алгоритми ML допомагають роботам працювати ефективніше, навчаючись на даних та досвіді з часом, що призводить до зниження витрат на робочу силу та підвищення продуктивності.

Методи ML також суттєво змінюють парадигму технічного обслуговування обладнання. Прогнозоване технічне обслуговування, на відміну від превентивного за фіксованими інтервалами, використовує складні алгоритми та дані датчиків у режимі реального часу для передбачення відмов. Це подовжує термін експлуатації обладнання, мінімізує час простою та суттєво знижує витрати на технічне обслуговування [7]. Алгоритми ML аналізують дані датчиків, щоб виявити тенденції та відхилення, що передують механічним несправностям, забезпечуючи можливість оперативного втручання до виникнення аварії [8].

В останні роки в машинобудуванні спостерігається помітна тенденція до цифровізації та застосування інтелектуальних технологій. Лідерами цієї трансформації є AI та ML, які надають інженерам інструменти для оцінки великих обсягів даних, вдосконалення конструкцій та автоматизації процедур. Серед програмних інструментів реалізації моделей глибокого навчання — TensorFlow, PyTorch та MATLAB, що широко застосовується для систем керування та аналізу методом скінченних елементів [9]. Залишаються невирішеними питання інтерпретованості (XAI) рішень AI для інженерів-практиків та стандартизації методів збору й обміну виробничими даними. Перспективою подальших досліджень є розробка методів пояснюваного AI та формування нормативно-правової бази для відповідального впровадження цих технологій як інструментів підвищення якості та ефективності машинобудівного виробництва [10].

Список посилань

1. Rashid A.B. AI revolutionizing industries worldwide: a comprehensive overview of its diverse applications / A.B. Rashid, M. Kausik // *Hybrid Advances*. – 2024.
2. Elahi M. et al. A comprehensive literature review of the applications of AI techniques through the lifecycle of industrial equipment // *Discover Artificial Intelligence*. – 2023.
3. Cha Y.J. et al. Deep learning-based structural health monitoring / Y.J. Cha et al. // *Automation in Construction*. – 2024.
4. Abualigah L. et al. Wind, solar, and photovoltaic renewable energy systems with and without energy storage optimization: a survey of advanced machine learning and deep learning techniques // *Energies*. – 2022.
5. Das S. et al. Applications of artificial intelligence in machine learning: review and prospect // *International Journal of Computer Applications*. – 2015.
6. Dhanabalan T., Sathish S. Transforming Indian industries through artificial intelligence and robotics in industry 4.0 // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2018.
7. Das S. et al. Applications of artificial intelligence in machine learning: review and prospect // *International Journal of Computer Applications*. – 2015.
8. Diez-Olivan A. et al. Data fusion and machine learning for industrial prognosis: trends and perspectives towards Industry 4.0 // *Information Fusion*. – 2019.
9. Kapoor N.R. et al. Artificial intelligence in civil engineering: an immersive view // *Artificial Intelligence Applications for Sustainable Construction*. – 2024.
10. Afridi Y.S. et al. Artificial intelligence based prognostic maintenance of renewable energy systems // *International Journal of Energy Research*. – 2022.

УДК 378: 371.333

Пасов Г.В., канд. техн. наук, доцент
Венжега В.І., канд. техн. наук, доцент
Кологойда А.В., канд. техн. наук, доцент
Мурашківська В.П., старший викладач

Національний університет «Чернігівська політехніка», genapasov@gmail.com

КОМП'ЮТЕРНА ПЕРЕВІРКА ОДНОРІДНОСТІ ДИСПЕРСІЙ ЗА χ^2 -КРИТЕРІЄМ У ГАЛУЗЕВОМУ МАШИНОБУДУВАННІ ТА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ ЗА ДОПОМОГОЮ MICROSOFT EXCEL

Стрімкий розвиток комп'ютеризації, яка активно проникає в усі сфери людської діяльності, значною мірою вплинув і на сучасну систему освіти. Упродовж останніх років у навчальному процесі дедалі ширше впроваджуються новітні комп'ютерні технології. Одним із перспективних напрямів використання комп'ютерної техніки стало її застосування під час виконання лабораторних і практичних робіт з різних навчальних дисциплін, зокрема інженерно-технічного спрямування, де виникає потреба в обробці значних обсягів інформації. У сучасній інженерній практиці здійснюється велика кількість різноманітних експериментальних досліджень, оскільки саме експеримент дає змогу отримати найбільш достовірні результати та встановити точні залежності між досліджуваними параметрами. Водночас проведення будь-яких вимірювань у процесі експерименту неминуче пов'язане з виникненням певних похибок.

Однорідність дисперсій означає, що серед усіх дисперсій немає таких, які значно перевищували б інші. Однорідність дисперсій перевіряють за допомогою різноманітних статистичних критеріїв (F -критерій або критерій Фішера, G -критерій або критерій Кохрена, χ^2 -критерій або критерій Барлєтета). Найпростішим з них є критерій Фішера (F -критерій), який слугує для порівняння двох дисперсій. При порівнянні великої кількості дисперсій їх однорідність перевіряють за критерієм Кохрена або за критерієм Барлєтета.

Якщо для всіх рядків матриці планування експериментів виконано не однакову кількість паралельних експериментів і при цьому одна дисперсія суттєво перевищує інші, то однорідність ряду дисперсій перевіряють за допомогою критерію Барлєтета (χ^2 -критерій), який розраховується за відомою формулою [1, 2]. Гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, якщо χ^2_P не перевищує табличного значення χ^2_T . Якщо розраховане значення критерію Кохрена більше за табличне $\chi^2_P > \chi^2_T$, то дисперсії неоднорідні.

Проблеми, пов'язані з математичною обробкою експериментальних даних, можуть бути ефективно розв'язані за допомогою прикладних програмних засобів, зокрема Microsoft Excel. Ця програма дає можливість виконувати математичні розрахунки та аналіз даних, уникаючи складних і громіздких обчислювальних процедур. Проте для її ефективного використання зазвичай необхідно проводити попереднє навчання, спрямоване на ознайомлення користувачів з основними функціями та можливостями програмного забезпечення. Нині навчальні плани більшості дисциплін математичного циклу передбачають широке використання персональних комп'ютерів і пакетів прикладних програм уже з перших семестрів навчання. Тому для успішного опанування, наприклад, дисциплін, пов'язаних із числовими методами, здобувачі вищої освіти повинні мати достатній рівень підготовки з інформатики. Оскільки науково-дослідна робота часто розпочинається вже на початкових курсах навчання, коли спеціальні знання студентів ще є недостатніми, було створено програмний продукт «Однорідність дисперсій за χ^2 -критерієм, Microsoft Excel». Його використання дає змогу здобувачам проводити дослідження без необхідності проходження попередніх занять, присвячених вивченню принципів роботи програми [1, 2].

Для прискорення виконання розрахунків і підвищення ефективності процедури перевірки однорідності дисперсій доцільно використовувати програмний засіб Microsoft Excel. Вихідною інформацією для проведення обчислень є результати паралельних експериментів, кількість виконаних паралельних дослідів та обраний рівень значущості експерименту. Табличне значення критерію Бартлетта обирається в залежності від рівня значущості, кількості порівнюваних дисперсій та кількості ступенів свободи. Усі інші показники програма обчислює автоматично, використовуючи стандартні математичні та логічні функції відповідно до наведеної вище методики. Крім того, результати перевірки однорідності дисперсій відображаються з наочним кольоровим позначенням: однорідні дисперсії виділяються зеленим кольором, а неоднорідні — червоним. Приклад виконання розрахунків представлено на рис. 1.

Практична робота №3														
Номер варіанту	Y ₁				Y ₂			Y ₃			Y ₄			
	Y11	Y12	Y13	Y14	Y21	Y22	Y23	Y31	Y32	Y33	Y41	Y42	Y43	Y44
1	20	19	18	17	40	42	43	50	51	53	100	101	99	98
2	444	442	441	442	930	931	933	1270	1269	1267	1534	1532	1531	1532
3	666	667	668	667	820	819	822	1160	1161	1163	1533	1535	1536	1535
4	913	912	910	908	810	812	814	1140	1139	1138	1432	1431	1429	1431
5	116	117	118	119	800	798	797	1120	1121	1122	1431	1432	1434	1433
6	324	323	322	321	690	691	693	1080	1081	1079	1330	1328	1327	1328
7	690	691	692	690	680	682	679	1060	1059	1057	1329	1331	1332	1331
8	713	712	711	712	670	672	674	550	551	553	1228	1227	1225	1224
9	411	412	413	412	560	558	557	930	929	928	1227	1228	1230	1232
10	555	554	553	551	550	551	553	900	901	902	1126	1124	1123	1124
11	6429	6430	6431	6432	540	541	538	880	881	879	1125	1127	1128	1127
12	3121	3120	3119	3118	430	432	434	860	859	857	1024	1023	1021	1022
13	2150	2151	2152	2150	420	418	419	740	741	743	1023	1024	1025	1027
14	1000	999	998	999	410	411	413	720	719	718	922	920	919	920
15	999	1000	1001	1000	300	298	301	701	702	700	921	923	924	923
16	680	679	678	676	290	292	294	680	681	679	820	819	817	818
17	310	311	312	313	280	278	277	560	559	557	819	820	822	824
18	200	199	198	197	270	271	274	540	541	543	718	716	715	716

Варіант №2														
	Y ₁	Y ₁	S ² (Y ₁)	S ² (Y ₁)	f ₁	f	N	C	(Xp) ²	LOG10 S ² (Y ₁)	LOG10 S ² (Y ₁)	X ² (таб) 0,352		
Y1	444	442,25	1,583	1,883	3	10	4	1,141	0,161	0,1996	0,2749	+		
	442													
	441													
	442													
Y2	930	931,33	2,333		2		3	1,211	0,152	0,3680				
	931													
	933													
Y3	1270	1268,67	2,333		2		3	1,211	0,152	0,3680				
	1269													
	1267													
	1534													
Y4	1532	1532,25	1,583		3		4	1,141	0,161	0,1996				
	1531													
	1532													
	1532													

Рис. 1 – Приклад застосування Microsoft Excel для перевірки однорідності дисперсій за χ^2 -критерієм (при не однаковій кількості паралельних експериментів)

Створений програмний продукт може успішно застосовуватися магістрантами під час вивчення дисциплін «Математичне моделювання процесів обробки на металорізальних верстатах» та «Планування та обробка результатів експериментів на автомобільному транспорті» [3, 4]. Крім того, його доцільно використовувати при проведенні експериментальних досліджень у процесі підготовки та виконання магістерської випускної кваліфікаційної роботи.

Список посилань

1. Душинський В.В. Основи наукових досліджень. Теорія та практикум з програмним забезпеченням: Навч. посібник – К.: НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.
2. Пасов Г.В. Використання елементів теорії планування експериментів у моделюванні кібернетичних систем і процесів: Навч. посібник. / Пасов Г.В., Міщенко М.В. – Друк: ПАТ «ПВК «Десна», 2012. – 156 с.
3. Математичне моделювання процесів обробки на металорізальних верстатах. Методичні вказівки до практичних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» освітньо-професійної програми «Галузеве машинобудування» / Укл.: Кальченко В.В., Пасов Г.В. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 32 с.
4. Планування та обробка результатів експериментів на автомобільному транспорті. Методичні вказівки до практичних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» освітньо-професійної програми «Автомобільний транспорт» / Укл.: Кальченко В.В., Пасов Г.В. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – 32 с.

УДК 621.793.1:620.18

Мікосянчик О.О., докт. техн. наук, професор
Мнацаканов Р.Г., докт. техн. наук, професор
Корнієнко А.О., канд. техн. наук, доцент
Богдан С.Ю., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Київський авіаційний інститут», oksana.mikos@ukr.net

АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРНОЇ ТА ХІМІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ ВК15 ТА Р6М5 НА СТАЛІ 45

Сучасний розвиток промислового виробництва висуває жорсткі вимоги до енергоефективності та екологічної безпеки технологічних процесів. У цьому контексті метод електроіскрового легування (ЕІЛ) стає дедалі актуальнішим, оскільки дозволяє суттєво зменшити витрати матеріалів та енергії, мінімізувати викиди та відходи, що повністю відповідає сучасним міжнародним стандартам. Розвиток нових композиційних матеріалів та високоефективних технологій нанесення захисних шарів відкриває нові можливості для покращення зносостійкості деталей машин, які працюють у складних умовах [1].

Метою роботи є встановлення закономірностей формування мікроструктури та розподілу хімічних елементів у покриттях, нанесених твердим сплавом ВК15 та інструментальною сталлю Р6М5.

Для проведення експериментальних досліджень у якості основи використовували зразки зі сталі 45 у нормалізованому стані розміром 30х30 мм. Формування захисних покриттів здійснювали на установці «Елітрон-22» [2]. Як електроди для легування були обрані твердий сплав ВК15 та інструментальна швидкорізальна сталь Р6М5. Процес формування ЕІЛ відбувався при постійному струмі силою 1А. Загальний час обробки кожного зразка становив 20 хвилин, що відповідає середньому питомому часу обробки поверхні основи 2 хв/см². Такі параметри забезпечують стабільне перенесення матеріалу електрода на підкладку та формування функціонального шару з необхідною адгезією.

Комплексне дослідження морфології та елементного складу отриманих покриттів проводили з використанням сучасного аналітичного обладнання. Основним інструментом виступив сканувальний електронний мікроскоп EVO 50XVP виробництва ZEISS. Для проведення точного хімічного аналізу мікроскоп був оснащений енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів INCA Penta FETx3. Додатково використовувалася система HKL CHANNEL-5 для дифракції відбитих електронів (EBSD). Елементний аналіз і картування розподілу елементів виконували методом EDS з подальшою математичною обробкою даних у спеціалізованому програмному середовищі, що забезпечило високу достовірність отриманих результатів.

Аналіз результатів елементного картування дозволив виявити виражену мікронеоднорідність хімічного складу отриманих шарів, яка суттєво залежить від типу використаного електрода. Для покриття ВК15 характерним є формування впорядкованої та щільної структури. Це класична двофазна система, де карбіди вольфраму (WC) рівномірно розподілені в кобальтовій зв'язці (рис. 1). Елементне картування чітко демонструє фазове розділення: вольфрам і вуглець зосереджені в карбідних частинках, тоді як кобальт формує безперервну пластичну матрицю. Вольфрам у цьому покритті локалізується переважно у вигляді дисперсних або злитих частинок, які створюють щільний каркас. Важливим аспектом є низький рівень пористості та дефектності в шарі ВК15 (рис. 2), що в поєднанні з металургійним зчепленням із нормалізованою сталлю 45 забезпечує високу експлуатаційну надійність.

На відміну від ВК15, покриття зі сталі Р6М5 є багатокомпонентним та значно гетерогеннішим. Воно являє собою складну систему карбідів на основі вольфраму,

молібдену та хрому в залізній матриці (рис. 1). Вихідні SEM-зображення демонструють неоднорідну зернисто-дендритну структуру з наявністю мікротріщин і пор (рис. 2). Результати елементного картування заліза показують рівномірну основу, проте інтенсивність сигналу знижується в місцях скупчення легуючих елементів. Хром та молібден демонструють дифузно-неоднорідний розподіл, концентруючись у міжфазних областях та формуючи змішані карбідні фази типу Mo_2C або $(\text{W},\text{Mo})\text{C}$. Вища гетерогенність Р6М5 порівняно з ВК15 зумовлена складними фазовими перетвореннями при термічних циклах електроіскрових розрядів.

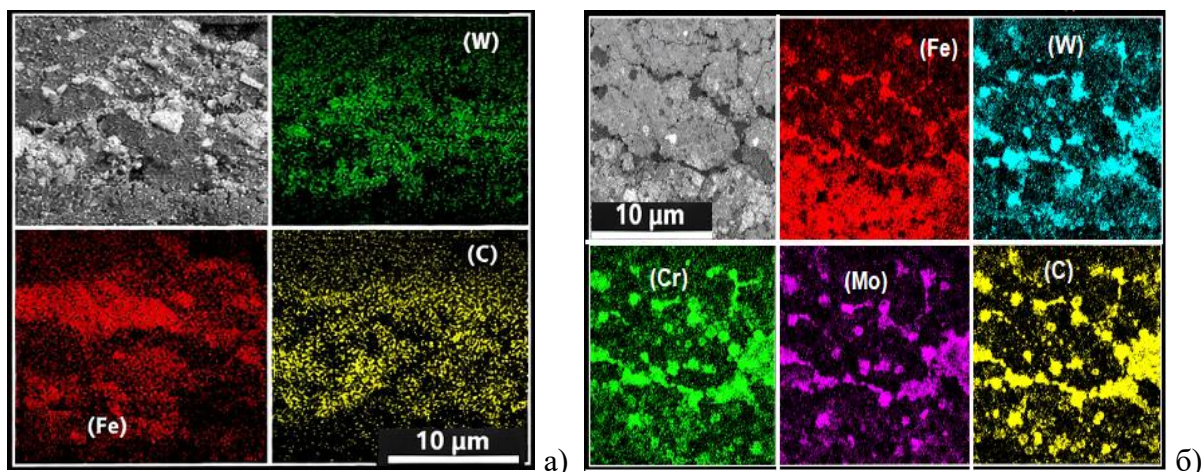


Рис. 1 – Картування елементів ЕПП на сталі 45: а – покриття ВК15; б – покриття Р6М5

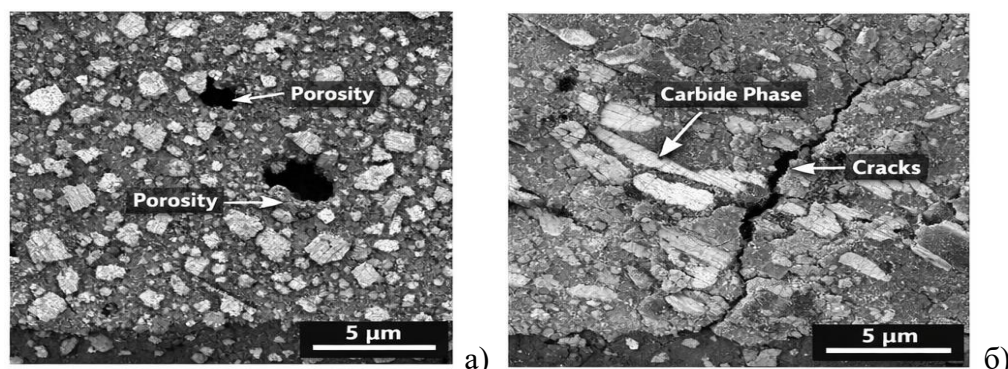


Рис. 2 – SEM-мікрофотографії ЕПП на сталі 45: а – покриття ВК15, що демонструє щільну структуру з низькою пористістю та з високим вмістом карбідів; б – покриття Р6М5, що має гетерогенну морфологію з мікротріщинами та порами

Підсумовуючи результати, можна стверджувати, що обрані режими на установці «Елітрон-22» дозволяють отримувати якісні покриття з високою адгезією. Покриття ВК15 відзначається високою однорідністю та щільністю, що робить його ефективним для захисту від абразивного зносу. Покриття Р6М5, попри вищу дефектність, має складніший фазовий склад, що може забезпечити специфічні властивості, такі як червоностійкість. В обох випадках наявність дифузійної зони на межі «покриття-підкладка» свідчить про якісне зчеплення матеріалів, що є важливим для довговічності відновлених деталей.

Список посилань

1. Haponova O., Tarelnyk V., Mo'scicki T., Tarelnyk N. Hybrid Surface Treatment Technologies Based on the Electrospark Alloying Method: A Review. *Coatings*. 2025. 15. 721. <https://doi.org/10.3390/coatings15060721>
2. Сковрцов О.О., Мікосянчик О.О. Залежність зносостійкості електроіскрових покриттів в абразивному середовищі від зміцнюючих фаз. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. 3 (104). С.78-90. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18983](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18983)

зниження тиску до значень, близьких до атмосферного. Тут потік переходить у турбулентний режим розтікання, а його вплив на процес різання значно зменшується.

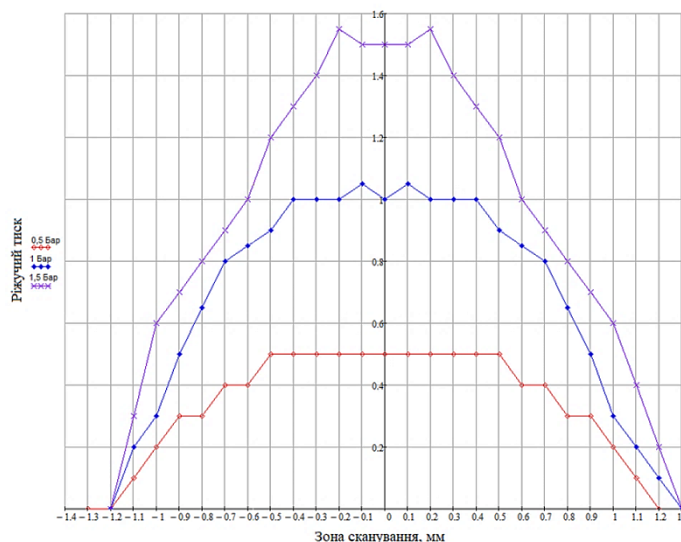


Рис. 2 – Експериментальний розподіл тиску кисню в зоні гальмування газового струменя на поверхні деталі при використанні двоканального сопла з діаметром центрального отвору 1,5 мм.

У міру віддалення від осі струменя спостерігається поступове зменшення тиску, що відповідає області радіального розтікання газу по поверхні деталі. На периферії струменя відбувається різке зниження тиску до значень, близьких до атмосферного. Тут потік переходить у турбулентний режим розтікання, а його вплив на процес різання значно зменшується.

Таким чином, у структурі поля тиску можна виділити три характерні області: центральну стагнаційну зону; перехідну зону радіального розтікання; периферійну турбулентну область. Саме параметри першої та другої зон визначають ефективність видування розплавленого металу та стабільність технологічного процесу. Особливістю використаного сопла є наявність двох каналів, що формують складну структуру газового струменя. Центральний канал створює основне ядро струменя з максимальною швидкістю та імпульсом потоку. Периферійний канал формує додатковий кільцевий потік, який стабілізує структуру струменя та зменшує його турбулентні коливання.

Завдяки такій конструкції досягається розширення області підвищеного тиску у зоні гальмування струменя. Це сприяє більш ефективному видуванню продуктів плавлення та покращує стабільність процесу різання.

Висновок. За використання двоканального сопла розподіл тиску в зоні гальмування кисневого струменя має виражений осесиметричний характер та складається з центральної стагнаційної області, перехідної зони радіального розтікання та периферійної турбулентної області. Двоканальне сопло сприяє формуванню більш стабільного струменя та розширенню області підвищеного тиску, що позитивно впливає на ефективність видування продуктів плавлення.

Список посилань

1. Brandt, A. D., and Settles, G. S., 1997, "Effect of Nozzle Orientation on the Gas Dynamics of Inert-Gas Laser Cutting of Mild Steel ", J. Laser Appl., 9, P 269-277.
2. Riveiro, A., Quintero, F., Boutinguiza, M., Del Val, J., Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2019). Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. Materials, 12(1), 157.
3. В.І. Осипенко. Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні / В.І. Осипенко, М.Р. Прусс // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10.

УДК 539.3

Матвійчук М.В, аспірант
Лимаренко О. М., канд. техн. наук
Баланюк Г.В., доктор техн. наук

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, balanuk.a.v@op.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗСУВУ, ІНЕРЦІЇ ОБЕРТАННЯ ТА ВПЛИВУ СТИСКАЮЧИХ СИЛ ПРИ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАННЯХ БАЛОЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ

На сучасному етапі розвитку техніки, зокрема у важкому машинобудуванні, верстатобудуванні та промисловому будівництві, спостерігається стійка тенденція до інтенсифікації робочих процесів. Це супроводжується значним зростанням швидкостей, потужностей та, як наслідок, інтенсивних динамічних навантажень на елементи конструкцій. Забезпечення надійності, довговічності та вібростійкості таких систем (до яких належать несучі рами машин, фундаменти важкого виробничого обладнання, високоточні шпиндельні вузли тощо) вимагає максимально точного прогнозування їхньої динамічної поведінки.

Традиційні спрощені підходи до розрахунків часто виявляються недостатніми, оскільки не здатні адекватно описати складні напружено-деформовані стани у масивних деталях, особливо за умов одночасної дії вібрацій та стискаючих зусиль. З огляду на це, проблема створення та вдосконалення математичних моделей, які дозволяють виконувати комплексний аналіз динамічної стійкості конструкцій з урахуванням усіх вагомих фізичних факторів, є вкрай актуальною науково-технічною задачею.

Класичні теорії зазвичай добре описують коливання для стержнів із великим відношенням довжини до висоти перерізу. Проте, при проектуванні масивних конструкцій, коли довжина півхвилі пружної лінії стержня співмірна з висотою перерізу h , нехтування деформаціями зсуву та інерцією обертання є неприпустимим.

Базова модель С.П. Тимошенка нині є найточнішою для врахування зсуву та інерції. Однак більшість існуючих рішень не враховують наявності стискаючих сил, через що їх неможливо застосовувати в задачах стійкості динамічним методом.

Для вирішення цієї проблеми розглядається стержень, до якого прикладена стискаюча слідча сила та сила з фіксованою лінією дії (Рис. 1). Це дозволяє доповнити модель С.П. Тимошенка поздовжньою силою N .

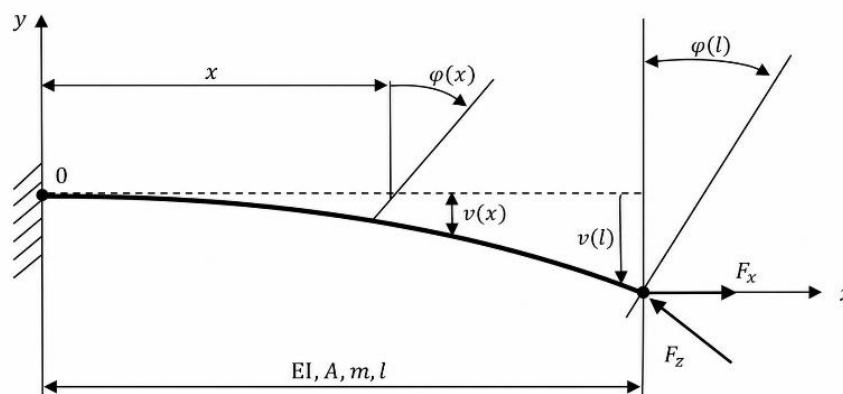


Рис. 1 – Схема для розрахунків

Повний кут повороту перерізу формується як сума кута нахилу стержня без урахування зсуву ψ та кута поперечного зсуву γ :

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \psi + \gamma. \quad (1)$$

Вираз для згинального моменту M та поперечної сили Q будується з урахуванням жорсткості перерізу при зсуві та коефіцієнта форми перерізу k :

$$Q = kAG\gamma = kAG\left(\frac{\partial y}{\partial x} - \psi\right). \quad (2)$$

Вихідними є рівняння рівноваги елементарної частини стержня при власних коливаннях, які включають суму моментів та суму проєкцій на вертикальну вісь. З урахуванням щільності матеріалу ρ , площі A , осевого моменту інерції I та динамічного навантаження $q(x, t)$, уточнена система С.П. Тимошенка з поздовжньою силою набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= \frac{\partial M}{\partial x} + Q; \\ \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \frac{\partial Q}{\partial x} + N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + q(x, t). \end{aligned} \quad (3)$$

Для гармонійних коливань застосовано метод Фур'є, який дозволяє розділити лінійну та часову координати. Прогин, навантаження та кут нахилу представляються через амплітудні значення (наприклад, $W(x)$), частоту власних коливань ω та початкову фазу φ :

$$y(x, t) = W(x) \sin(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

Підстановка цих виразів дозволяє отримати диференціальне рівняння в амплітудному стані зі статичними та кінематичними параметрами.

Проведене дослідження дозволило суттєво вдосконалити математичну модель поперечних коливань балок шляхом доповнення класичної теорії С.П. Тимошенка впливом поздовжніх стискаючих сил. Таке розширення моделі є важливим для точного аналізу масивних конструкцій, де нехтування деформаціями зсуву та інерцією обертання призводить до значних похибок у розрахунках. Завдяки застосуванню методу Фур'є для поділу змінних було виведено уточнене диференціальне рівняння, яке описує стан системи через амплітудні параметри та дозволяє ефективно відокремити часові координати від лінійних. У процесі інтегрування цього рівняння було ідентифіковано чотири типи фундаментальних функцій, що після процедури нормування дозволили представити повний розв'язок задачі у зручній матричній формі, адаптованій для інженерних обчислень.

Достовірність розробленого підходу підтверджується повним збігом розрахованих частот власних коливань для балки з шарнірним обпиранням із результатами, отриманими іншими дослідниками за допомогою альтернативних методів. Таким чином, запропонована методика суттєво розширює можливості застосування динамічного методу при вирішенні задач стійкості складних стержневих систем у сучасному машинобудуванні та промисловому будівництві.

Список посилань

1. Bokaian A. Natural frequencies of beams under compressive axial loads / A. Bokaian // Journal of Sound and Vibration. - 1988. - Vol. 126, No. 1. - P. 49 – 65.
2. Баженов В. А. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології і моделювання: підручник / В. А. Баженов, А. В. Перельмутер, О. В. Шишов; за заг. ред. В. А. Баженова. - К.: ПАТ "ВІПОЛ", 2013. - 896 с.
3. Shojaei M. Nonlinear micromorphic Timoshenko beam modeling and vibration analysis of microstructured beams / M. Shojaei, H. Mohammadi, O. Weeger // International Journal of Non-Linear Mechanics. - 2024. - Vol. 166. - P. 104861. - DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104861.

УДК 621.01

Кошель С.О., канд. техн. наук, доцент
Київський національний університет технологій та дизайну, a_koshel@ukr.net

КІНЕМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ТРЕТЬОГО КЛАСУ З ДВОМА СКЛАДНИМИ ЛАНКАМИ

Можливість забезпечення необхідних технологічних рухів робочих органів машин за складними траєкторіями та законами руху є основною перевагою складних механічних систем з структурними групами ланок третього, четвертого та вище класів.

Для удосконалення існуючих складних механізмів та проектування нових необхідно

проводити дослідження в певній послідовності: структурні [1, 2], кінематичні [3 – 6], зокрема, кінематичні складних плоских механізмів [7, 8].

Аналіз механічних систем третього та вище класу, як правило, виконується в послідовності, що урахує особливості структурної будови механізму в кожному конкретному випадку дослідження. Такий підхід викликано необхідністю спрощення проведення дослідження та одночасного збільшення точності, а в деяких випадках аналізу умовою можливості його виконання.

На рис. 1 представлено кінематичну схему механічної системи третього класу з ведучим кривошипом 1 та структурною групою ланок третього класу четвертого порядку (ланки 2 – 7), серед яких є два складних за структурою шатуна 3 та 5 з'єднаних кінематичною парою С. Структура механізму дозволяє визначити положення миттєвого центру швидкостей (М.Ц.Ш.) P_5 ланки 5, що має плоскопаралельний рух.

Побудову плану швидкостей механічної системи третього класу (рис. 2) починаємо з відкладання у довільно обраному масштабі векторів швидкостей точок F, E, C, які миттєво обертаються навколо М.Ц.Ш. з кутовою швидкістю ω_5 та, відповідно, мають напрямки: $\vec{V}_F \perp KF$, $\vec{V}_E \perp P_5E$, $\vec{V}_C \perp P_5C$. Модулі швидкостей $\vec{V}_F$, $\vec{V}_E$, $\vec{V}_C$ є пропорційними довжинам відрізків, відповідно, P_5F , P_5E , P_5C .

Наявність другої складної ланки у структурі складного механізму дозволяє визначити М.Ц.Ш. ланки 3 – точки P_3 , а за її допомогою та з урахуванням того, що ланки 3 та 5 з'єднані шарнірно розрахувати ω_3 –

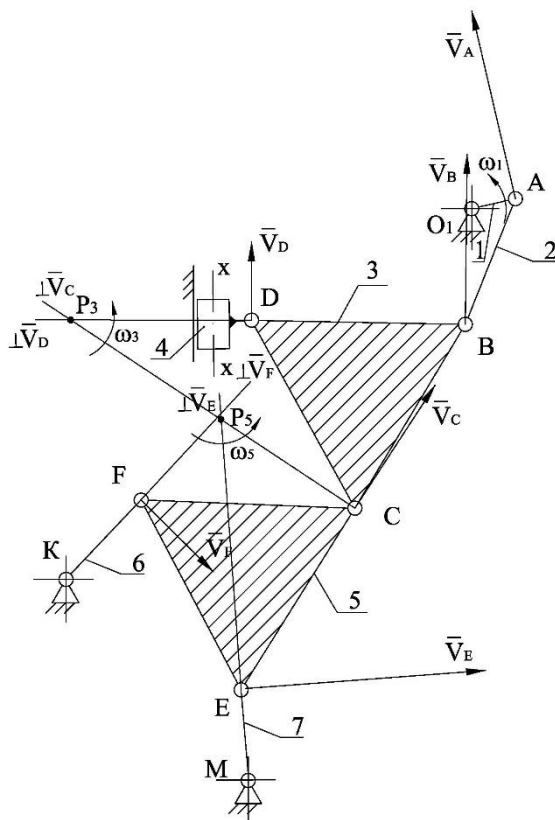


Рис.1 Кінематична схема механічної системи третього класу

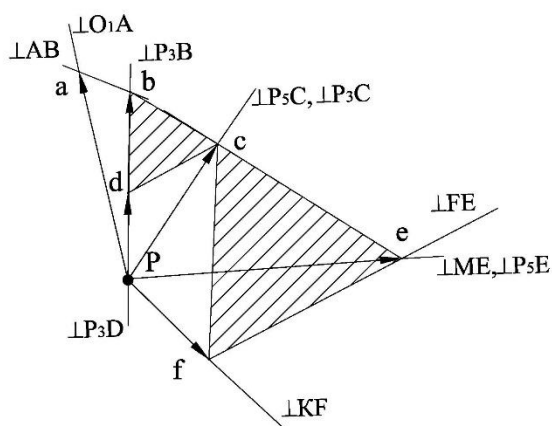


Рис.2 План швидкостей механічної системи третього класу

кутову швидкість миттєвого обертання шатуна 3 навколо точки P_3 :

$$\omega_3 = \frac{|\vec{V}_C^P|}{P_3C} = \frac{\omega_5 \cdot P_5C}{P_3C},$$

де P_5C , P_3C – відповідно, відстані на кінематичній схемі (рис. 1), м.

Миттєву кутову швидкість шатуна 5 (c^{-1}) визначаємо з рівняння:

$$\omega_5 = \frac{|\vec{V}_F^P|}{P_5F} = \frac{Pf \cdot K_V}{P_5F},$$

де Pf – відрізок плану швидкостей, мм;

K_V – довільно обраний масштаб плану швидкостей, $\frac{м/с}{мм}$.

Величини швидкостей $\vec{V}_C$, $\vec{V}_D$, $\vec{V}_B$ є пропорційними довжинам відрізків, відповідно, P_3C , P_3D , P_3B , а їхні вектори за напрямками: $\vec{V}_C \perp P_3C$, $\vec{V}_D \perp P_3D$, $\vec{V}_B \perp P_3B$.

Складаємо систему векторних рівнянь для визначення вектора швидкості точки А, яка одночасно належить до шатуна 2 та кривошипа 1:

$$\begin{cases} \vec{V}_A^P = \vec{V}_B^P + \vec{V}_{A;B}^P \\ \vec{V}_A^P = \vec{V}_{O_1}^P + \vec{V}_{A;O_1}^P \end{cases}$$

Згідно з системою векторних рівнянь на плані швидкостей механічної системи (див. рис. 2) визначаємо відрізок Pa вектора швидкості $\vec{V}_A^P$ точки А. Обчислюємо модуль її швидкості, як точки ведучого кривошипу 1 механічної системи, кутова швидкість якого наперед задається. Проводимо розрахунок дійсного масштабу плану швидкостей та визначаємо величини кутових швидкостей ланок механізму та їхніх окремих точок.

Список посилань

1. Matsiuk I., Fedoskina O., Sokolov I. Substantiation of rational design parameters of a crusher with two movable jaws // Natsionalnyi Hirnychiy University. Naukovyi visnyk. – 2024. №5, P. 45 – 50.
2. Yanga W., Ding H., Kecskeméthy A. Structural synthesis towards intelligent design of plane mechanisms: Current status and future research trend // Mechanism and Machine Theory, – 2022. P. 171 – 178.
3. Koshel' S., Dvorzhak V., Koshel' G., Zalyubovskiy M. Kinematic Analysis of Complex Planar Mechanisms of Higher Classes // Int. Appl. Mech. – 2022, №1, P. 111 – 122.
4. Diwan N. Kinematic analysis of a new designed eight-link riveter mechanism // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technolog. – 2020, N 9, P. 380 – 368.
5. Koshel S., Dvorzhak V., Koshel H., Zalyubovskii M., Panasiuk I. Analysis of the third class mechanism using the modeling method in the mathcad software environment // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2024, №5, P. 51 – 58.
6. Zawodniok, M., & Jezowski, J. Kinematic synthesis of planar four-bar mechanism with prescribed workspace by Bezier curve // Mechanism and Machine Theory. – 2020, P. 145 – 152.
7. Koshel S., Dvorzhak V., Koshel G., Zalyubovs'kyi M., Panasyuk I. Determination of point velocities in a third-class mechanism with three driving links using the graphical-analytical method // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2025, № 2, P. 137 – 147.
8. Koshel S., Koshel G., Zalyubovskiy M., Koshel O. Determining the accelerations of points of a planar eight-link third-class mechanism using graph-analytical method // Odes'kyi Politechnichniy Universytet, Pratsi. – 2024, №1, P. 16 – 22.

УДК 685.31

Гайдамаченко А.О., студентка

Ковальов Ю.А., канд. техн. наук, доцент

Київський національний університет технологій та дизайну, kovalov.ya@knutd.com.ua

ЕКСПЕРИМЕНТ ІЗ ВИЗНАЧЕННЯ ПОГОННОГО ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ МІКРОПОРИСТОЇ ГУМИ

Поздовжнє різання деталей верху та низу взуття займає значне місце при виконанні циклу підготовчих операцій. Воно включає операції двоїння (розділення за товщиною деталі на дві частини), вирівнювання деталей за товщиною, спускання краю деталі, обробка зрізу підшви.

Експеримент із визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми та величини розпирного зусилля, що діє на робочу поверхню валиків подавання з боку матеріалу деталі, який деформується, проводили на установці, зображеній на рис. 1.

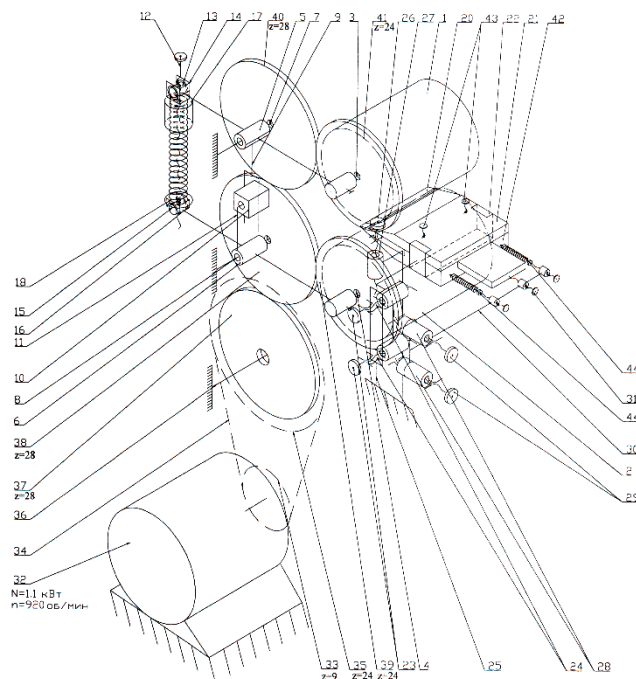


Рис. 1 – Кінематична схема експериментальної установки

Експеримент для визначення вищезазначених параметрів будувався за схемою прокатки, коли подавальні валики 1 і 2 у процесі подачі деталі на ніж 20 залишаються нерухомими щодо один одного. Для цього верхня коромисла 4, яке за допомогою кулисного каменю 5 кінематично зв'язане з нижнім коромислом 6, фіксується за допомогою регульовальної тяги 7 у певному положенні щодо нижнього коромисла 6. Таким чином встановлюється зазор між подавальними валиками 1 і 2, шарнірно закріпленими у лівих опорах коромисла. А оскільки довжини других плеч коромисел рівні між собою: $x_1 = x_2$, то обертанням тяги 7 за допомогою верхньої фіксуючої шийки 8 і нижньої - 9, які шарнірно встановлені в правих опорах коромисел, обидва валики 1 і 2 переміщуються на однакову величину. При цьому, шестерні 39 і 41 вільно обкочуються по зубчастих колесах 38 і 40, оскільки їхні міжцентрові відстані дорівнюють довжинам перших плечей коромисел 5 і 6.

Для забезпечення режиму прокатки на верхній частині тяги 7, що має праву різьбу, встановлюється гайка 10, а натиск 11, у якому встановлювалася пружина стиску 18, виконує роль контргайки. За допомогою останніх двох елементів коромисла 5 і 6 нерухомо фіксуються і тим самим обидва валки під час подачі деталі на ніж залишаються нерухомими відносно один одного.

Положення ножа 3, згідно з побудованою робочою матрицею планування, встановлюють за допомогою болта 12, який кінематично пов'язаний із вимірювальною балкою 13, на якій зафіксовано пару тензорезисторів 14, і контролюють шаблоном з індикатором у разі розведеного положення подавальних валиків.

Дослідження з визначення величин розпiрного зусилля проведено в режимі "чистого" двоїння, коли деталь розрізається на дві рівні за товщиною частини. При цьому дотримувалися такого співвідношення: $h_1=h_2$, тобто відстань між площиною леза ножа 3 і утворами подавальних валиків 1 і 2 має бути рівною. Для чого тримач 22 при ослаблених болтах 23 і гайках 24 болтом 26 встановлює ніж у щілині валиків, коли зазор між ними вже встановлений і проконтрольований плитками Йогансона, приблизно посередині, після чого тримач фіксується в напрямній 25 рами установки. Потім включається електродвигун 32, і деталь подається у щілину валиків.

Після її розділення, за допомогою товщиноміра ТР-25-1, проводився замір отриманих деталей і у разі їх невідповідності здійснювалася корекція положення тримача ножа в щілині валиків.

Пара тензорезисторів 15 для вимірювання величини розпiрного зусилля, зафіксована на поверхні першого плеча нижнього коромисла 6.

Потім проводили контрольне тарування тензодатчиків на балці 13 і на коромислі 6, яке в місці фіксації тензодатчиків має звуження, шляхом підвищування контрольних ваг від 100 до 1200Н, за допомогою спеціальної тяги з блоком для підвіски. Тарування проводили перед кожною серією дослідів і через кожні три години безперервної роботи. Потім будували тарувальні графіки: по осі ординат відкладали величини вантажу, а по осі абсцис - величини відхилення зайчика гальванометра від нульового положення. Потім точки з'єднували плавною кривою, у результаті чого було отримано шуканий графік.

Після встановлення технологічних параметрів процесу, зазначених у робочій матриці планування, до роботи готували (АЦП) НХ711, Arduino UNO і комп'ютер, а швидкість обертання приводу встановлювали на рівні 500 об/хв. Перед запуском деталі в щілину валиків, коли двигун установки був увімкнений, і вона працювала на холостому ході деталей запускали в щілину валиків, а після її поділу вимірювальне обладнання вимикали, а потім вимикали і привід самої установки.

Під час першого прогону деталі (її розрізання) визначали сумарну величину втрат під час поздовжнього різання матеріалу деталі нерухомим ножом. Після цього дві розділені частини деталі складалися разом і знову подавалися у щілину валиків на нерухомий ніж уже в розділеному стані, для повторного вимірювання. Під час другого прогону деталі в розділеному стані визначали величину втрат на тертя. Кожен дослід повторюють не менше п'яти разів.

Для проведення чергових дослідів установку переналаштували, користуючись даними робочої матриці планування. Після проведення всіх дослідів, за допомогою тарувальних графіків робили розшифровку записів на стрічці рулону фотопаперу, після його прояву, у величини розпiрного зусилля і величини сумарних втрат і втрат на тертя під час виконання поздовжнього різання нерухомим ножом, для кожного виміру. Обчислені середні значення зазначених величин заносили у відповідні стовпці таблиць.

Список посилань

1. Макарьора Д.А. Аналіз раціонального положення ножа та форми його поперечного перерізу в машинах типу „ДН” / Д.А. Макарьора, В.І. Князев // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2004. – № 1. – С. 159–163.
2. Макарьора Д.А. Визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми ножом з двосторонньою заточкою / Д.А. Макарьора // Вісник ЧДТУ. – 2013. – № 2 (65). – С. 92–97.
3. Макарьора Д.А. Експериментальне дослідження зусилля різання ножом з дугоподібною формою поперечного перерізу / Д.А. Макарьора // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 2 (283). – С. 229–234.

УДК 621.9.015

Тулупов В.І., канд. техн. наук

Краматорський фаховий коледж технологій та дизайну, volodymyr.tulupow@gmail.com

Онищук С.Г., канд. техн. наук, доцент

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, onishchuk65@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВІ ІННОВАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Забезпечення експлуатаційних властивостей функціональних поверхонь деталей машин є одним з завдань, що вирішуються при їх виготовленні. В сучасному машинобудуванні використовуються різні методи впливу на оброблюваний матеріал, серед яких виділяють механічні, електрофізичні та фізико-хімічні.

Сутністю електромагнітно-абразивної обробки (ЕМАО) є використання магнітно-абразивного порошку з додаванням алюмінієвої пудри для абразивного знімання матеріалу в постійному магнітному полі. Під дією електричного струму алюміній в складі алюмінієвої пудри розплавляється й утворює на поверхні деталі зносостійке покриття [1].

Реалізація способу здійснюється з використанням устаткування, що закріплюється в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата. В зону обробки подається електричний струм від блоку живлення 2,5 А, напруга 30 В. Заготовка зі сталі 40Х (НВ 215, Ra = 1,6 мкм) установлюється в трикулачковому патроні. Частота обертання заготовки – 100 хв⁻¹, частота обертання барабана з магнітом – 800 хв⁻¹ [2].

Дослідження проведені з використанням алюмінієвої пудри ПАП ГОСТ 2494-71 10...50%. Час обробки від 5 до 15 хв. Досліджувався вплив режимів електромагнітно-абразивної обробки на шорсткість та твердість поверхні деталі. Результати досліджень представлені на рис. 1.

Використання ЕМАО дозволяє збільшити твердість поверхні на 15-25%, зменшити шорсткість на 1,5-2 рази.

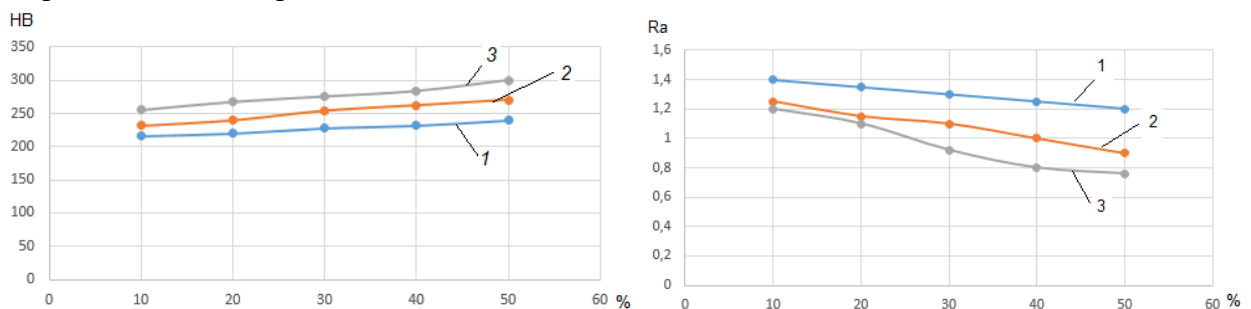


Рис. 1 – Дослідження режимів ЕМАО: 1 – 5 хв.; 2 – 10 хв.; 3 – 15 хв.

Список посилань

1. Ковалевський С.В., Тулупов В.І., Онищук С.Г. Дослідний лабораторний практикум. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 Прикладна механіка з курсів «Технологія функціональних та нано-поверхонь», «Спецкурс за напрямком магістерської роботи». Краматорськ: ДДМА, 2022. 128 с.

2. Ворона С.О., Онищук С.Г., Тулупов В.І. Використання комбінованих методів обробки деталей в машинобудуванні // Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 15-17 квітня 2026 р. / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić – Краматорськ : ДДМА, 2026. С. 127-130.

УДК 621.73.01:621.452:004.89

Федосєєва В.О., аспірантка
Матюхін А.Ю., канд. техн. наук, доцент
Малкіна О.В., аспірантка

Національний університет «Запорізька політехніка», joxi.victoria@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ФІЗИЧНО ІНФОРМОВАНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Лопатки компресора та турбіни є критичними елементами газотурбінного двигуна, що працюють в умовах екстремальних навантажень. Виробництво таких деталей методом штампування вимагає мінімальних допусків та повної відсутності дефектів. Традиційне моделювання за допомогою MCE (пакети QForm UK, DEFORM-3D, ANSYS), попри високу точність, характеризується надмірною обчислювальною складністю. Зокрема, моделювання тонких кромок аеродинамічного профілю призводить до виродження сітки та необхідності постійного перестроювання, що розтягує розрахунки на години.

Метою роботи є розробка методологічних принципів використання фізично інформованих нейронних мереж (PINN) для високоточного прогнозування напружено-деформованого стану (НДС) заготовки в режимі реального часу.

Фундамент підходу PINN закладено в роботі Raissi et al. (2019), де запропоновано фреймворк, що інтегрує нелінійні диференціальні рівняння в частинних похідних безпосередньо у функцію втрат нейронної мережі. На відміну від регресійних моделей, PINN виступає регулятором, що змушує систему дотримуватися фундаментальних законів механіки.

Новизна дослідження полягає в адаптації багатомережових моделей для специфічних умов обробки металів тиском, що дозволить прискорити розрахунки і розв'язувати обернені задачі з ідентифікації невідомих реологічних параметрів матеріалу, коефіцієнтів тертя та граничних умов.

Навчання моделі базується на мінімізації функції втрат $L(\theta)$, що складається з трьох компонентів:

$$L(\theta) = w_1 L_{data} + w_2 L_{pde} + w_3 L_{bc} \quad (1)$$

де L_{pde} – фізичний залишок (містить рівняння рівноваги, умову нестисливості, закон течії);

L_{bc} – граничні умови (точки заготовки та інструмента, сили тертя);

L_{data} – експериментальні дані;

w_1, w_2, w_3 - вагові множники, які визначають пріоритетність кожного компонента.

Для реалізації обрано стек Python із використанням бібліотек PyTorch для тензорних операцій та DeepXDE для визначення фізичних нев'язок. Оптимізація проходила у два етапи: швидке наближення алгоритмом Adam та фінальне уточнення методом L-BFGS для роботи з гладкими функціями втрат.

Розроблено PINN на основі архітектури мережі з ознаками Фур'є (Fourier Feature Network) для моделювання осесиметричного гарячого штампування сталевий дискової заготовки ($\varnothing 175 \times 58$ мм) при температурі 1150°C . Модель прогнозує радіальну швидкість v_r , осьову швидкість v_y та накопичену пластичну деформацію ε_p шляхом інтеграції умови нестисливості, рівнянь рівноваги та реології Нортон–Гоффа безпосередньо у функцію втрат.

Граничні та початкові умови виконуються через шар вихідного перетворення (output transform layer), що виключає необхідність використання штрафних функцій. У поточній реалізації штампи в моделі не мають реальної геометричної форми та задаються як плоскі граничні поверхні по координатах $y = \text{const}$. STL-файли використовуються лише для визначення початкових параметрів процесу (зокрема ходу штампа), але їхній профіль ще не інтегрований безпосередньо у постановку граничних умов задачі.

Подальша робота буде спрямована на реалізацію геометрично-орієнтованих граничних умов шляхом автоматичного вилучення профілю штампa зі STL-моделі та подальшого використання цього профілю для опису реальної контактної поверхні в PINN-моделі.

Прогнозований діапазон пластичної деформації $\epsilon_p \in [0.86, 4.99]$ фізично відповідає умовам гарячого осадження для даної геометрії (рис. 1а). Модель відтворює кінематику течії металу, що візуалізується за допомогою векторів швидкостей, які вказують на радіальне витікання матеріалу з центральної зони (рис. 1, б). Умова нестисливості виконується з RMS-нев'язкою 0.95 c^{-1} . Після навчання час розрахунку для всієї області становить менше 1 секунди.

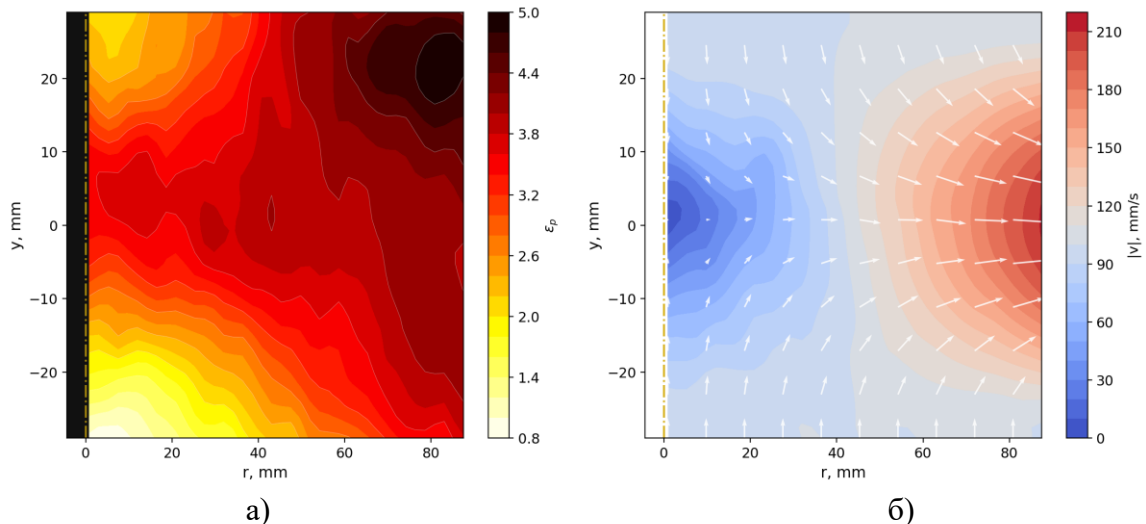


Рис. 1 – Прогноз PINN при $t = 1.0$: а) поле пластичної деформації ϵ_p ; б) величина швидкості з векторами течії

Важливою особливістю розробленої моделі є її стабільність під час переходу між фазами навчання. Використання двоетапної оптимізації (спочатку алгоритм Adam для швидкого спуску, а потім L-BFGS для точного налаштування) дозволило досягти глибокої мінімізації фізичної нев'язки, що є критичним для задач пластичності, де градієнти напружень можуть бути дуже високими.

Механізм автоматичного диференціювання, реалізований в бібліотеці DeerXDE, на відміну від методу скінченних елементів, де точність обчислення похідних (швидкостей деформації) залежить від якості та щільності сітки, обчислює значення в кожній точці безперервного об'єму за допомогою ланцюгового правила диференціювання. Це забезпечує високу математичну точність виконання умови нестисливості навіть у приконттактних зонах з високим рівнем тертя.

Час отримання результату на навченій моделі практично не залежить від складності геометрії заготовки. Це створює передумови для інтеграції таких моделей у системи керування пресовим обладнанням у реальному часі, де PINN може виступати як «цифровий двійник» процесу, миттєво прогнозуючи виникнення можливих дефектів (наприклад, перегріву або зон недостатнього пропрацювання структури) при зміні технологічних параметрів.

Отже, застосування PINN у обробці металів тиском дозволяє подолати бар'єр обчислювальної складності, забезпечуючи можливість створення цифрових двійників технологічних процесів, здатних працювати в режимі реального часу.

Список посилань

1. Raissi M. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations / M. Raissi, P. Perdikaris, G. E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – P. 686–707. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.

УДК 539.391.4

Каряченко Н.В., канд. техн. наук., доцент

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, natalik9189@gmail.comРІВНЯННЯ ФОРМ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ ГНУЧКИХ ТЯГОВИХ ОРГАНІВ
УСТАНОВОК З РУХОМИМИ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ВАНТАЖАМИ

Поперечні коливання гнучких тягових органів дуже впливають на динаміку вантажотранспортуючих канатних установок, що несуть рухоме інерційне навантаження та їх дослідження дозволяє виявити закономірності зміни основних динамічних параметрів, необхідні для правильного проектування та безпечної експлуатації таких пристроїв. Задача про поперечні коливання канатів з рухомим розподіленням та зосередженим інерційним навантаженням зводиться до вирішення лінійних диференціальних рівнянь гіперболічного типу зі змішаною похідною. Застосування класичної схеми поділу змінних у дійсній області функцій для вирішення таких рівнянь неможливе. Поділ змінних неklasичним способом, основою якого покладено вибір розв'язання як суми двох груп стоячих хвиль, призводить до наближення, а в низці задач, точним розв'язкам цих рівнянь [1]. Розглянемо поперечні коливання нерухомого канату вантажотранспортуючої установки, якою рухаються зосереджені вантажі. Прикладом такого пристрою можуть бути підвісні канатні дороги, в яких вантажі переміщуються по основному несучому канату за допомогою легкого тягового троса. Диференціальне рівняння коливань гілки канату між двома проміжними опорами має вигляд [2]

$$\rho(x_1) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2v\rho_1(x_1) \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial t} - (T - \rho_1(x_1)v^2) \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} = 0, \quad 0 \leq x_1 \leq l. \quad (1)$$

Перейдемо в рівнянні (1) до безрозмірних координат та часу за такими формулами

$$x = \frac{x_1}{l}, \quad \tau = \omega_0 t,$$

де ω_0 – власна частота коливань однорідного канату закріпленого по кінцях, що дорівнює

$$\omega_0 = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\rho_0}}.$$

У безрозмірних координатах та часі диференціальне рівняння (1), з урахуванням малої швидкості руху зосереджених вантажів, запишеться наступним чином

$$\rho(x) \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + 2\varepsilon\rho_1(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \tau} - \left(\frac{T}{\omega_0^2 l^2} - \varepsilon^2 \rho_1(x) \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq 1, \quad (2)$$

де $\varepsilon = \frac{v}{\omega_0 l}$ – малий параметр, $x_k = \frac{x_{k0}}{l} + \varepsilon \tau$.

Так як час руху обмежений, вираз $\varepsilon \tau$, враховуючи його малість, будемо розглядати як параметр, а також у рівнянні (2) нехтуватимемо членом, що має множителем малий параметр

$$a(x) \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + 2b(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \tau} - c \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (3)$$

де $a(x) = \rho(x)$, $b(x) = \varepsilon\rho_1(x)$, $c = \frac{T}{\omega_0^2 l^2}$.

Побудуємо рішення диференціального рівняння поперечних коливань (3) за граничних умов, що описують відсутність поперечних переміщень у крайніх точках ділянки канату, що розглядається, між опорами

$$w(0, \tau) = 0, w(1, \tau) = 0. \quad (4)$$

Рішення лінійного рівняння другого порядку гіперболічного типу зі змішаною похідною (3) візьмемо у вигляді двочленного подання [1]

$$w(x, \tau) = \varphi(x) \cos \omega \tau + \psi(x) \sin \omega \tau, \quad (5)$$

де $\varphi(x)$ та $\psi(x)$ – деякі функції, що задовольняють граничним умовам.

Двічі продиференціювавши вираз (5) по змінним x і τ , підставимо отримані вирази в (3) та враховуючи лінійну незалежність функцій $\varphi(x)$ та $\psi(x)$, прирівнюємо нулю вирази, що стоять множниками при них,

$$\begin{aligned} c\varphi''(x) + \omega^2 a(x)\varphi(x) - 2b(x)\omega\psi'(x) &= 0, \\ c\psi''(x) + \omega^2 a(x)\psi(x) + 2b(x)\omega\varphi'(x) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Помноживши друге рівняння системи (6) на i та склавши з першим, отримаємо рівняння для форм коливань у вигляді

$$c\Phi''(x) + 2i\omega b(x)\Phi'(x) + \omega^2 a(x)\Phi(x) = 0, \quad (7)$$

де

$$\Phi(x) = \varphi(x) + i\psi(x). \quad (9)$$

Функції $\varphi(x)$ та $\psi(x)$ відповідно до (9) визначаються за формулами

$$\varphi(x) = \operatorname{Re}\{\Phi(x)\}, \psi(x) = \operatorname{Im}\{\Phi(x)\}.$$

На підставі граничних умов (4) знайдемо

$$\Phi(0) = 0, \Phi(1) = 0. \quad (10)$$

Використовуючи перетворення Лапласа, та враховуючи першу граничну умову (10), перейдемо до оригіналу та отримаємо наступний вираз для форм коливань

$$\begin{aligned} \Phi(x) = \frac{\Phi'(0)}{a} \sin ax - \frac{2i\omega\varepsilon}{cla} \sum_{k=1}^m M_k \Phi'(x_k) \sin a(x-x_k) \sigma_0(x-x_k) - \\ - \frac{\omega^2}{cla} \sum_{k=1}^m M_k \Phi(x_k) \sin a(x-x_k) \sigma_0(x-x_k). \end{aligned} \quad (11)$$

Характеристичне рівняння для визначення частот коливань отримаємо, використовуючи другу граничну умову (10) та враховуючи, що $\Phi'(0) \neq 0, a \neq 0$

$$\sin \omega L - i\omega p \sum_{k=1}^m M_k \tilde{Z}_k \sin \omega L(1-x_k) - \omega r \sum_{k=1}^m M_k Z_k \sin \omega L(1-x_k) = 0. \quad (12)$$

Визначивши коріння рівняння (12) ω_n одним із чисельних методів, знайдемо вираз для форм коливань

$$\begin{aligned} \Phi_n(x) = \frac{\Phi'(0)}{\omega_n L} \left(\sin \omega_n L - i\omega_n p \sum_{k=1}^m M_k \tilde{Z}_k \sin \omega_n L(x-x_k) \sigma_0(x-x_k) - \right. \\ \left. - \omega_n r \sum_{k=1}^m M_k Z_k \sin \omega_n L(x-x_k) \sigma_0(x-x_k) \right). \end{aligned}$$

Побудований вираз для форм поперечних коливань дозволяє врахувати координати розташування та величини мас вантажів, що рухаються, їх кількість між проміжними опорами, вплив швидкості руху зосередженого інерційного навантаження на зміну частот і деформацію форм власних і "супроводжуючих" коливань системи.

Список посилань.

1. Горошко О.О., Савін Г.М. Введення в механіку деформуючих одновимірних тіл змінної довжини. – Київ. Наукова думка. 1971. – 224 с.
2. Каряченко Н.В. Дослідження поперечних коливань одноімерних гнучких робочих органів пристроїв з інерційним навантаженням / X Міжнародна науково-практична конференція "Стратегічні питання світової науки". – Польща. - Т.34. - 2014. - С. 26-31.

УДК 539.391.4

Каряченко Н.В., канд. техн. наук, доцент

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, natalik9189@gmail.com

РОЗВ'ЯЗАННЯ ХВИЛЬОВОГО РІВНЯННЯ, ЯКЕ ОПИСУЄ ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У ДОВГОХОДОВІЙ НАСОСНІЙ УСТАНОВЦІ

Побудовано рішення задачі про спільні коливання пружного канату з вантажем на кінці та стовпа рідини, що знаходиться над кінцевим вантажем у жорсткій трубі сталого поперечного перерізу, що відповідає реальним динамічним процесам, які відбуваються при транспортуванні рідини з великих глибин при малій зміні довжини канату за один робочий цикл. Тахограму швидкості руху верхнього кінця канату приймемо за синусоїдальним законом $v(t) = v_0 \sin \frac{\pi}{T} t$. Рідину вважаємо нестисливою. В цьому випадку, вагу стовпа рідини віднесемо у вигляді добавки до ваги кінцевого вантажу M . Математично, у першому наближенні, задача зведеться до розв'язання одного хвильового рівняння з відповідними граничними та початковими умовами [1].

Рівняння руху канату в цьому випадку має вигляд

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - c_1^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = g + \frac{v_0 \pi}{T} \cos \frac{\pi}{T} t,$$

де $u_1(x, t)$ – подовження частини канату довжиною x ,

v_0 – початкова швидкість,

$T = 0,5$ періоду переміщення верхнього кінця канату,

c_1^2 – швидкість поширення поздовжньої хвилі в канаті.

Граничною умовою в нижньому кінці при $x = l_0$ буде рівняння руху вантажу M та приєднаної маси рідини, що дорівнює $\rho_2 l_0$

$$\left(M_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + E_1 F_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right)_{x=l_0} = M_1 (g \pm \dots)$$

де $M_1 = M + \rho_2 l_0$.

У верхньому кінці канату при $x=0$ будемо мати таку граничну умову $u_1(0, t)=0$.

За відповідних задачі початкових умов, вирішуємо отримане диференціальне рівняння руху, представивши рішення у вигляді суми частинного статичного розв'язання неоднорідного рівняння та загального розв'язання однорідного рівняння з ненульовими граничними умовами [2].

Отримане рішення дозволяє досліджувати різні режими роботи відповідних установок, в яких верхній кінець рухається зі швидкістю, що дорівнює $v(t) = v_0 \sin \frac{\pi}{T} t$, залежно від періоду зміни швидкості. Якщо період зміни швидкості значно більше періоду власних коливань, то достатньо розглянути рух системи на відріжку часу $0 \leq t \leq 2T$. Якщо період зміни швидкості одного порядку або менший за період власних коливань, то необхідно розглядати вимушені коливання системи та можливість виникнення резонансних режимів.

Список посилань.

1. Курант Р., Гільберт Д. Методи математичної фізики. – М., Л.: Держ. вид-во техн.-теор. літ., 1981. – 476 с.
2. Каряченко Н.В. Динаміка гнучких пружних елементів з рухомим розподіленим та зосередженим інерційним навантаженням/ Перший незалежний науковий вісник № 7. – Київ. – 2016. – С. 57-61.

UDC 539.391.4

Karyachenko N., Ph.D., Associate Professor

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, natalik9189@gmail.com

DERIVATION OF INTEGRAL-DIFFERENTIAL EQUATIONS OF MOTION OF ROPES OF CARGO-TRANSPORTING INSTALLATIONS WITH MOVING INERTIAL LOADS

The movement of the ascending and descending rope branches of a cargo-transporting rope installation with a moving discrete and distributed inertial load with a friction pulley at a speed specified on the rim of the driving drum is considered, the calculation scheme of which is based on the monograph [1]. The rope be considered as an elastic-viscous weighty thread, in which energy dissipation is taken into account according to the Kelvin-Voigt hypothesis. There is a certain arc on the pulley, along which there is no slipping of the rope along the rim during the entire lifting time, which makes it possible to choose the origin of coordinates at some point of the rope O, fixedly connected to the pulley rim.

The boundary condition at $x = l_0(t)$ in the absence of slippage is determined from the condition of equality of the velocities of the elements of the thread and the rim, from which it follows that the relative velocity of the thread at the points of departure and approach to the pulley rim is zero

$$\frac{\partial u_0(l_0, t)}{\partial t} = 0,$$

where $u_0(x, t)$ is the absolute elongation of the rope of length x .

The boundary condition for the function $u_0(x, t)$, reduced to a more convenient form, is obtained in the form

$$u_0(l_0, t) = \int_0^t \frac{\partial u_0(l_0, t)}{\partial x} \&_0 dt.$$

The boundary condition at the lower end of the rope at $x = l_1(t)$ will be of the form

$$EA \frac{\partial u_0(l_1, t)}{\partial x} + k_0 A \frac{\partial^2 u_0(l_1, t)}{\partial x \partial t} = 0,$$

where EA – longitudinal stiffness of the rope,

k_0 – rope energy dissipation coefficient,

A – cross-sectional area of the rope.

Taking into account the above boundary conditions and following the procedure described in detail in work [2], the equation of motion will take the following form

$$\begin{aligned} u_0(x, t) + \frac{k_0}{E} \frac{\partial u_0(x, t)}{\partial t} = & - \int_{l_0(t)}^{l_1(t)} K(x, s, l_0) \rho(s) \frac{\partial^2 u_0(s, t)}{\partial t^2} ds + \\ & + (g \sin \beta \pm \&_c) \int_{l_0(t)}^{l_1(t)} K(x, s, l_0) \rho(s) ds + \int_0^t \frac{\partial u_0(l_0, t)}{\partial x} \&_0 dt. \end{aligned}$$

The resulting integral-differential equation, which describes the motion of ropes of cargo-transporting devices carrying a moving discrete and distributed inertial load, taking into account energy dissipation in the ropes and elastic creep on the pulleys, will allow, when solving it, to

investigate the frequencies and shapes of longitudinal vibrations depending on the speed of movement, the number, nature of the location and the value of the masses of discrete loads.

References

1. Horoshko O.A., Savin G.N. Introduction to the mechanics of one-dimensional deformable bodies of variable length. – Kyiv. Scientific opinion. 1971. – 224 p.
2. Savin G.N., Goroshko O.A. Dynamics of a thread of variable length. – Kyiv. Scientific opinion. – 332 p.

УДК 621.941-229.3:531.133

Тунік В.О., мол. наук. співр.

Смірнов О.М., докт. техн. наук, професор

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАНУ м. Київ, vladimir.tunik@gmail.com

Довбенко В. В., канд. техн. наук, ген. директор

ТОВ «ВП «Укркабель», с.м.т. Коцюбинське, dovbenko@ukr.net;

Ухін В. Є. канд. техн. наук, інженер

ТОВ «Шеффілд Рефракторіс Україна», м. Дніпро, vladimir.ukhin@sheffield-refractories.de

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ РОЗЛИВОЧНОГО КОЛЕСА КРИСТАЛІЗАТОРА МБЛЗ

Ключовим елементом кристалізатора роторної машини безперервного лиття заготовок є розливочне колесо, яке суттєво впливає на технологічні режими функціонування ливарно-прокатного агрегату. У процесі роботи його внутрішня (контактна) поверхня зазнає деградації під дією поєднаних термічних і механічних навантажень. Це, у свою чергу, погіршує якість безперервно литої заготовки та кінцевого мідного прокату. Метою дослідження є встановлення, із застосуванням математичного моделювання, такої швидкості обертання розливочного колеса, яка забезпечує мінімізацію дефектів у заготовках із міді вогневого рафінування.

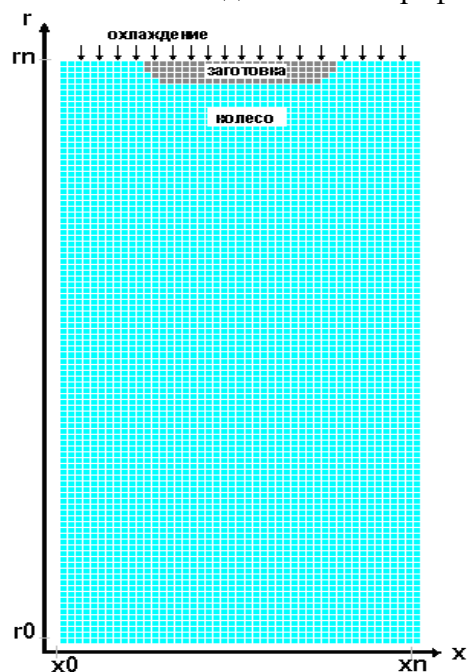


Рис. 1 – Схема розрахункової області колеса

Моделювання процесу формування заготовки базується на фундаментальних рівняннях теплообміну в багатофазних середовищах [1, 2]. Як розрахункову область прийнято поперечний переріз, орієнтований перпендикулярно до кола обертання колеса.

Визначення раціональної швидкості обертання робочого колеса. Теплофізичні процеси в системі «колесо – брусок – стрічка» включають перенесення (перерозподіл) теплової енергії між цими елементами та навколишнім середовищем, а також виділення тепла під час кристалізації міді. Розрахункова область охоплює точки, що належать колесу та заготовці, що відливається (рис. 1).

Теплоперенесення в мідній заготовці описується таким рівнянням:

$$\rho_3 C_{зэф} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

де T – температура в розглядуваній точці, °C;

x – координата за віссю в напрямку товщини колеса, м;

r – координата за віссю в напрямку радіуса колеса, м;

τ – час від моменту заливання розплаву в кристалізатор, с;

ρ_3 – густина матеріалу бруска, кг/м³;

λ_3 – теплопровідність матеріалу бруска, Дж/(м·К·с);

$C_{зэф}$ – ефективний коефіцієнт теплоємності, що у свою чергу визначається за формулою:

$$C_{зэф} = C_3 + L_3 \frac{df_s}{dT}, \quad (2)$$

де C_3 – питома теплоємність матеріалу бруска, Дж/(кг·К);

L_3 – питома теплота кристалізації матеріалу бруска, Дж/кг;

f_s – частка твердої фази.

Система рівнянь разом із граничними умовами була приведена до числового вигляду методом скінченних різниць, що дозволило реалізувати її у вигляді програмного алгоритму. Розроблена модель дає можливість визначати температурні поля та ступінь затвердіння заготовки на будь-якому етапі процесу. Це, у свою чергу, дозволяє варіювати початкові та граничні умови з метою підбору оптимальних режимів охолодження. Узагальнюючу діаграму за результатами розрахунків наведено на рис. 2.

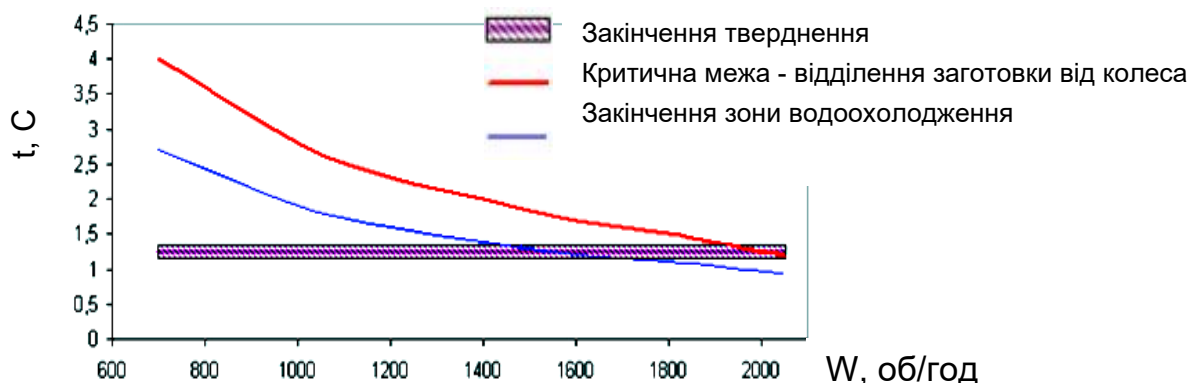


Рис. 2 – Загальна діаграма результатів розрахунків за допомогою математичної моделі

Аналіз отриманих результатів показав, що при швидкості обертання колеса понад 1900 об/год фронт тверднення виходить за межі допустимих значень. У таких умовах заготовка не встигає сформувати необхідну структуру до моменту її відділення від колеса. Діапазон швидкостей 1600–1900 об/год характеризується нестабільністю: навіть незначні відхилення в умовах теплообміну можуть призвести до порушення процесу тверднення. Найбільш сприятливим є режим із швидкістю менше 1400 об/год, за якого забезпечується повне затвердіння центральної частини заготовки до моменту її виходу з кристалізатора.

У ході дослідження встановлено, що основними механізмами руйнування робочої поверхні розливочного колеса при виробництві мідних заготовок трапецієподібного перерізу є абразивний знос та утворення поздовжніх тріщин. Виявлено, що під час розливки рідкий метал здатен проникати в утворені тріщини на глибину до 2–4 мм, що призводить до локального зварювання заготовки з поверхнею колеса. Це, своєю чергою, викликає формування поверхневих дефектів злитка, які унеможливають отримання високоякісної катанки.

Список посилань

1. Патанкар С.В. Чисельне вирішення задач теплопровідності та конвективного теплообміну при перебігу в каналах; [Пер. з англ.]: Вища школа, 2003. - 312 с.
2. Vapalahti Sami, Seppo Louhenkilpi, and Tuomo Räisänen, The Effect of Fluid Flow on Heat Transfer and Shell Growth in Continuous Casting of Copper, Materials Science Forum, vol. 508, Trans Tech Publications, Ltd., Mar. 2006, pp. 503-508.

УДК 629.5

Боряк К.Ф., докт. техн. наук, професор

Боряк М.К., наук. співробітник

Інститут військово-морських сил Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, kostya.boryak@gmail.com

КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА МАСКУВАННЯ МОРСЬКИХ БЕЗЕКІПАЖНИХ НАДВОДНИХ АПАРАТІВ ВІД ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ПРИЛАДІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

В сучасних умовах ведення бойових дій технології безекіпажних систем відіграють дедалі важливішу роль. Особливе місце серед них займають морські безекіпажні надводні апарати (МБеНА), які використовуються для розвідки, патрулювання та виконання ударних операцій. Однак разом із розвитком цих технологій удосконалюються і засоби їх виявлення. Одним із найефективніших інструментів є тепловізійні прилади, які дозволяють виявляти об'єкти за їх тепловою сигнатурою навіть у складних погодних умовах або вночі. Тепловізори працюють на основі реєстрації інфрачервоного випромінювання, яке випромінюють усі об'єкти, що мають температуру вище абсолютного нуля. Чим вища температура об'єкта, тим інтенсивніше його випромінювання. Прилад формує зображення, де різні температури відображаються різними кольорами або відтінками. Завдяки цьому навіть невеликі об'єкти можуть бути виявлені на фоні навколишнього середовища, якщо існує температурний контраст. Морські безекіпажні надводні апарати є доволі вразливими до тепловізійного виявлення з кількох причин. По-перше, їхні двигуни та електронні компоненти генерують тепло під час роботи (рис. 1).

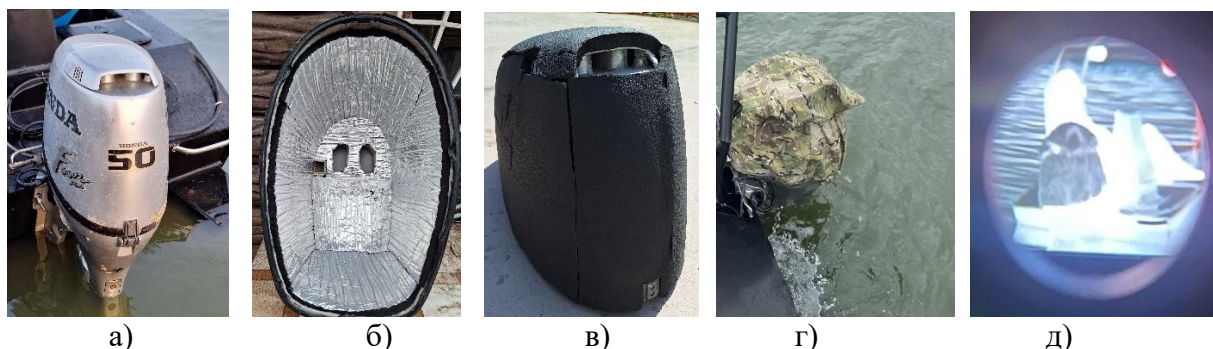


Рис. 1 – Типовий підвісний двигун для МБеНА: а) фото без маскування; б) після внутрішнього маскування кожуха двигуна; в) після зовнішнього маскування; г) тепловий чохол; д) фото зниження теплової сигнатури кожуха

По-друге, сам корпус МБеНА теж може нагріватися, як через внутрішні процеси, так і під впливом сонячного випромінювання (рис. 2).

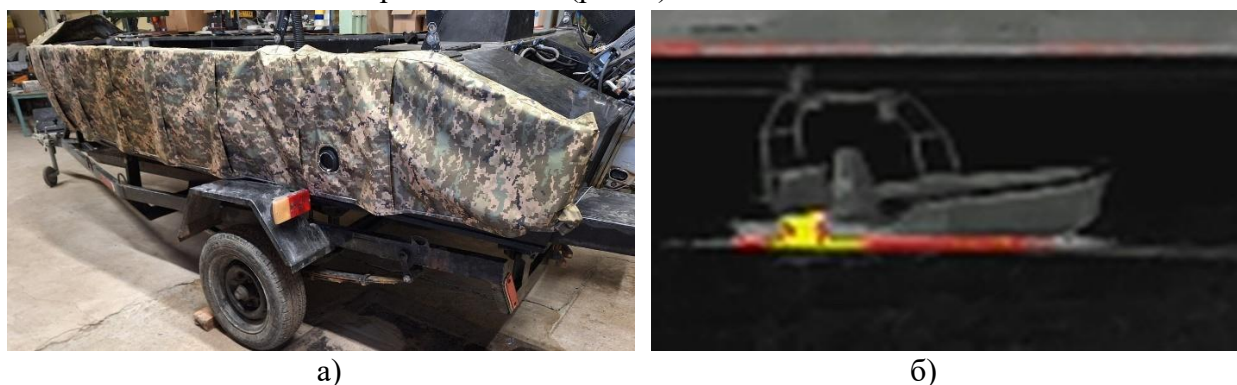


Рис. 2 – Приклад теплового маскування корпусу МБеНА: а) зовнішнє облаштування тентами; б) фото зменшення теплової сигнатури

Крім того, водна поверхня зазвичай має відносно стабільну температуру, особливо на великих акваторіях. Це створює контраст між МБеНА і навколишнім середовищем, що значно полегшує його виявлення тепловізором.

Основною метою застосування комплексної системи маскування морських безекіпажних апаратів від приладів теплового спостереження є мінімізація термічного випромінювання об'єкту для зменшення критичної відстані його виявлення противником. Під критичною відстанню розуміється мінімальна відстань, при якій об'єкт маскування (МБеНА) можна ідентифікувати за термографічним відео-образом, спотвореним завдяки застосування маскувальних засобів, визначити тип МБеНА за призначенням або взагалі виявити напрямок руху і сам об'єкт.

Комплексна система маскування повинна охоплювати кілька рівнів захисту та бути гнучкою, щоб адаптуватися до різних умов експлуатації МБеНА [1, с. 3]. Всі способи маскування можна поділити умовно на дві групи за фізичним принципом дії: пасивні та активні заходи, які в складі однієї групи можуть відрізнятися за складом конструкції та матеріалів.

Пасивні заходи спрямовані на зниження рівня теплового випромінювання складових елементів конструкції МБеНА у зовнішнє середовище, а активні — на створення додаткових термічних перешкод для теплового вимірювання приладами чи спотворення теплової картини шляхом температурної адаптації джерела випромінювання під навколишнє середовище. Загальні вимоги до складу пасивних заходів комплексної системи маскування МБеНА:

1. Застосування матеріалів у складі корпусних елементів МБеНА з низькою теплопровідністю, які мінімізують передачу тепла від внутрішніх радіоелектронних компонентів та елементів керування до навколишнього середовища. Це можуть бути композитні матеріали або спеціальні багатошарові покриття чи термоізоляція з низьким коефіцієнтом теплопровідності [2, с. 17].

2. Застосування вмонтованої системи пасивного охолодження повітрям температури поверхні внутрішніх компонентів радіоапаратури, наприклад, теплові трубки або радіатори конвекційного принципу пасивної дії без додаткових електроприладів примусової вентиляції.

3. Здійснення оперативного контролю значення температури поверхні внутрішніх компонентів та елементів керування із можливістю відповідного регулювання/переключання режиму роботи радіоелектроніки, навантаження двигунів та інших джерел випромінювання тепла в енергозберігаючий режим, оптимальний за наявними умовами навколишнього середовища і притаманний до успішного виконання бойового завдання. Це може включати оптимізацію алгоритмів роботи двигунів та використання низько споживаючих радіоелектронних компонентів і ефективних до них систем пасивного охолодження.

4. Застосування тканинних камуфляжних покриттів (тенів, чохлів, накидок, екранів, сіток, тощо), наближених за конструкцією та фарбуванням до візуальної текстури довкілля і адаптованих за багатошаровим складом до термічного маскування поверхні об'єктів від приладів спостереження [3, с. 12].

Загальні вимоги до складу активних заходів комплексної системи маскування МБеНА:

1. Застосування вмонтованої системи активного примусового охолодження, яка примусово відводить тепло від конструктивного елементу МБеНА, який є джерелом тепла (корпус човна, двигун, вмонтована система циркуляції для охолодження двигуна або система циркуляції повітря для охолодження радіаторних секцій радіоелектроніки) та розсіює його у навколишнє середовище чи перерозподіляє обсяг утилізованого тепла з меншої площі на більшу частину охолоджувальної поверхні. В якості теплоносія в такій системі використовують повітря або воду із навколишнього середовища.

2. Застосування додаткових штучних генераторів теплових перешкод. Це пристрої, що утворюють демаскуючі штучні теплові сигнали на відстані від МБеНА, які спотворюють загальну термографічну картину навколишнього середовища. Оскільки властивість (працездатність) теплового приладу обумовлена таким чином, щоб фокусувати і виявляти в присутності поруч об'єкти з більш високою різницею температури у навколишньому середовищі, то хибні джерела теплового випромінювання будуть відволікати увагу від МБеНА з меншим тепловим випромінюванням ніж штучні теплові перешкоди.

Пріоритетними напрямками і основними завданнями мінімізації термічного випромінювання для маскування МБеНА слід вважати наступними:

1. Встановлення поточного або періодичного контролю за рівнем випромінювання теплових джерел на МБеНА шляхом здійснення інструментального моніторингу, завданнями якого є:

- зменшення рівня тепловиділення апаратури (усі джерела тепла, включаючи двигуни, електронні компоненти та системи живлення, повинні мати високий рівень енергоефективності та бути теплоізовольовані, щоб мінімізувати рівень випромінювання);

- перерозподіл тепла від джерела (важливо використовувати систему рівномірного розподілу тепла по поверхні об'єкта в цілому або його повільне і непомітне розсіювання у навколишнє середовище (повітря, вода). Це знижує концентрацію теплових плям на відео-образі об'єкта і знижує ефективність його ідентифікації противником приладами теплового спостереження.

2. Використання сучасних оздоблювальних матеріалів для термічного маскування на стадії побудови конструкції МБеНА передбачає використання:

- спеціальних покриттів, які поглинають, ізолюють тепло, або перешкоджають теплообмінному процесу між джерелом випромінювання і навколишнім середовищем, що робить об'єкт менш помітним для теплових сенсорів протягом тривалого терміну часу, якого вистачить для виконання бойового завдання;

- матеріалів з низькою емісійною здатністю (матеріали, які мають властивість випромінювати менше інфрачервоного світла), що допомагає зменшити тепловий слід.

3. Застосування адаптивних до навколишнього середовища систем охолодження, наприклад:

- повітряне або водяне пасивне охолодження, оскільки морські безекіпажні апарати перебувають у водному середовищі, доцільно використовувати для розрідження теплового потоку із зовнішньої середи повітря або воду для пасивного охолодження під час руху (це може бути досягнуто за допомогою теплообмінників спеціальної конструкції для забору із зовні повітря або води), що знижують температуру окремих частин або в цілому корпус МБеНА;

- крім пасивного, можуть використовуватися системи активного примусового охолодження корпусу МБеНА або окремо тільки джерела випромінювання тепла, які інструментально контролюють рівень температури об'єкта в реальному часі та підлаштовуються до навколишнього середовища (мають можливість регулювання в конструкції системи теплообміну швидкості переміщення теплоносія в залежності від його температури).

4. Керована система теплової імітації або змішування з навколишнім середовищем:

- примусова адаптація теплових характеристик корпусу МБеНА до температури навколишнього середовища (води або повітря), наприклад, шляхом керування хімічними реакціями, які відбуваються всередині шару спеціального покриття, нанесеного на корпус, що також ускладнює виявлення МБеНА термографічними приладами;

- адаптивне інноваційне покриття, яке може змінювати свої теплові характеристики залежно від умов навколишнього середовища та розташування спостерігачів в реальному часі, що робить МБеНА менш помітним на різних термографічних частотах.

5. Зменшення критичної відстані виявлення МБеНА шляхом:

- експлуатації МБеНА в низькотемпературному режимі функціонування, або за рахунок оптимізації температурного режиму роботи, наприклад, двигуна в залежності від умов та місця виконання бойового завдання дозволить знизити тепловий контраст із навколишнім середовищем, що значно зменшить відстань, на якій МБеНА може бути виявлений противником;

- маскування руху за рахунок застосування додаткових технологій примусового охолодження, які зменшують тепловий слід під час руху, наприклад, шляхом уникнення режимів перевантаження (перегріву) двигунів без наявної потреби під час виконання бойового завдання також можуть сприяти зниженню ймовірності виявлення.

В залежності від призначення МБеНА склад системи може змінюватися для забезпечення успіху виконання бойового завдання. Система маскування від термографічних приладів спостереження повинна застосовуватися під час проведення операції в комплексі (співпрацювати) з іншими системами радіолокаційного маскування, акустичного та візуального приховування МБеНА.

Список посилань

1. ДСТУ В 20.39.101:2021. Комплексна система загальних технічних вимог до озброєння та військової техніки. Основні положення. - Чинний від 2022-08-01. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 13с.
2. Багатошаровий камуфлюючий матеріал : пат. №100388 Україна. №U201500592; заявл. 26.01.2015 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 17 с.
3. Маскувальний матеріал : пат. №116139 Україна. №U201611671; заявл. 18.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. 12 с.

УДК 681.587.72

Валецький Б.П., канд. техн.наук, доцент

Літвінчук С.М., аспірант

Луцький національний технічний університет, b.valetsky@gmail.com

АЛГОРИТМ ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ

Мехатроніка є міждисциплінарною галуззю інженерії, що поєднує механічні, електронні, інформаційно-вимірювальні та комп'ютерно-керуючі системи. Сучасні вимоги до автоматизованих технічних засобів вимагають системного підходу до проектування мехатронних модулів, який забезпечує ефективну, надійну та економічно доцільну реалізацію заданих функцій.

Проектування мехатронного модуля ґрунтується на послідовному виконанні функціонального, структурного та конструктивного аналізу і синтезу. Такий алгоритм дозволяє перейти від абстрактного опису призначення модуля до його фізичного втілення у вигляді конкретної технічної конструкції. Для цього використовують взаємопов'язані функціональну, структурну та конструктивну моделі, що дає можливість систематизувати проєктні рішення та застосовувати методи автоматизованого проектування [1].

Вихідною ланкою процесу є функціональний аналіз, під час якого визначається основна мета мехатронного модуля, умови його взаємодії із зовнішнім середовищем та вимоги до вхідних і вихідних параметрів. Функція розглядається як визначальна категорія проектування, оскільки саме вона задає напрям формування структури та подальших конструктивних рішень. Одна й та сама функція може бути реалізована різними структурними схемами та конструктивним виконанням, тому структура і конструкція завжди є підпорядкованими функціональному призначенню.

Наступним кроком є структурний опис мехатронного модуля, що визначає склад системи та зв'язки між її елементами. Саме на цьому рівні відбувається узгодження функціональних перетворень із конкретними підсистемами. Функціонально-структурний підхід дозволяє

оцінити, наскільки вибрана структура відповідає заданій функції, і забезпечує основу для подальшого конструктивного опрацювання.

Подальший етап пов'язаний із конструктивною реалізацією вибраної структури. На цьому рівні визначаються матеріали, типи механічних вузлів, приводів, датчиків і систем керування, а також враховуються вимоги щодо маси, габаритів, міцності, точності та енергоефективності. Проектні рішення повинні відповідати принципу функціональної доцільності, тобто забезпечувати виконання поставленої задачі без надлишкових витрат ресурсів і ускладнення конструкції [2].

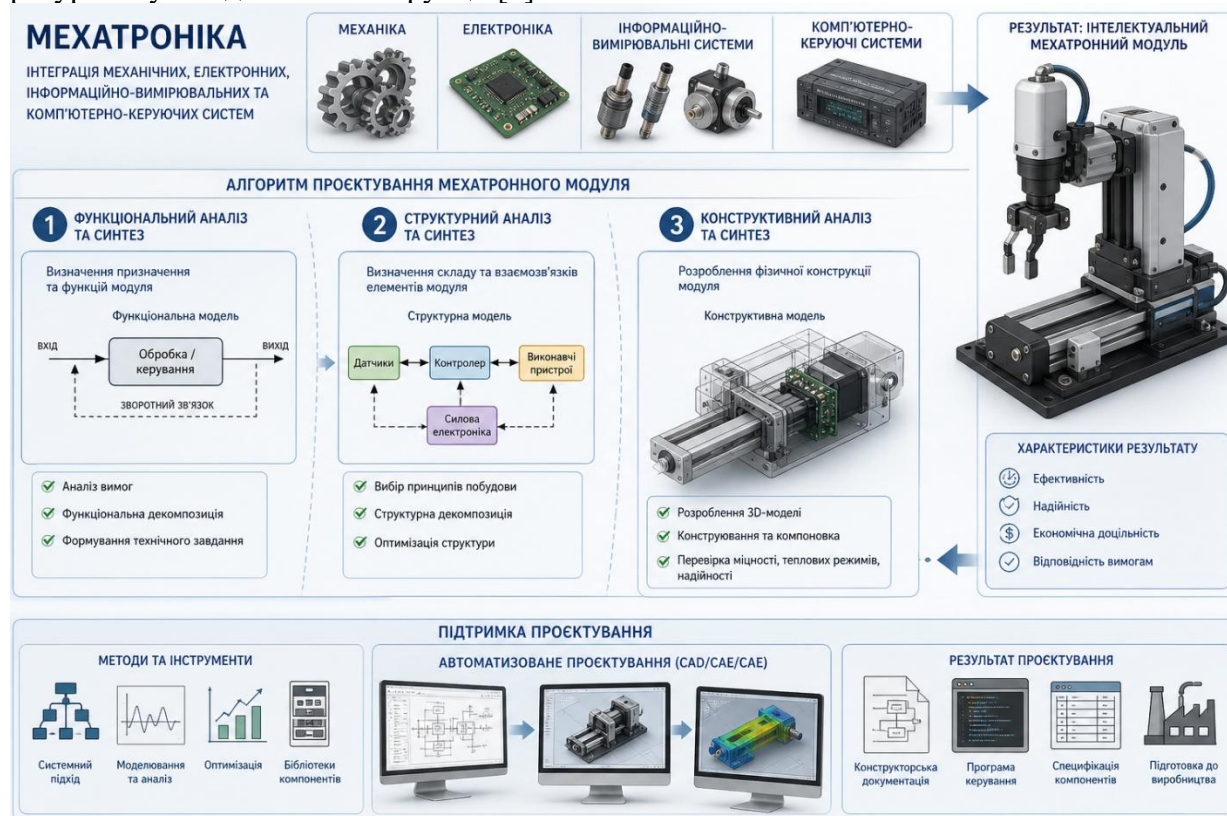


Рис.1 – Алгоритм проектування мехатронного модуля

Ефективне проектування мехатронних модулів вимагає багатовимірною інженерного мислення, яке охоплює не лише просторові параметри, а й часові фактори, перспективи розвитку технологій, властивості матеріалів та умови експлуатації. Для успішної реалізації функцій однаково важливими є конструкція, матеріали й технологія виготовлення. Механічна, інформаційно-вимірювальна та комп'ютерно-керуюча підсистеми мехатронного модуля є рівнозначними та повинні розглядатися як єдине ціле [3].

На функціональному рівні мехатронний модуль часто подають у вигляді системи типу «чорний ящик», яка перетворює інформацію про програму руху у направлений керований механічний рух. Керування може здійснюватися комп'ютером або оператором, а реалізація руху відбувається за участю механічної підсистеми, що взаємодіє з об'єктами зовнішнього середовища. Для забезпечення стабільної роботи необхідною є інформаційна зворотна взаємодія, яка дозволяє оцінювати стан модуля та умов виконання руху в реальному часі.

Окрім основної функції керованого руху, сучасні мехатронні системи виконують низку додаткових функцій, зокрема самодіагностику, обмін інформацією з іншим обладнанням, адаптацію та реконфігурацію. Проте саме реалізація функціонального руху є визначальною, оскільки вона формує поведінку мехатронної системи у зовнішньому середовищі.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що проектування мехатронного модуля є ієрархічним процесом, у якому функція визначає структуру, а структура – конструкцію.

Дотримання функціонально-структурного підходу забезпечує створення ефективних, інтегрованих і конкурентоспроможних мехатронних систем.

Список посилань

1. Валецький Б.П. Моделювання мехатронного модуля переміщення / Валецький Б.П. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС –2022) : матеріали тез доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» – Чернігів :НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 1. –с 97.
2. Інжиніринг планетарного редуктора у SOLIDWORKS /Б.П. Валецький, Т.І. Четвержук, В.А. Єрьомін, С.П. Шимчук // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 2025, №81 с.127-132 / URL: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.81.19>
3. Валецький Б.П. Механотроніка складу / Б.П. Валецький // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Випуск 66 . – Луцьк, 2019. – С.46-52. / URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/issue/view/37/43

УДК 621.9

Летюк В.І., аспірант

Ключко О.О., докт. техн. наук, професор

Шелковий О.О., докт. техн. наук, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

pirit.nrg.13@gmail.com

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ФОРМУВАННЯ ГРУПОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ РІЗАННЯМ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «РОБОЧА ЛОПАТКА» ПАРОВОЇ ТУРБІНИ

Робочі лопатки є ключовими елементами парових турбін, що визначають їх ефективність, економічність і надійність. Вони працюють у складних умовах: високі температури, відцентрові сили, вібрації, резонансні коливання, корозія та ерозія. Це зумовлює складність їх конструкції та високі вимоги до точності виготовлення. Робочі лопатки складається з робочої частини, хвостовика для кріплення на диску та головки, яка може бути бандажем, шипом для встановлення бандажу, кінцевим звуженням, тощо. Дрібні та середні лопатки парових турбін мають переважно постійний профіль, великі - змінний. Для останніх ступенів ротора низького тиску турбін характерні великі розміри та значне скручування профілю, що створює технологічні труднощі для їх виробництва.

Виробництво лопаток вимагає суворого дотримання креслень, допусків і вимог до шорсткості поверхонь, адже відхилення можуть спричинити додаткові напруження, підвищену ерозію, аварійні ситуації та зниження ККД турбіни. Найбільш відповідальною частиною є хвостові з'єднання робочих лопаток з допусками по опорним поверхням 0,02-0,03 мм. Матеріали для лопаток повинні забезпечувати термостійкість, міцність, пластичність, витривалість і стійкість до корозії та ерозії. Для цього використовуються спеціальні нержавіючі сталі та титанові сплави, що відзначаються високою корозійною та ерозійною стійкістю, але в той же час потребують складних режимів обробки та спеціального інструменту.

Аналіз креслень і технологічних процесів показує, що лопатки парових турбін, незважаючи на їх велику номенклатуру та різноманітність конструкцій, можуть бути типізовані за своїми характеристиками: призначенням, типом конструктивних елементів (хвостовика, робочої частини, головки), тощо. Кожному типу відповідає певний технологічний процес обробки, а конструктивні елементи (хвости, робочі частини, головки) мають типові послідовності операцій. Групування лопаток дозволяє типізувати та стандартизувати технологічні процеси, скоротити номенклатуру інструментів та оснащення, оптимізувати використання обладнання й створити умови для впровадження автоматизації. Типізація технологічних процесів забезпечує підвищення продуктивності праці, зниження вартості деталей, нормалізацію інструменту та оснащення.

Організаційно-технічними передумовами створення групового автоматизованого виробництва лопаток парових турбін є наявність уніфікованих конструктивних елементів, можливість класифікації лопаток за типами та впровадження систем автоматизованого проектування й управління виробництвом. Технологічні передумови включають розробку стандартних процесів для груп деталей зі складним профілем, застосування верстатів з числовим програмним керуванням та використання імітаційного моделювання для оптимізації маршрутів обробки.

Використання імітаційного моделювання у процесі розробки та впровадження групових технологій забезпечує прогнозування ефективності виробничої системи, вибір оптимальних маршрутів та оцінку техніко-економічних показників. Такий підхід дозволяє підвищити продуктивність і якість виготовлення лопаток, забезпечити гнучкість виробництва та його відповідність сучасним вимогам енергетичного машинобудування.

Список посилань

1. Letiuk V. "Laser measuring systems in the production of steam turbine blades". X International Scientific and Practical Conference "Science and Practice implementation to modern society", June 4-5, 2021 in Manchester, Great Britain – С. 655-657.

2. Ищенко Г.И., Ищенко М.Г. Технологические возможности ПАО «Турбоатом» /ISSN 2078-7677. Високі технології в машинобудуванні, Харків, - НТУ «ХПІ», 2015, випуск 1 (25) – С. 3-17.

3. Sergey Dobrotvorskiy, Yevheniia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkovyi. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Cioboată D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.

УДК 681.6

Кохановський В. О., канд. техн. наук, доцент

Семеніщева А. Д., студентка

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, kokhanovskyi@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ТРАФАРЕТНОГО ДРУКУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ДОЗУВАННЯ ФАРБИ

Трафаретний друк залишається одним із універсальних способів нанесення зображення на різноманітні матеріали: текстиль, пластик, скло, електронні плати тощо. Асортимент фарб відповідно різноманітний [1]. Дуже часто використовуються спеціальні фарби, адаптовані до відповідних виробів.

Незважаючи на технологічні переваги у асортименті задруковуючих матеріалів, сучасні трафаретні машини мають низку недоліків, одним із яких є нестабільність подачі фарби у друкарську зону. У більшості випадків процес подачі здійснюється вручну або з мінімальною автоматизацією, що негативно впливає на якість друку та призводить до перевитрати фарби. Аналіз досліджень у цій сфері показує, що автоматизовані системи подачі фарби запроваджені в офсетному та флексографічному друці, де застосовуються складні технічні рішення щодо дозування та контролю витрати фарби [2]. У цей же час, у трафаретному друці подібні дослідження та відповідні технічні рішення залишаються обмеженими.

На сучасному етапі розвитку поліграфічного обладнання у суміжних видах друку вже застосовуються автоматизовані системи дозування фарби. Зокрема, у офсетному друці широко використовується система Heidelberg Prinect Inking System, яка забезпечує зональне регулювання подачі фарби з високою точністю [3]. Дана система дозволяє автоматично підтримувати необхідну кількість фарби у кожній зоні друку, що значно підвищує стабільність процесу та якість відбитків. У промислових системах подачі речовин широко застосовуються високоточні дозуючі установки, наприклад Graco Precision Dispense System,

які забезпечують стабільну витрату матеріалу незалежно від зовнішніх умов [4]. Подібні принципи реалізовані також у системах точного дозування, таких як Nordson EFD Liquid Dispensing System, які використовуються для подачі клеїв, фарб та інших в'язких матеріалів [5]. Використання подібних систем у трафаретному друці може забезпечити контроль подачі фарби в корито та підтримання її постійного рівня, що є важливим фактором стабільності процесу друку.

На основі аналізу існуючих рішень запропоновано використання комбінованої системи подачі фарби, що поєднує принципи зонального регулювання (характерного для офсетного друку) та точного дозування рідин (застосовуваного у промислових установках) (рис.1). Система передбачає використання датчика рівня фарби у кориті та дозуючого насоса, що забезпечує автоматичну подачу фарби залежно від інтенсивності друку. Такий підхід дозволяє підвищити стабільність процесу та зменшити вплив людського фактору.

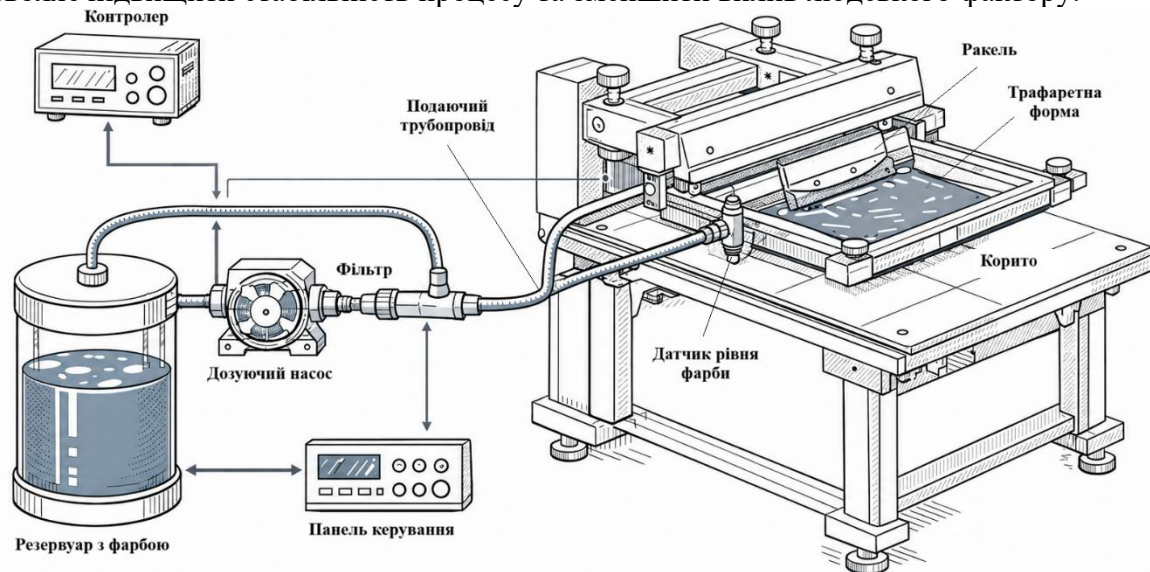


Рис. 1 – Запропонована система подачі та дозування фарби у корито трафаретної машини

Запропонована система працює за принципом замкненого циклу регулювання подачі фарби. Фарба з резервуара подається за допомогою дозуючого насоса через фільтр та трубопровід у фарбове корито трафаретної машини. У кориті встановлений датчик рівня фарби, який безперервно контролює її кількість. Сигнал від датчика надходить до контролера, який аналізує поточний стан системи. У разі зниження рівня фарби нижче заданого значення контролер подає сигнал на насос, що забезпечує додаткову подачу фарби. При досягненні необхідного рівня подача автоматично припиняється. Таким чином забезпечується підтримання стабільного рівня фарби у друкарській зоні, що сприяє підвищенню якості друку та зменшенню витрат матеріалу.

Таким чином, використання принципів дозування рідин у технічних рішеннях із суміжних галузей є перспективним напрямом розвитку трафаретного друку та потребує подальшого дослідження.

Список посилань

1. Handbook of print media : technologies and production methods / ed. H. Kipphan. – Berlin: Springer, 2001. – 1200 p.
2. LUMINITE PO ink transfer optimization [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/503815928/LUMINITE-PO-INK-TRANSFER-OPTIMIZATION>
3. Heidelberg. Prinect inking system [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.heidelberg.com>.
4. Graco Inc. Fluid dispensing systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.graco.com>.
5. Nordson EFD. Precision dispensing systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nordson.com>.

УДК 622.24.053.3:539.62

Слабий О. О., канд. техн. наук, докторант

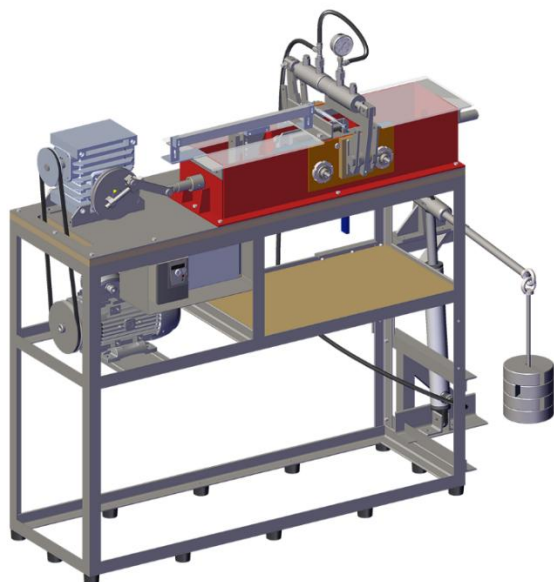
Гриджук Я.С., докт. техн. наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, burewisnyk@gmail.com

УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ ІЗ ГІРСЬКОЮ ПОРОДОЮ

Горизонтальне та похило-скероване буріння супроводжується виникненням значних сил осьового опору, для протидії яким на сьогодні широко застосовують генератори осьових коливань. Для ефективного їх застосування варто проводити попереднє математичне моделювання процесу буріння, точність якого на пряму залежить від точності опису фрикційної взаємодії бурового інструменту із гірською породою. Зважаючи на об'ємність та багатфакторність задачі на сьогодні дана задача залишається невирішеною.

Нами розроблено лабораторну установку, що зображена на рис. 1, яка призначена для вивчення динаміки фрикційної взаємодії елементу бурового інструменту, що здійснює осьові коливання із зразками гірської породи в середовищі промивальної рідини для подальшого встановлення законів їх фрикційної взаємодії та чисельних значень відповідних коефіцієнтів.



а)



б)

Рис. 1 – Лабораторна установка: а) тривимірна модель б) фізична реалізація

Установка працює за принципом діаметрально протилежного притискання двох зразків гірської породи розмірами $170 \times 75 \times 40$ мм до елементу бурового інструменту, що здійснює коливний рух з наперед встановленою частотою та амплітудою в ванні заповненій промивальною рідиною. Як результат записуються значення зміни осьового зусилля, необхідного для забезпечення коливного руху бурового інструменту, його переміщення із точністю $0,005$ мм, нормальна сила контакту зразків породи із буровим інструментом, а також відносне переміщення зразків породи і температура промивальної рідини в часі з частотою 7200 показів в секунду та точністю 32 біти. Отримані значення дають змогу закономірності та чисельні характеристики динаміки фрикційної взаємодії в залежності від величини контактної сили, кінематики відносного коливного руху, температури промивальної рідини, площі контакту бурового інструменту із гірською породою для різних зразків гірської породи та промивальних рідин в умовах найбільш наближених до спорудження горизонтальних та похило-скерованих свердловин.

УДК 621.879.48.032.2-036.4:519.876.5

Слабий О.О., канд. техн. наук,
Гриджук Я.С., докт. техн. наук, професор,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, burewisnyk@gmail.com
Русаченко О.В., аспірант
Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро, rav@olis-group.com.ua

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОВША ФУТЕРОВАНОГО ГУМОТКАНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

На сьогодні для захисту ківшів навантажувальної техніки широко використовують армування із спеціальних зносостійких та твердих сталей і сплавів. Однак механічні властивості сучасних гумотканих дисперсно-армованих скло- або вуглеволоконном матеріалів відкривають можливість їх застосовувати, як футеровку, що володіє, за певних умов кращими показниками зносостійкості, зокрема при ударному навантаженні по нормалі, ніж сталь. Для перевірки даної гіпотези нами проведено чисельне моделювання процесу завантаження-розвантаження вапняку фракцією 75-100 мм ковшем колісного навантажувача задні і бокові стінки (як такі, що сприймають найбільші нормальні ударні навантаження) якого футеровані гумотканими елементами в середовищі дискретно-елементного моделювання (DEM). Стоп-кадри проведеної симуляції наведені на рис. 1.

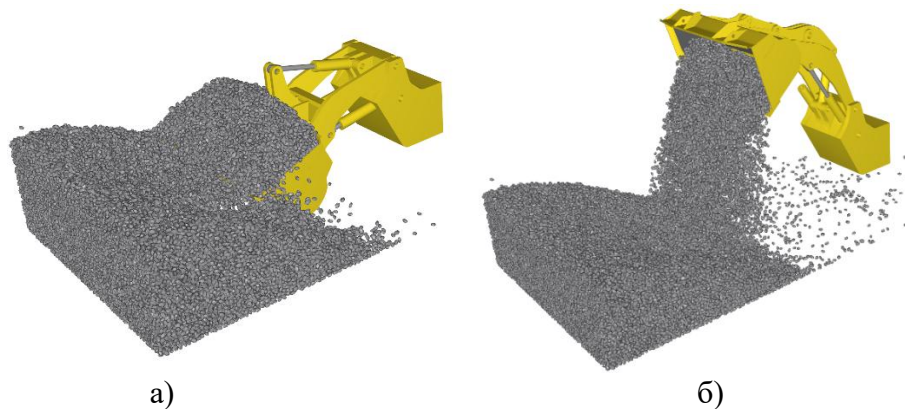


Рис. 1 – Стоп-кадри процесу моделювання процесу навантаження-розвантаження в середовищі дискретно-елементного моделювання

Отримана модель дає змогу моделювати взаємодію сипучого матеріалу із стінками ковша, визначати розподіл навантаження, що чиниться на ківш (рис. 2), а також визначати величину абразивного зносу ковша згідно обраної теорії. Отримані в результаті симуляції дані показують, що величина напружень, яка виникає в процесі взаємодії гумотканої футеровки із сипучим матеріалом не перевищує допустимі значення для гуми, а отже застосування гумотканих футеровок є теоретично можливим.

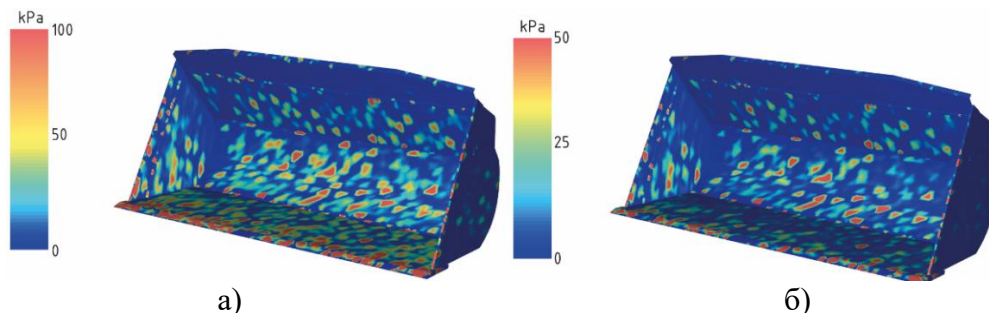


Рис. 2 – Розподіл напружень в елементах породи при їх ударній взаємодії зі стінками ковша в момент часу 3.0 с: а) – по нормалі, б) – по дотичній

УДК 621.9.022.2

Дядя С.І., канд. техн. наук, доцент
Козлова О.Б., канд. техн. наук, доцент
Тришин П.Р., канд. техн. наук
Крамаренко О.О., студент

Національний університет «Запорізька політехніка», kozlova@zntu.edu.ua

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗУВАННІ ДЕТАЛЕЙ З ТОНКОСТІННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ В УМОВАХ ДІЇ РЕГЕНЕРАТИВНИХ КОЛИВАНЬ

Деталі з тонкостінними елементами (ТЕД) широко застосовуються в високотехнологічній продукції електротехнічного та авіакосмічного призначення. До них відносять лопатки компресора, моноколеса, корпуси електронних компонентів, елементи крил та обшивки літаків, панелі та корпуси літальних апаратів, радіатори та теплообмінні пластини тощо. Більша частина операцій з їх оброблення припадає на фрезування кінцевими фрезами. При цьому ТЕД дуже чутливі до вібрацій, що виникають при різанні. Забезпечення стабільності фрезерування ТЕД кінцевими фрезами сприяє точності обробки за рахунок знання причин, що впливають на неї, і попередження їх впливу. Одна з них – це коливання деталі при різанні, які є невід’ємною його частиною. Для того, щоб призначити ефективні заходи впливу на них, треба знати їх види. Традиційно згадуються вимушені коливання та автоколивання або регенеративні коливання. Кожен з цих видів коливань має свою природу походження, що ускладнює розуміння їх спільності. Але результати досліджень, які наведені в роботі [1], показують, що при кінцевому фрезуванні ТЕД, коли працює один зубець фрези, можуть діяти тільки вимушені коливання, на які накладаються супроводжуючі вільні коливання (СВК). Саме СВК залишають хвилястість на поверхні різання, яка створює умови для обробки за слідом та збудження регенеративних коливань. Автоколивання при фрезуванні ТЕД не можуть виникнути по двом причинам. По перше, кожне врізання зубця фрези в деталь відбувається з ударом, тобто завжди присутній зовнішній збудник. По друге, час різання ТЕД одним зубцем дуже малий (не перевищує 0,003с) і його не вистачає для налаштування та встановлення сталих автоколивань). Дія вимушених коливань та СВК визначається через розподіл усього діапазону швидкостей різання на п’ять швидкісних зон коливань [2]. В першій, четвертій та п’ятій швидкісних зонах коливань діють тільки вимушені коливання. СВК в них відсутні. В першій зоні – через те, що імпульс сили при врізанні зубця фрези в деталь їх не збуджує. В другій та четвертій – через те, що час різання менший за період СВК, тобто для виникнення СВК не вистачає часу. Через відсутність хвилястості на поверхні різання при фрезуванні в перерахованих трьох зонах регенеративні коливання не виникають. Вони завжди виникають у третій швидкісній зоні коливань. При фрезуванні у другій швидкісній зоні коливань перевага надається попутному фрезуванню, яке через свої особливості дозволяє демпфувати СВК, неутворюючи хвилястість на поверхні різання. Для забезпечення якісної поверхні при фрезуванні у третій швидкісній зоні коливань радіальна та осьова глибини різання, подача на зубець приймаються мінімальними, а фреза обирається з найбільшим кутом нахилу гвинтової різальної крайки. Це дозволяє в умовах дії регенеративних коливань отримувати однакову глибину западин, що залишаються після подачі на зубець від поверхні різання і формують оброблену поверхню.

Список посилань

1. Dyadya S. Trishyn P. Regularities of Oscillations During Turning and End Milling / S. Dyadya, Y. Vnukov, O. Kozlova, P. Trishyn // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2024, – pp. 136–144. doi: 10.1007/978-3-031-42778-7_13

2. Dyadya S. Attendant Free Vibrations and Assessment of Their Influence on the Machined Surface Macrogeometry While End Milling / S. Dyadya, M. Frolov, S. Tanchenko, V. Solokha // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2025. pp. 327–337. doi:10.1007/978-3-031-95211-1_27

УДК 621.91.002

Стецько А.Є., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Львівська політехніка», andrew73@ukr.net

Дружб'як М.А., аспірант

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені

С.З.Гжицького, druzh.maks@gmail.com

ВИБІР КРИТЕРІЮ ОЦІНКИ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ЗМІЦНЕНИХ МЕТОДОМ Ni-Co-P ХІМІЧНОГО ПОКРИТТЯ ТА ДИФУЗІЙНОЇ ОБРОБКИ.

Труднощі виникають на етапі оцінки зносостійкості існуючих або нових покриттів (особливо гетерогенної структури). Зважаючи на широку різноманітність вихідних умов експлуатації, а саме: швидко-навантажувальних факторів PV, конструктивних типів трибоз'єднання (пряме чи обернене), характеру руху тертя (односторонній чи реверсивний), фізичних властивостей дифузійних шарів, умов змащування, температурного фактора, вибраної технології зміцнення системи “тіло–контртіло” (їхньої сумісності), різних схем тертя (“валик-втулка”, “диск-стержень” тощо) і т.д. складно підібрати надійні критерії оцінки зносостійкості зміцнюючих покриттів. Отож, прогнозувати зносостійкість пари тертя в цілому чи просто будь-якого покриття для широкого спектру умов експлуатації є майже неможливо (виняток становлять лише емпіричні напрацювання), проте можливим є оцінити як сумісність пари тертя, так і оптимальне співвідношення складових гетерогенного покриття, що дозволить даному покриттю теж зношуватись рівномірно, а не через руйнування однієї з фаз.

За основу береться оцінка стану субструктури матеріалу поверхні тертя через такі параметри: середній розмір блоків мозаїки D та мікропошкодження другого роду ϵ . Руйнування поверхні тертя (як суто фізичної, так і невеликого приповерхневого шару (в межах 3-5 мкм)) протікає через цикл “зміцнення матеріалу через нагартування – вичерпання запасу його в'язкості – відділення частинки зносу”. Даний цикл контролюється двома факторами, а саме: здатністю матеріалу до передеформування (здатність характеризується здебільшого його реологічними властивостями і можливістю багатократної реалізації циклу “напруга (ріст ϵ) – релаксація: падіння ϵ і як результат – подрібнення D”) та модулем зсуву. Іншими словами, існують матеріали з низьким модулем зсуву, але із значною здатністю до передеформації (тобто до великої кількості циклів “напруга – релаксація – подрібнення D”), що в певних умовах PV-фактора забезпечує їм великий ресурс зносостійкості і опір втомі. І навпаки, матеріали з високим модулем зсуву та низькою в'язкістю мають низьку здатність до нагартування, що, однак, не впливає на їхню високу зносостійкість, бо остання контролюється високим модулем зсуву. Тут потрібен набагато більший рівень напруг (ніж у випадку пластичніших матеріалів), які б призвели до акту “напруга – релаксація – подрібнення D”, що в майбутньому призведе до відділення частинки зносу. Поведінку покриттів з одного або з другого класу матеріалів можна оцінити завдяки аналізу параметрів субструктури, що дозволяє прогнозувати зносостійкість пари тертя, де тіло і контртіло зміцнені різними технологіями (тобто присутній фактор різноприродності поверхневих шарів) і службові характеристики яких контролюються різними факторами. Оцінимо працездатність не тільки гомогенного покриття, але й композитного (рис. 1), де зона 1 має композитну структуру: карбіди хрому Cr₇C₃ в матриці твердого розчину Cr в α -залізі товщиною 120-130 мкм [1, 2]. Залежності параметрів

субструктури D і ϵ від числа циклів-хитань для кожної з фаз (м'яка – карбіди хрому, тверда – твердий розчин хрому в α -Fe), які досліджувались представлені на рис. 2. Для обох випадків характерна монотонна зміна величин D і циклічна зміна ϵ . Звертає на себе увагу порівняно різке зменшення в процесі тертя значень D для твердого розчину хрому в α -Fe (від 200 нм до мінімальних значень порядку 18 нм).

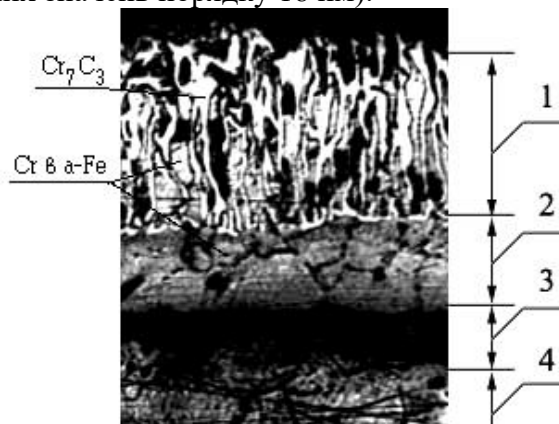


Рис. 1 – Мікроструктура дифузійного шару, сформованого на сталі 45 комплексною обробкою

В той же час відбувається більш плавна зміна D для Cr_7C_3 (від 130 до 20 нм). В останньому випадку в досліджуваному діапазоні циклів тертя мінімальні за розмірами фрагменти ще не сформовані.

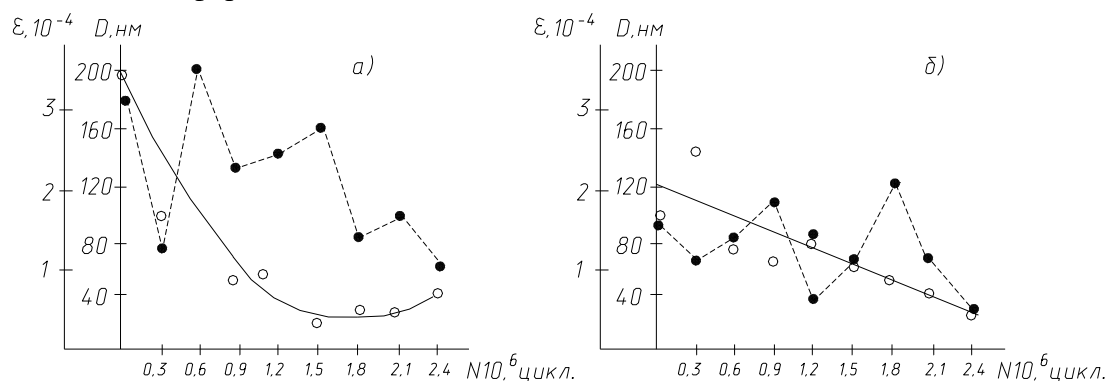


Рис. 2 – Зміна параметрів D та ϵ тонкої структури фази твердого розчину хрому в α -залізі (а) і карбідів хрому Cr_7C_3 (б) залежно від кількості циклів-хитань

Із збільшенням діючих напруг протікає відповідне зменшення розмірів фрагментів. Така закономірність спостерігається до певних діючих напруг σ_{max} , при яких формуються мінімальні за розміром фрагменти (розміри блоків мозаїки D). Подальше збільшення напруг $\sigma > \sigma_{\text{max}}$ не призводить до зменшення фрагментів, оскільки матеріал вичерпав запас в'язкості і його подальша фрагментація неможлива. При досягненні фрагментами поверхневого шару мінімальних значень протікає інтенсивне зношування останнього.

На основі проведених досліджень встановили, що зносостійкість поверхневого шару (для спрощення, припустімо, гомогенного) визначається вихідним запасом текучості $\sigma_{\text{в}}$ та його запасом в'язкості ($\sigma_{\text{к}} - \sigma_{\text{в}}$). Значення $\sigma_{\text{в}}$ незначним чином залежить від структури і визначаються силами міжатомних зв'язків. Значення $(\sigma_{\text{к}} - \sigma_{\text{в}})$, навпаки, суттєво залежить від структури металу і вказують на його здатність до деформаційного зміцнення (до збільшення щільності дислокацій ρ).

Список посилань

1. Stetsko A.E., Stetsko Y.T. (2020) Formation of Composite Reinforced Coating by Chemical Deposition and Chemical-Thermal Treatment of Boron and Carbon. In: Pogrebnjak A., Bondar O. (eds)

Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019). Springer Proceedings in Physics, vol 240. Springer, Singapore, P.261–270. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6_24.

2. Stetsko A.E., Stetsko Y.T. (2021) The Influence of Carbon, Carbon, and Boron on the Formation of Diffusion Nanocomposite Hardened Layers on the Surfaces of Steel Parts. In: Fesenko O., Yatsenko L. (eds) Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces, and Their Applications. Springer Proceedings in Physics, vol 246. Springer, Cham. P. 699-708. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6_47.

УДК 004.85:621.9

Сотниченко В.В., аспірант

Яковенко І.Е., канд. техн. наук, професор

Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, viktor.sotnychenko@mit.khpi.edu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ RAG ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Сучасне багатомовне машинобудування характеризується необхідністю швидкої та безпомилкової адаптації технологічних процесів під нові вироби. Етап технологічної підготовки виробництва (ТПП) є одним із найбільш трудомістких, оскільки інженерам-технологам доводиться опрацьовувати значні масиви неструктурованої інформації: складальні креслення, специфікації, операційні карти, ДСТУ, ГОСТи та інструкції з експлуатації обладнання. Хоча традиційні системи управління життєвим циклом виробу (PLM) та корпоративні архіви (ECM) забезпечують зберігання цих даних, пошук вузькоспеціалізованої релевантної інформації все ще залишається ручним та тривалим процесом [3].

Останнім часом великі мовні моделі (LLM) демонструють високі аналітичні здібності. Проте їх використання в ізольованому вигляді для серйозних інженерних задач є небезпечним через схильність до генерування недостовірної інформації ("галюцинацій") та об'єктивну відсутність доступу до закритих, специфічних баз даних підприємства [1]. Вирішенням цієї фундаментальної проблеми є впровадження архітектури RAG (Retrieval-Augmented Generation) – генерації, доповненої пошуком. RAG-системи інтегрують процеси інтелектуального інформаційного пошуку із генеративними можливостями LLM, забезпечуючи сувору фактологічну точність, яка критично важлива під час проектування та виробництва [2].

Базова архітектура RAG для потреб ТПП складається з кількох ключових етапів. На етапі індексації (Indexing) нормативно-технічна та інженерна документація (PDF-файли, відскановані креслення, нормативні таблиці режимів різання) конвертується в текст, розбивається на семантичні фрагменти (чанкінг) та перетворюється на математичні векторні подання (ембеддинги) за допомогою спеціалізованих моделей [1]. Далі ці вектори зберігаються у корпоративній векторній базі даних. Важливою особливістю інженерних RAG-систем є жорстка вимога до надточної екстракції та рендерингу даних: система повинна безпомилково розпізнавати табличні значення (наприклад, допуски та посадки) і розрізняти версії креслень, інакше згенерований контекст призведе до браку на виробництві [3].

На наступному етапі пошуку (Retrieval) запит технолога (наприклад, *"Підібрати параметри шпоночного паза та режими різання для вала Ø45 мм зі сталі 40Х"*) також векторизується. Система шукає найбільш релевантні фрагменти корпоративної бази знань, використовуючи математичні метрики семантичної близькості багатовимірних векторів [1]. Найпоширенішою базовою метрикою для пошуку технічної документації є косинусна подібність:

$$\text{Similarity}(A,B) = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{|A||B|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}}$$

де A – вектор-подання запиту інженера;

B – вектор фрагмента технологічного документа (наприклад, рядка з ГОСТ 23360-78);

n – розмірність векторного простору.

Чим ближче значення до 1, тим вища семантична відповідність документа до запиту [1].

На фінальному етапі (Generation) знайдений та відфільтрований контекст передається до LLM. Модель формує обґрунтовану технологічну відповідь, спираючись виключно на затверджені документи підприємства. Як показують дослідження впровадження систем RAG у сучасних колаборативних виробничих середовищах, збагачення документів спеціалізованими метаданими (теги конкретних типів верстатів, матеріалів, цехів) суттєво підвищує точність пошуку технічної інформації та дозволяє інтегрувати RAG безпосередньо у виробничий цикл для підтримки операторів верстатів з ЧПК [2, 3].

Для оцінки ефективності впровадження архітектури RAG на етапі технологічної підготовки наведемо порівняльну характеристику у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів доступу до технологічних даних під час ТПП

Характеристика	Класичний пошук (PLM/ERP)	Ізольована LLM (напр. ChatGPT)	RAG-архітектура
Основа для пошуку	Суворі ключові слова, теги	Внутрішня "пам'ять" моделі	Векторна база підприємства
Ризик критичної помилки	Низький (відповідальність людини)	Високий (генерація неіснуючих норм)	Мінімальний (генерація на базі факту)
Швидкість розробки ТП	Низька (потребує читання томів ГОСТ)	Висока	Дуже висока
Трасування джерела	Відсутнє при агрегації	Відсутнє	Присутнє (пряме посилання на сторінку ГОСТ/креслення)

Підсумовуючи, застосування архітектури RAG дозволяє трансформувати статичні паперові та цифрові архіви підприємства на динамічний інструмент підтримки прийняття рішень. Це суттєво зменшує час на рутинні операції пошуку під час розробки нових технологічних процесів та усуває ризик використання неактуальних машинобудівних нормативів. У кінцевому результаті, така автоматизація сприяє оптимізації фінансових витрат та підвищенню загальної якості проектування нових виробів. [2].

Список посилань

1. Politecnico di Torino. Retrieval-Augmented Generation (RAG) System for Manufacturing [Електронний ресурс] / Master's thesis. – 2026. – URL: <https://webthesis.biblio.polito.it/39991/1/tesi.pdf>
2. MDPI. Retrieval-Augmented Generation to Generate Knowledge Assets and Creation of Action Drivers [Електронний ресурс] / Applied Sciences. – 2025. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6247>
3. Adlib Software. RAG for Engineering Documentation [Електронний ресурс] / Adlib Glossary. – URL: <https://www.adlibsoftware.com/glossary/rag-for-engineering-documentation>

УДК 621.9

Швець Р. С., аспірант
 Дегтярьов І. М., канд. техн. наук, доцент
 Сумський державний університет, м. Суми, r.shvets@teset.sumdu.edu.ua

РОЗРАХУНОК НА ВІБРАЦІЙНУ НАДІЙНІСТЬ ШТИФТОВОГО КОНІЧНОГО З'ЄДНАННЯ ПІД ЧАС КОЛИВАНЬ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Підвищення якості технологічних процесів механічної обробки в сучасному машинобудуванні значною мірою залежить від точності базування заготовки, жорсткості технологічного оснащення та стабільності кінематичних з'єднань. Одним із важливих факторів, що впливають на точність обробки, є коливання, які виникають у зоні різання під дією змінних сил різання, динамічних навантажень та нестабільності процесу стружкоутворення. У результаті коливань можуть виникати відхилення геометрії обробленої поверхні, погіршення шорсткості, підвищення інтенсивності зношування інструмента, а також деградація вузлів технологічної системи.

Особливу увагу слід приділяти елементам верстатних пристроїв, що забезпечують точне позиціонування та повторюваність встановлення. Перспективним рішенням для систем зі змінними налагодженнями є використання штифтових конічних з'єднань, які поєднують функції базування та фіксації, забезпечуючи самоустановлення елементів з'єднання. Однак при роботі у вібраційних режимах можливе виникнення мікропроковзування в зоні контакту, що знижує жорсткість, призводить до появи люфту та поступового погіршення точності позиціонування.

Для оцінки вібраційної надійності у роботі використано математичну модель, де штифт і матриця конічного з'єднання розглядаються як система пружинно-демпферних елементів. Штифтове конічне з'єднання розглядається як еквівалентна маса m , що з'єднана з опорою через контактну жорсткість k_c та контактне демпфування c_c . Коливання задаються гармонічною складовою сили різання $F(t)$.

Рівняння руху системи:

$$m\ddot{x}(t) + c_c\dot{x}(t) + k_cx(t) = F(t) \quad (1)$$

де: $x(t)$ – відносне зміщення штифта в конічному отворі

m – приведена маса системи (штифт + частина пристрою);

k_c – контактна жорсткість конічного з'єднання;

c_c – коефіцієнт демпфування в зоні контакту;

$F(t)$ – збурювальна сила від процесу різання.

Вібраційна надійність з'єднання визначається умовою збереження контактної взаємодії без втрати жорсткості та без переходу до режиму мікропроковзування. Основний критерій працездатності з'єднання визначається амплітудою вимушених коливань $A(\omega)$:

$$A(\omega) \leq A_{dop} \quad (2)$$

де: A_{dop} – допустима амплітуда відносного зміщення (за вимогами точності пристрою);

ω – частота збурення.

Важливою умовою є відсутність мікропроковзування. Дотична складова динамічної сили не повинна перевищувати силу тертя в контакті:

$$F_t \leq \mu N \quad (3)$$

де: F_t – дотична сила;

μ – коефіцієнт тертя;

N – нормальна сила притискання.

Дотичну силу можна оцінити як інерційну складову:

$$F_t \approx m\omega^2 A(\omega) \quad (4)$$

Тоді умова стійкості контакту:

$$m\omega^2 A(\omega) \leq \mu N \quad (5)$$

Звідси видно, що підвищення сили притискання N або коефіцієнта тертя μ підвищує стійкість контакту, а збільшення частоти ω і амплітуди A сприяє переходу до режиму мікропроковзування.

Такий підхід дозволяє врахувати вплив зміни куту конусності, модуля пружності матеріалу та сили притискання на власні частоти та демпфіруючі властивості з'єднання. Результати моделювання показали, що оптимальне співвідношення геометричних параметрів штифта й конусного отвору здатне змістити власні частоти зони контакту за межі спектра збуджуваних частот різання, що зменшує амплітуду вібрацій в 1,5-2 рази в порівнянні зі стандартними (без конічного профілю) з'єднаннями.

Аналіз контактного тиску на поверхнях показав, що підвищення сили притискання зменшує локальні деформації і сприяє гасінню коливань, що узгоджується з даними інших досліджень щодо вібраційної поведінки конічних і фрикційних з'єднань. Це важливо для забезпечення стабільної якості обробки, оскільки нерівномірні коливання призводять до підвищеної шорсткості поверхні оброблюваної деталі.

Таким чином, проведений розрахунок та аналіз вібраційної надійності штифтового конічного з'єднання свідчать про його високу стабільність у умовах механічної обробки за умови правильного підбору геометричних та технологічних параметрів. Це дозволяє рекомендувати застосування таких з'єднань у високоточних пристроях технологічного оснащення для підвищення якості обробки та надійності процесу.

Список посилань:

1. З'єднання деталей машин / О.М. Хомяк, С.О. Ловейкіна. - Київ: КНУТД, 2002. - 63 с
2. Резерви підвищення гнучкості верстатних пристроїв механообробного виробництва / В.О.Іванов, В.Є.Карпуть, І.М.Дегтярьов // Вісник ЖДТУ - Серія "Технічні науки", 2016. -4(75), С.38-44.
3. Аналіз застосування конструкцій та області контакту штифтових конічних з'єднань з конусністю 1:50 / І. М. Дегтярьов, А. О. Нешта, М. П. Самардак, В. М. Кононович, П. В. Кушніров, В.М.Бага, Я.В. Клок // Технічні науки та технології. - 2021. - № 3(25). - С. 26-37
4. Герасько К.Р., Дегтярьов І.М., /Аналіз точності штифтових конічних з'єднань та особливості їх застосування // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво : матеріали ХІХ Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 25-26 листопада 2020 року) / редкол.: В. О. Залога, О. В. Івченко. – Суми : Сумський державний університет, 2020.- 183 с. С.22-24.

УДК 621.891

Петров О.Д., аспірант

Парненко В.С., канд.техн. наук, доцент

Корбут Є.В., канд.техн. наук, доцент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, petrovsasha69@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ТА ТОПОГРАФІЇ ДИСКРЕТНО МОДИФІКОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

У сучасному машинобудуванні та обробці полімерних композиційних матеріалів важливою задачею є підвищення надійності різального інструменту. Специфічні властивості ПКМ, такі як висока міцність, анізотропія та неоднорідність структури, спричиняють інтенсивне зношування робочих поверхонь інструмента. Тому актуальним

напрямом є пошук способів покращення експлуатаційних характеристик інструментальних матеріалів.

Ефективним методом вирішення цієї проблеми є застосування захисних покриттів дискретного типу [1]. Такі покриття підвищують твердість і зносостійкість поверхонь, зменшують тертя та температурні навантаження в зоні різання, а також сприяють стабільності формування оброблюваної поверхні. Додатковою перевагою є можливість зниження використання дороговартісних інструментальних сплавів.

Важливе значення має топографія модифікованого шару, сформованого методами PVD або CVD [2]. Мікрогеометрія поверхні визначає характер контактної взаємодії між інструментом і матеріалом, впливаючи на процес стружкоутворення, контактні напруження, тепловиділення та інтенсивність зношування. Формування оптимальної топографії сприяє зниженню коефіцієнта тертя та підвищенню ресурсу різального інструменту під час обробки ПКМ.

Ключові аспекти топографії:

- функціональні покриття застосовуються для підвищення стійкості різальних інструментів, що визначають верхній шар твердими або багатошаровими матеріалами.
- характеристики поверхні включають геометричні параметри, що визначають адгезію зносостійкість та теплофізичні властивості.
- вплив на знос через оптимізацію топографії передньої та задньої поверхонь (наприклад створення наноструктур) дозволяє знизити інтенсивність зносу та тертя.

Мікрогеометрія задньої поверхні різального інструменту суттєво впливає на його зношування під час обробки. У зоні контакту інструмента зі стружкою виникають інтенсивне тертя, тепловиділення та фізико-хімічна взаємодія матеріалів, що визначає довговічність інструменту.

Попереднє шліфування та полірування робочих поверхонь перед нанесенням покриттів дозволяє зменшити мікронерівності, знизити інтенсивність кратероутворення та послабити адгезійне зношування. Багатошарові покриття TiN, TiCN і TiAlN, сформовані методами PVD або CVD, підвищують твердість поверхні, термічну стійкість та створюють бар'єр для дифузійних процесів. Поєднання властивостей інструментальної основи та модифікованого поверхневого шару забезпечує покращення експлуатаційних характеристик різального інструменту. Водночас під дією механічних і теплових навантажень можливе виникнення когезійних тріщин і адгезійного відшарування покриття, що знижує ресурс інструменту.

Згідно дослідженням [3] $\sigma_{\text{п}}^{\text{еф}}$ – величина напружень, що діє в системі «основа-покриття» без виникнення процесу руйнування покриття:

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{еф}} = \sigma_{\text{п}}^{\text{зал}} + \sigma_{\text{п}}^{\text{експ}} \quad (1)$$

де, $\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}}$ – залишкові напруження в покритті,

$\sigma_{\text{п}}^{\text{експ}}$ – експлуатаційні напруження в покритті, що виникають під дією прикладеного навантаження.

Аналіз залежності (1) свідчить, що експлуатаційна надійність модифікованого шару на робочих поверхнях різального інструменту значною мірою визначається рівнем і характером залишкових напружень у системі «основа–покриття» [4]. Саме величина та знак цих напружень впливають на механізм руйнування покриття під час роботи інструмента. За наявності залишкових напружень розтягу в поверхневому шарі ще до початку експлуатації можуть виникати мікротріщини, якщо їх значення перевищує границю міцності матеріалу покриття.

Формування залишкових напружень обумовлюється низкою технологічних факторів, серед яких основними є різниця коефіцієнтів теплового розширення матеріалу основи та покриття, структурна неоднорідність конденсату, а також дефекти, що виникають у процесі осадження. Термічна складова напружень виникає внаслідок нерівномірної деформації

матеріалів під час охолодження від температури нанесення покриття до температури експлуатації.

Для підвищення ефективності використання модифікованого інструменту під час обробки полімерних композиційних матеріалів необхідно вирішити ряд взаємопов'язаних задач: обґрунтувати склад захисного зносостійкого покриття, визначити напружено-деформований стан (НДС) поверхневого шару після нанесення та розробити конструкцію модифікованого покриття з урахуванням забезпечення його когезійної міцності.

Вибір оптимального покриття є багатокритеріальною задачею, що залежить від властивостей інструментального матеріалу, характеристик заготовки та умов різання. Основними критеріями є теплостійкість, твердість і зносостійкість, низький коефіцієнт тертя, висока адгезійна міцність і хімічна інертність покриття. Сукупність цих параметрів визначає здатність покриття протидіяти абразивному зношуванню, термічним навантаженням і небажаним фізико-хімічним взаємодіям у зоні різання.

Під дією зовнішніх і внутрішніх напружень у покритті можуть виникати когезійні тріщини та локальне руйнування поверхневого шару. При цьому стискаючі залишкові напруження, характерні для PVD-покриттів, сприяють підвищенню довговічності інструмента, оскільки перешкоджають розвитку тріщин, зменшують відшарування та інтенсивність зношування.

Висновки. Під час вибору або розроблення функціональних покриттів для різального інструменту основну увагу приділяють формуванню залишкових стискаючих напружень, оскільки саме вони забезпечують підвищення довговічності інструмента в умовах циклічних та ударних навантажень. Наявність стискаючих напружень перешкоджає розвитку мікротріщин, зменшує ймовірність відшарування покриття та сприяє стабільності процесу різання. Запропонований підхід дозволяє підвищити зносостійкість різального інструменту на 30–50 % завдяки формуванню локально зміцнених зон на робочих поверхнях. Конструкцію покриття визначено на основі розрахунку напружено-деформованого стану системи «основа–покриття», а параметри дискретного шару, такі як щільність, геометричні розміри та характер розподілу було обрано з урахуванням мінімізації ризику когезійного розтріскування.

Список посилань

1. Корбут Є. В., Парненко В. С., Ніколаєнко Т. П., Даниленко О. В. Архітектура дискретного покриття робочих поверхонь інструменту для різних схем різання // *Технічні науки та технології*. – 2024. – № 4(38). – С. 44–56.
2. Корбут Є. В., Парненко В. С., Плівак О. А., Ніколаєнко Т. П. Визначення розмірів дискретних ділянок покриття інструменту для обробки полімерних композитів // *Вісник ХНТУ*. – 2025. – № 2(93), ч. 1. – С. 102–110.
3. Антонюк В. С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу : дис. д-ра техн. наук. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – 375 с
4. Корбут Є. В., Петров О. Д. Вибір складу та топографії модифікованого поверхневого шару інструмента для обробки полімерних композитів // *Technical Sciences and Technologies*. – 2026. – № 1(43). – С. 79–89. – DOI: 10.25140/2411-5363-2026-1(43)-79-89.

УДК 621.923

Погребняк Р.П., канд. техн. наук., доцент

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, pogrebnyakk@ukr.net

ТОЧНІСТЬ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ ЗАЛІЗНИЧНОГО КОЛЕСА ТА НЕОБХІДНІ ВЛАСТИВОСТІ САМОВСТАНОВЛЮВАНИХ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ МЕХАНІЗМІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ-ВИВАНТАЖЕННЯ КОЛІСНОЇ ЗАГОТОВКИ

Токарну контурну обробку фасонної поверхні прокатаних заготовок залізничних коліс в умовах масового виробництві виконують на карусельних верстатах. Застосовуються важкі одне- або двохстoeчні карусельні верстати із двома-чотирма супортами, які оснащені електрокопіювальними пристроями або ПЧПК та зрівноваженими важкими боковими супортами.

Одним з найважливіших показників динамічної якості верстатів є точність обробки, що визначається відносним зсувом інструмента й деталі по нормалі до обробленої поверхні. У важконавантажених верстатах вирішальний вплив на точність обробки складають динамічні й пружні погрішності. При обробці окремих ділянок колеса нерідко спостерігаються значні відхилення геометрії отриманої поверхні від заданої, відзначені також «врізи» в поверхню гребня колеса, що приводить до відбраковування коліс і повторному переточуванню. Такого роду помилки копіювання обумовлені низькою динамічною точністю переміщення та позиціювання супорта і повзуна верстата.

Під дією сил різання змушені коливання роблять інструмент і щуп, які закріплені на одному супорті. Пружна деформація супорта впливає на взаємне розташування щупа і копіра: при досягненні величини більшої, чим зона нечутливості щупа (адаптера) подається помилковий сигнал на переміщення супорта, що й викликає погрішність.

Негативний вплив на точність оказує нераціональність схеми обробки, яка проявляється тим, що складові сили різання супортів спрямовані на відрив колеса від планшайби й супортів від напрямних. Ця обставина істотно впливає на утворення підвищених зазорів і значно знижує стійкість напрямних і ходових гвинтів. Однієї з головних причин невисокої точності обробки є недостатній облік специфічних особливостей динамічних процесів при формоутворенні профілю за обраною схемою обробки.

Для оцінки динамічної точності обробки створені пружні нелінійні динамічні моделі супорта і повзуна та складені і вирішені рівняння руху мас та навантаження зв'язків. Визначено, що при обробці гребня колеса радіальна й осьова складові сили різання, що навантажують супорт і повзун верстата, знакозмінні і виникають умови, при яких у приводі подачі супорта й повзуна розкриваються зазори, причому це можливо при отриманні будь-якої геометрії профілю колеса. Особливості навантаження супорта й повзуна, що формують гребінь реального (з бігармонійним припуском) колеса ведуть до виникнення ділянок обробки, на яких відбувається багаторазове розкриття зазорів у передачах приводів подач і збільшується помилка формоутворення. Моделюванням визначені якісні й кількісні умови, при яких нестійкий рух супорта і повзуна з перекладанням зазорів не відбувається.

Сучасні виробництва з механічної обробки коліс складаються з роботизованих комплексів або автоматизованих поточкових ліній на основі спеціальні колісотокарних верстатів. У Чехії компанія "TOSHULIN" випускає спеціальні токарно-карусельні верстати SCI12CNC, включених в автоматичну лінію із двох верстатів, маніпуляторів для виконання операції завантаження-вивантаження, транспортних рольгангів. В Німеччині поточкові лінії комплектуються токарно-карусельними напівавтоматичними електрокопіювальними верстатами фірми "W.Hegenscheidt KG", до складу якої входять шість токарно-карусельних верстатів, два порталних механізми автоматичного завантаження-вивантаження із системою замірювання та ідентифікації колеса.

Маса чорнового необробленого колеса складає біля 500 кг, тому до захоплювального пристрою маніпулятора або механізму завантаження-вивантаження висуваються вимоги по забезпеченню надійності затиску і утримання колеса, стабільності базування, неприпустимості пошкоджень об'єкта маніпулювання. Базування й закріплення колеса-заготовки на планшайбі верстата впливає на сталість і величину припуску та наведеної глибини різання. Міцність ланок пристрою повинна бути достатньою при мінімальних розмірах і масі. Найважливішими вимогами до захватних пристроїв є утримання об'єкту під час розгону та гальмування руки маніпулятора та збереження деталі та її поверхні під час її затискання й переміщення. Жорсткий затиск важкого колеса-заготовки механічним схоплювальним пристроєм утримує об'єкт завдяки кінематичній дії робочих елементів з допомогою сил тертя та затискних зусиль.

У виконавчих механізмах бажано, щоб потужність приводу була сталою, а енергетичні витрати мінімальними, тому важливо щоб швидкість затискних елементів в момент контакту з об'єктом маніпулювання була сталою та мінімально можливою для уникнення динамічних перенавантажень. З цієї ж причини кутові швидкості та кутові пришвидження вихідних ланок механізму також повинні бути мінімальні. Тобто бажано, щоби швидкісна передавальна функція механізму була не тільки постійною, але ще й близькою до одиниці, що збільшує енергетичну якість передавання руху.

Можливе внесення при проектуванні захоплювального пристрою надлишкових в'язів суттєво зменшує надійність та безвідмовність експлуатації такого механізму. Наявність у механізмах надлишкових в'язів робить схему статично невизначеною з виникненням додаткових реакцій, що не викликані дією зовнішніх сил. Збирання та рух механізму механізмів з дефектами структури без примусу можливий тільки при високій точності виготовлення деталей і рухливих з'єднань, за наявності зазорів або за рахунок деформації ланок. Тому для отримання більш ефективного й надійного захоплювального механізму його проектування доцільно здійснювати за схемами, які позбавлені шкідливих надлишкових зв'язків (самовстановлювані механізми).

Список посилань

1. Погребняк Р.П. Пружна нелінійна динаміка руху супорта карусельного верстата для обробки суцільнокатаних залізничних коліс / Р.П. Погребняк // Наука та прогрес транспорту. – 2017. - № 4 (70). – С.98-105. doi.org/10.15802/stp2017/109606
2. Pogrebnyak R. Load and shaping precision of a complex railroad-wheel surface / R. Pogrebnyak // Russian engineering research. Allerton Press, Inc., New York. - 2012. Т. 32. - №4. pp.407-411. doi.org/10.3103/S1068798X12040211.
3. Погребняк Р.П. Динамічні властивості пружної системи приводу важкого карусельного верстата для обробки залізничних коліс / Р.П. Погребняк // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2017.- Вип.27 – С.146-153.
4. Погребняк Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез стрижньового кулісного механізму захвата / Р.П. Погребняк // Підйомно-транспортна техніка. 2017. - № 2 (54).- С. 47–56.
5. Погребняк Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез спареного стрижньового кулісного механізму захвата робота / Р.П. Погребняк // Підйомно-транспортна техніка. 2017. - № 4 (56).- С. 57–65.
6. Погребняк Р.П. Пошук й усунення повторюваних зв'язків у схемі прямого кривошипно-повзункового механізму захоплювального пристрою / Р.П. Погребняк, М.Р. Погребняк // Наука та прогрес транспорту. – 2020. – №3 (87), – С. 129-137. doi.org/10.15802/stp2020/199726
7. Zdanevich S.S., Structural analysis and rational design of mechanisms of crossroll tube straightening machines. / Zdanevich S.S., Pogrebnyak R.P., Zdanevich S.V. // Science and Transport Progress. – 2018. – №5 (77), – P.65–73. doi.org/10.15802/stp2018/147630

УДК 621.869.85

Носов О.В., аспірант

Ковальов Ю.А., канд. техн. наук, доцент

Київський національний університет технологій та дизайну, nosov.ov@knutd.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ РУХУ В СТІЧКОВИХ КОНВЕЄРАХ

Стрічкові конвеєри є одним з найбільш поширених засобів транспортування в промисловості. Значні робочі навантаження та велика протяжність конвеєрних ліній обумовлюють високий рівень енергоспоживання. Показник споживання енергії впливає на собівартість продукції та обумовлює економічну ефективність підприємства, промисловості, тому дослідження факторів, що впливають на рівень споживання енергії стрічкових конвеєрів є актуальним науково-технічним завданням.

У процесі руху стрічки конвеєра відбувається циклічна деформація гумового шару стрічки від впливу ваги об'єкту транспортування, що супроводжується внутрішнім тертям у матеріалі та втратами енергії. Отже для заощадження енергії необхідно проаналізувати силу тертя, яку зазнає конвеєрна система під час роботи [1-6].

Опір коченню при вдавлюванні є домінуючою складовою сил тертя у стрічкових конвеєрах та становить понад 60% сумарних втрат енергії. Зменшення даного виду опору дозволить суттєво знизити споживання енергії [1-6].

Зазвичай стрічка конвеєру легкої промисловості складається з трьох шарів. Перший і третій шари називають верхній та нижній покривними шарами, основним матеріалом яких є гума або полімерні композитні матеріали. Верхній шар виконує транспортну функцію, та сприймає основне навантаження від маси об'єкту транспортування, нижній покривний шар передає навантаження на ролики конвеєра. Другий шар – серцевина стрічки.

Ролик взаємодіє з нижнім шаром стрічки та вантажем, що знаходиться на ній. У зоні взаємодії ролика та еластичного матеріалу, з якого виготовлено нижній шар стрічки, виникає момент опору коченню при вдавлюванні, зумовлений в'язкопружними властивостями матеріалу [1-6].

Формули опору коченню при вдавлюванні мають розбіжності у різних авторів в залежності від в'язкопружних характеристик матеріалу з якого вироблено ролик та стрічка. Багатoeлементна модель Максвела дозволяє комплексно врахувати фактори, що впливають на виникнення опору кочення при вдавлюванні. На рис. 1 відображено принципову схему взаємодії ролика з конвеєрною стрічкою [4].

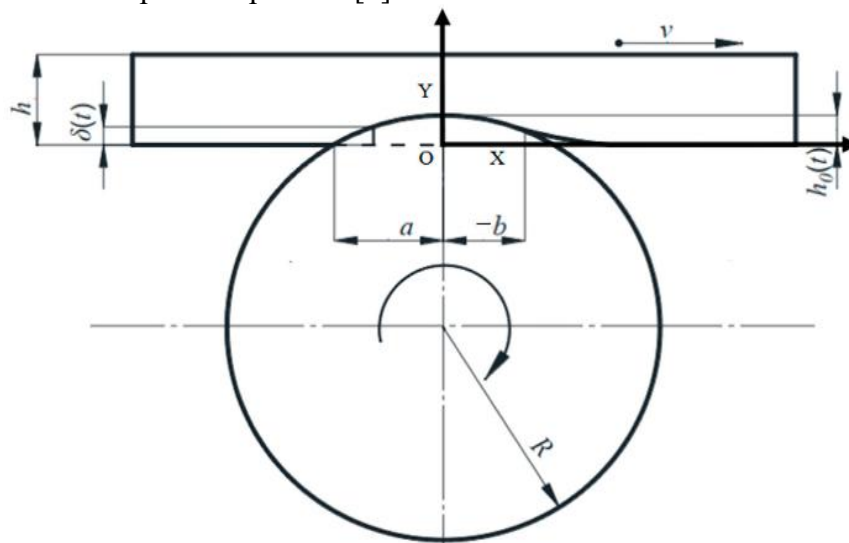


Рис. 1 – Принципова схема конвеєрної стрічки та натяжного ролика

На рис. 1 наведено наступні позначення:

h – товщина конвеєрної стрічки;

t – час роботи конвеєрної стрічки;

$\delta(t)$ – глибина заглиблення з абсцисою $a - vt$;

$h_0(t)$ – глибина занурення в точці де абсциса дорівнює 0;

a – абсциса, що відповідає точці стикання стрічки з роликом;

b – абсциса, відповідає точці відокремлення від ролика;

R – радіус ролика.

Швидкість деформації нижнього покривного шару стрічки в даний момент часу t , може бути описана залежністю:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{v(a - vt)}{Rh}$$

Формула напруження у в'язкопружних матеріалах визначається за формулою [4]:

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \xi) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi = \int_0^t \left(E_0 + \sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t-\xi}{\tau_i}} \right) \frac{v(a - v\xi)}{Rh} d\xi$$

де: t – час випробування та час роботи конвеєрної стрічки;

$E(t)$ – функція модуля релаксації гуми конвеєрної стрічки в момент часу t ; N представляє кількість моделей Максвелла;

E_i – модуль пружності та спектральна сила релаксації i -ї пружини в $2N+1$ узагальненої моделі Максвелла;

τ_i – це відношення в'язкості i -го липкого горщика до E_i -ї пружини, який також відомий як i -й час релаксації; E

0 – значення $E(t)$, коли час нескінченний, тобто рівноважний модуль.

Підставивши рівняння можна отримати опір коченню при вдавлюванні.

Опір коченню при вдавлюванні є визначальним фактором енергоспоживання стрічкових конвеєрів. Оптимізація параметрів та конструкції роликів, вибір матеріалів стрічки з низьким рівнем внутрішнього демпфування, вибір оптимальної швидкості стрічки конвеєру дозволяє підвищити енергоефективність транспортних систем.

Список посилань

1. C. Wheeler, P. J. Munzenberger Rolling resistance of steel cord conveyor belts due to indentation: pseudo-3D viscoelastic finite element analysis. Newcastle, New South Wales, Australia: Digital Repository of the University of Newcastle, 2008. Vol. 1.
2. C. Wheeler, P. J. Munzenberger Prediction of the influence of conveyor belt carcass properties on indentation rolling resistance. Würzburg : Vogel Transtech Publishing, 2009. Vol.
3. S. Hötte, S. von Daacke, L. Schulz, L. Overmeyer, T. Wennekamp Path to DIN 22123 – indentation rolling resistance of conveyor belts // Bulk Solids Handling. 2012. Vol. 32. P. 48–52.
4. Wan, L.; Lin, F. Simulation and Experimental Study on Indentation Rolling Resistance of a Belt Conveyor. Machines 2024, 12, 778. <https://doi.org/10.3390/machines12110778>
5. Z. Lu Calculation and analysis of the main resistance of long-distance belt conveyor // Coal Mining Machinery. 2019. Vol. 40. P. 1–3.
6. P. Munzenberger, C. Wheeler Laboratory measurement of indentation rolling resistance of conveyor belts // Measurement. 2016. Vol. 94. P. 909 – 918.

УДК 621.9-229 : 621.7.04

Похил А.В. аспірант
Яковенко І.Е. канд. техн. наук, професор
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
andrii.pokhyl@mit.khpi.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ТА ВИГОТОВЛЕННІ ЗАТИСКНИХ МЕХАНІЗМІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСНАСТКИ

Сучасне машинобудівне виробництво потребує підвищення ефективності та зниження витрат, що робить актуальним впровадження адитивних технологій (АВ) для виготовлення компонентів технологічної оснастки. Традиційно затискні пристрої, такі як важелі та прихвати, виготовляються зі сталі субтрактивними методами, що забезпечує високу міцність, але збільшує загальну масу конструкції та вартість виготовлення при дрібносерійному виробництві.

Метою дослідження є оцінка доцільності заміни металевих деталей затискних механізмів модульних верстатних пристроїв на полімерні композити, виготовлені методом 3D-друку. Об'єктом дослідження обрано двоплечий важіль модульного верстатного пристрою для обробки деталі типу «Хрестовина» (сталь 45, маса 0,89 кг). Базування заготовки здійснюється за правилом шести точок, а фіксація – зустрічними повзунами із самоцентруючими призмами від пневматичного приводу.

Для забезпечення надійного закріплення під час інтенсивних операцій фрезерування та свердління розрахункове зусилля затискання становить 4833 Н на кожен призму. Аналіз показав, що пряма заміна сталевого важеля на полімерний без зміни геометрії не задовольняє умовам міцності та жорсткості: максимальний прогин для неармованого поліаміду PA6 становить 12,1 мм, а для склонаповненого PA6 GF30 – 4,2 мм.

У зв'язку з цим було проведено топологічну оптимізацію перерізу важеля методами скінченноелементного аналізу (СЕА) в середовищі ANSYS. Усунення ступінчастих переходів та додавання поздовжніх ребер жорсткості дозволило суттєво підвищити моменти опору та інерції без необхідності додаткової механічної обробки. Оптимізований важіль із композиту PA6 GF30 (переріз 25×35 мм) продемонстрував найкращі показники: коефіцієнт запасу міцності 1,32, діючі напруження 57,2 МПа та мінімальний прогин 0,22 мм.

Виготовлення такого важеля на 3D-принтері знижує масу деталі майже в 10 разів (з ~1 кг до 0,113 кг) та зменшує виробничу собівартість до 12,89 євро, що є навіть нижчим за вартість фрезерування сталевого аналога (13,5 євро). Заявлений ресурс полімерної деталі становить 30 000 циклів, що повністю покриває потреби середньосерійного виробництва. Додатковими перевагами полімерних деталей є корозійна стійкість та ефективне демпфування вібрацій.

Таким чином, використання склонаповнених полімерів (зокрема PA6 GF30) в адитивному виробництві затискних механізмів є економічно доцільним рішенням, що дозволяє зменшити інерційні маси технологічної оснастки, забезпечуючи необхідну точність та надійність базування.

Список посилань

1. Яковенко І. Е., Пермяков О. А. Технологічна оснастка. Конструкції. Перспективи: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. 312 с.
2. Ключко О. О. Проєктування затискних пристроїв металорізальних верстатів. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 268 с.
3. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. New York: Springer, 2015. 498 p.

4. Beaumont J. P. Successful 3D printing: a practical guide to additive manufacturing. Munich: Hanser Publications, 2022. 430 p.

5. Mantaux O., Bersee H. Mechanical and thermal behavior of composites. London: Wiley, 2019. 384 p.

УДК 621.165:621.9.08

Доля В.Є., аспірант

Яковенко І.Е., канд. техн. наук, професор

Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, vladyslav.dolia@mit.khpi.edu.ua

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ САД-РЕКОНСТРУКЦІЇ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ РЕВЕРС ІНЖИНІРИНГУ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Комплексне забезпечення якості технологічних процесів відновлення відповідальних деталей газотурбінних установок (ГТУ) безпосередньо залежить від достовірності геометричних даних, отриманих на етапі реверс інжинірингу (PI) [1]. Основним показником якості PI є мінімізація відхилень між фізичним об'єктом та його параметричною цифровою моделлю. Однак при роботі зі зношеними компонентами проточної частини (роторні лопатки, диски) виникає проблема «успадкування дефектів», коли експлуатаційна деградація (ерозія, повзучість) помилково інтерпретується як номінальна геометрія.

Вирішення цієї проблеми лежить у площині адаптивної метрологічної фільтрації дискретних масивів 3D-сканування. Суть підходу полягає у розрахунку локальної кривини поверхонь та порівнянні їх із теоретичними профілями, закладеними в онтологічних базах знань типових конструктивних елементів [2]. Якість апроксимації контролюється через цільову функцію відхилень:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{s,i} - x_{c,i})^2 + (y_{s,i} - y_{c,i})^2 + (z_{s,i} - z_{c,i})^2} \rightarrow \min$$

де (x_s, y_s, z_s) – просторові координати неструктурованої хмари точок, а (x_c, y_c, z_c) – їхні ортогональні проекції на синтезовану NURBS-поверхню.

Архітектура метрологічного контролю реалізується у три етапи.

1. Прецизійне базування: Суміщення хмари точок із конструкторськими базами (наприклад, замковими з'єднаннями) для визначення глобальних перекосів.

2. Семантична сепарація: Відсікання зон локального зносу, що перевищують поле допуску на вільний розмір, для запобігання викривленню топології моделі. Наприклад, кластери точок, чії девіації перевищують допуски на вільні розміри, примусово відсікаються.

3. Валідація: перевірка масиву через генерацію цифрової карти відхилень (Color Map Deviation). Візуальна та метрична локалізація зон потенційного браку відбувається ще до початку механічної обробки.

Практичне застосування даної методики дозволяє підвищити якість підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПК на 15–20% за рахунок виключення ітераційних правок геометрії вручну. Це забезпечує стабільність технологічного процесу відновлення та гарантує відповідність відремонтованих деталей вимогам експлуатаційної надійності.

Список посилань

1. Пермяков О.А., Яковенко І.Е., Калініченко В.А. Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – 2023. – № 2 (8). – С. 91–99.

2. Shi Y., Zhang Y., Xia K. A Critical Review of Feature Recognition Techniques in CAD/CAM Integration // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2020. – Vol. 31, № 5. – P. 1025-1042.

УДК 621.867.42

Бельмас І.В., докт. техн. наук, професор

Часов Д.П., канд. техн. наук, доцент

Бейгул В.О., канд. техн. наук, доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, 0969995009@ukr.net

Серілко Д.Л., канд. техн. наук, доцент

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

dmytro8ls@gmail.com

ДО ПИТАННЯ СТІЙКОСТІ ДО РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ

Одним з видів матеріалів, які є широкоживаними в процесах транспортування та зберігання відходів машинобудівних підприємств та сільськогосподарських угідь, стали шаруваті композити. Під час переміщення та збереження окремих видів матеріалів (з метою упередження зростання їх вологості) замкнена система має зберігати та підтримувати підвищений тиск. Сталість таких процесів забезпечується використанням гнучких елементів в основних конструкціях. Однак деформування гнучких елементів мають бути контрольованими з метою забезпечення цілісності конструкції транспортуючої системи. Гарантією виконання таких вимог може стати використання двошаровості пружного елемента.

Розглянемо припущення, де навантаження нижнього шару задано на інтервалі $0 \leq x \leq a$.

$$P_1(x) = \sum_{m=1}^{\infty} VP_{1,m} \sin(\rho_m x) \quad (1)$$

де P_m – коефіцієнти розвинення,

$$VP_m = \frac{N}{2a} \int_0^a \cos(\rho_m \chi) d\chi$$

Навантаження верхнього шару також задамо рівняннями Фур'є на тому самому інтервалі.

$$P_2(x) = - \sum_{m=1}^{\infty} VP_{2,m} \sin(\rho_m x) \quad (2)$$

$$VP_{2,m} = \frac{N}{4b} \left(\int_0^b \cos(\rho_m \chi) d\chi + \int_{a-b}^a \cos(\rho_m \chi) d\chi \right);$$

де b – ширина смуги рами притискання гнучкого елемента до ємності.

Сформулюємо граничні умови для зовнішніх поверхонь шарів $z=H_1$ та $z=-H_2$:

$$\begin{aligned} \text{за } z=-H_1 \quad Z_z^{(1)} &= P(x), \quad Z_x^{(1)} = 0, \\ \text{за } z=H_2 \quad Z_z^{(2)} &= P_2(x), \quad Z_x^{(2)} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де Z_z , X_x , Z_x – нормальні та дотичні напруження в матеріалах шарів.

Умови навантаження та переміщення країв шарів

$$\text{за } x=0 \text{ та } x=a \quad u_z^{(1)} = X_x^{(1)} = u_z^{(2)} = X_x^{(2)} = 0,$$

де u_z , u_x – переміщення в напрямках осей z та x .

На підставі характеру закріплення торців зразка маємо наступні умови навантаження їх торців (за $x=0$ та $x=a$):

$$\int_0^{H_1} Z_x^{(1)} dz + \int_{-H_2}^0 Z_x^{(2)} dz \quad (\text{за } x=0) = - \int_0^{H_1} Z_x^{(1)} dz - \int_{-H_2}^0 Z_x^{(2)} dz \quad (\text{за } x=a)$$

$$\int_0^{H_1} Z_x^{(1)} dz + \int_{-H_2}^0 Z_x^{(2)} dz \quad \left(\dot{\varphi} \text{ at } x=0 \right) = 0, \quad (4)$$

де Z_x – дотичні напруження.

Характер деформацій гнучкого елемента близький до параболічного.

Список посилань

1. Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцура Г.І. Визначення напружено-деформованого стану багатошарового композиту. Опір матеріалів та теорія споруд. Київський національний університет будівництва і архітектури. 2022, № 109. с.426 – 440. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.426-440>
2. Serilko L. S., Lyashuk O. L., Chasov D. P., Serilko D. L., Ihnatiuk R. M. (2025). Body movement along the surface of an inertial conveyor chute under combined friction. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 12(1), pp. D1–D8. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).d1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).d1)

УДК 621:004.8

Соколішин Є.О., курсант факультету військової підготовки

Державна спеціальна служба транспорту Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, evgenijsokolisin@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СУЧАСНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

Сучасний розвиток промисловості супроводжується активним впровадженням цифрових технологій у виробничі процеси. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку машинобудування є використання систем штучного інтелекту (ШІ), які дозволяють автоматизувати складні виробничі операції, підвищити точність обробки деталей та оптимізувати роботу підприємств. В умовах швидкого розвитку технологій і зростання конкуренції саме застосування інтелектуальних систем стає важливим фактором підвищення ефективності машинобудівної галузі [1].

Метою даних тез є аналіз особливостей використання штучного інтелекту в сучасному машинобудуванні, визначення основних напрямів його застосування, переваг та проблем, які виникають під час інтеграції інтелектуальних технологій у виробничі процеси.

На сьогодні машинобудування належить до галузей, де активно використовуються автоматизовані системи управління та роботизовані комплекси. Штучний інтелект дозволяє значно розширити можливості таких систем шляхом автоматичного аналізу інформації, прогнозування виробничих процесів та прийняття рішень без постійного втручання людини. Одним із головних напрямів застосування ШІ є автоматизація виробництва, де інтелектуальні алгоритми використовуються для управління роботами, контролю якості продукції та оптимізації технологічних процесів [2].

Особливу роль системи штучного інтелекту відіграють у процесі проєктування деталей і механізмів. Сучасні CAD/CAM-системи з елементами машинного навчання дозволяють автоматично аналізувати конструкції, визначати можливі помилки та пропонувати оптимальні технічні рішення. Це суттєво скорочує час розробки нових виробів та зменшує витрати на проєктування. Крім того, використання ШІ дає можливість моделювати поведінку деталей у різних умовах експлуатації ще до початку їх виробництва [1].

Одним із найбільш поширених напрямів використання штучного інтелекту є прогнозування технічного стану обладнання. На сучасних підприємствах використовуються системи Predictive Maintenance, які аналізують інформацію з датчиків та прогнозують можливі несправності обладнання ще до моменту виникнення аварії. Такі системи дозволяють уникати простоїв виробництва, знижувати витрати на ремонт і підвищувати загальну ефективність роботи підприємства [3].

Важливе значення має застосування ІІІ для контролю якості продукції. За допомогою камер технічного зору та алгоритмів машинного навчання системи можуть автоматично виявляти дефекти деталей, контролювати точність розмірів та аналізувати якість поверхні виробів. На відміну від традиційного контролю, автоматизовані системи працюють значно швидше та забезпечують високу точність перевірки продукції. Це особливо актуально для масового виробництва, де навіть незначні помилки можуть призводити до значних фінансових втрат.

Окрему увагу приділяють використанню роботизованих систем із елементами штучного інтелекту. Сучасні промислові роботи здатні виконувати складні технологічні операції: зварювання, складання деталей, фарбування та механічну обробку. Використання ІІІ дозволяє роботам адаптуватися до змін умов виробництва та працювати з високою точністю навіть у складних виробничих середовищах [2]. Крім того, інтелектуальні роботи можуть взаємодіяти між собою та координувати спільне виконання виробничих завдань.

Суттєво змінюється й система управління виробництвом. Завдяки технологіям штучного інтелекту підприємства можуть аналізувати великі обсяги інформації, прогнозувати попит на продукцію та оптимізувати використання ресурсів. Алгоритми машинного навчання дозволяють автоматично визначати оптимальні режими роботи обладнання, зменшувати витрати електроенергії та підвищувати продуктивність виробництва [1].

Разом із перевагами використання ІІІ існують і певні проблеми. Однією з головних складностей є висока вартість впровадження інтелектуальних систем. Для роботи алгоритмів штучного інтелекту необхідні сучасне обладнання, потужні обчислювальні системи та значні обсяги даних для навчання моделей. Крім того, інтеграція ІІІ у виробничі процеси потребує висококваліфікованих спеціалістів, які володіють знаннями як у сфері програмування, так і в галузі машинобудування [3].

Ще однією проблемою є питання кібербезпеки. Сучасні машинобудівні підприємства використовують мережеві системи управління, які можуть бути вразливими до кібератак або несанкціонованого втручання. Порушення роботи автоматизованих систем може призвести до зупинки виробництва або пошкодження обладнання. Саме тому захист інформаційних систем та виробничих мереж стає важливим елементом функціонування сучасних підприємств.

Перспективним напрямом розвитку є поєднання штучного інтелекту з технологіями Інтернету речей та цифрових двійників. Використання цифрових моделей обладнання дозволяє проводити аналіз роботи виробничих систем у реальному часі та прогнозувати результати змін у технологічних процесах. Це забезпечує більш ефективне планування виробництва та підвищує надійність роботи підприємств [2].

Крім того, активно розвиваються технології генеративного проєктування, за яких системи штучного інтелекту самостійно формують декілька варіантів конструкцій деталей відповідно до заданих параметрів. Інженер у такому випадку виконує переважно функцію контролю та вибору найбільш ефективного варіанта. Подібний підхід дозволяє створювати більш легкі, міцні та технологічні конструкції.

Підсумовуючи, можна зазначити, що використання штучного інтелекту в сучасному машинобудуванні є одним із ключових напрямів розвитку промисловості. Інтелектуальні системи забезпечують автоматизацію виробництва, підвищують точність контролю якості, оптимізують роботу обладнання та сприяють ефективнішому використанню ресурсів. Незважаючи на певні проблеми, пов'язані з високою вартістю впровадження, кібербезпекою та необхідністю підготовки фахівців, технології штучного інтелекту продовжують активно розвиватися та відіграватимуть дедалі важливішу роль у машинобудуванні майбутнього.

Список посилань

1. Groover M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* / M. P. Groover. – New York : Pearson, 2020. – 816 p.

2. Wang L. Artificial Intelligence in Smart Manufacturing: Applications and Challenges / L. Wang, M. Törnngren, M. Onori // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2024. – Vol. 20, № 3. – P. 2150–2161.
3. Kumar R. Machine Learning and Predictive Maintenance in Industry 4.0 / R. Kumar, S. Patel // Journal of Manufacturing Systems. – 2025. – Vol. 74. – P. 120–134.

УДК 621.9.048:004.94:658.512.2.

Фадєєв А.В., канд. техн. наук, докторант

Набока О.В., канд. техн. наук, професор

Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, fanv17@gmail.com

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ТА ПРОЦЕСИ РЕВЕРСИВНОГО РЕІНЖІНІРИНГУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

Традиційні підходи до ремонту та відновлення деталей в машинобудуванні не забезпечують необхідної точності та ефективності в умовах сучасних вимог до ресурсу та надійності виробів. Запропоновано поєднання технологій 3D-сканування, CAD/CAE/CAM-систем, цифрового моделювання та аналітичних методів для створення єдиного цифрового середовища відновлення. Основна увага приділена інтеграції цифрового двійника з процесом реверсивного реінжинірингу, що дає можливість формувати адаптивні технологічні маршрути ремонту деталей, прогнозувати залишковий ресурс та оцінювати працездатність виробів.

Концепція технологічного забезпечення передбачає розробку базової моделі технологічного циклу з цифровими двійниками, які використовуються при гібридних процесах відновлення деталей.

Сучасна практика відновлення у машинобудуванні та, особливо, в аерокосмічній індустрії – це гібрид традиційних технологій та нового покоління адитивних і безтермічних методів. Впровадження адитивних методів дає змогу скорегувати час простою, зменшувати потребу в запасних частинах, виконувати локальні ремонти, відновлення геометрії.

Цифровий двійник (Digital Twin, DT) є інтегрованою віртуальною моделлю фізичного об'єкта, яка відтворює його геометричні, фізико-механічні та функціональні властивості в реальному часі.

Побудова моделі цифрового двійника ґрунтується на таких принципах:

- відповідність геометрії – точне відтворення форми та розмірів деталі;
- мультифізичність – модель враховує не лише геометрію, а й властивості матеріалів;
- динамічність – цифровий двійник оновлюється відповідно до результатів діагностики упродовж експлуатації деталі;
- зв'язок із виробничими процесами.

Цифровий двійник зношеної деталі є ключовим елементом концепції технологічного забезпечення відновлення, оскільки дозволяє поєднати діагностику, моделювання та виробничі процеси в єдиній інтегрованій системі.

Життєвий цикл цифрового двійника для деталей, що підлягають багаторазовому ремонту, охоплює весь період експлуатації деталі від виготовлення до її фізичного старіння і включає кілька ключових компонентів.

Цифровий двійник дозволяє пропонувати індивідуальні плани ремонту для кожної деталі, що є додатковою конкурентною перевагою.

Дані життєвого циклу дають можливість створювати інформаційно-аналітичні продукти: статистика зносу та надійності, рекомендації щодо використання та обслуговування.

Внаслідок формування нової наукової парадигми «цифрового відновлення» з'являється самостійний науковий напрям на стику реверсивного інжинірингу, теорії надійності й цифрових технологій.

Концепція з цифровими двійниками змінює традиційний підхід:

- зношена деталь стає базою для побудови цифрового двійника;
- реверсивний реінжиніринг забезпечує відтворення не лише геометрії, а й функціональних параметрів.

Цифровий двійник зношеної деталі – не просто CAD-копія геометрії, а багаторівнева модель.

Отже, **головна новизна концепції**:

- відновлення деталей перестає бути «ремонтною практикою» і перетворюється на керований цифрово-аналітичний процес;
- реверсивний реінжиніринг доповнюється цифровою валідацією ресурсу, що дає наукову основу для прогнозування довговічності;
- формується база для переходу до інтелектуальних ремонтних виробництв.

Механізми застосування цифрових двійників - це технологічна архітектура відновлення виробу (рис.1).



Рис. 1 – Механізми застосування цифрових двійників у виробничій системі відновлення виробу

Можливість відновлення деталей на спеціалізованих ділянках серійного чи масового типу виробництва забезпечує ефективність ремонту та доцільність відновлення деталей. Гібридні технології – найефективніший шлях відновлення високоточних деталей: дають баланс швидкості, економії та якості.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення алгоритмів самооновлення цифрових двійників та їх інтеграцію в кластерні системи виробництва і технічного сервісу.

Список посилань

1. Пермяков О. А. Реверсивний інжиніринг зношених деталей як альтернатива процесів їх відновлення / Пермяков О. А., Яковенко І. Е. // Нові технології в машинобудуванні : матеріали тридцять третьої всеукр. конф., 4-7 вересня 2023, Харків, Україна : зб. наук. праць / Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ". – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. – С. 48-50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78929>
2. Попов О.В. (2022) Технологічний реінжиніринг промислових підприємств / Монографія / Пер.з англ.; Пер.з рос.: О.В. Попов. Видавництво Харків, вид. «Центр поліграфії» м. Харків, пр. Науки, 7, e-mail nauki007@gmail.com, тел. 702-13-88, 251 арк., укр.(11,4 авт.арк.)
3. Фадеев В.А. Синтез технологических систем механической обработки / В.А.Фадеев // Харків: НТУ «ХПІ». – 2007.-187с.

УДК 621.833.1 : 621.9.025.1

Литвиняк Я.М., канд. техн. наук, доцент

Зінків О.Я., студент

Національний університет «Львівська політехніка», yaroslav.m.lytvyniak@lpnu.ua

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Експлуатаційні характеристики приводів, як компонентів сучасних машин та обладнання, що сформовані із циліндричних зубчастих передач, забезпечуються їх навантажувальною спроможністю, точністю та надійністю. В свою чергу, відповідні функціональні показники таких передач можуть бути раціонально забезпечені модифікацією евольвентного профілю зубців, використанням неевольвентного профілю зубців та ефективної технології виготовлення таких циліндричних зубчастих коліс [1,2,3].

Розроблений удосконалений спосіб нарізання циліндричних зубчастих коліс – спосіб радіально-колового безперервного формоутворення дисковими безпрофільними фрезами (РКДМ) [4]. Відмінність способу РКДМ від відомого радіально-колового способу [5] визначається попереднім додатковим встановленням дискової фрези, яка розташована з ексцентриситетом на інструментальній оправці зубофрезерного верстата, що забезпечує нарізання у циліндричних зубчастих колесах зубців повної товщини з модифікованим профілем.

Отримані математичні моделі формування модифікованого профілю зубців циліндричних зубчастих коліс удосконаленим способом РКДМ. Розроблена методики застосовувалась для оцінки удосконалення циліндричної евольвентної зубчастої передачі ($Z_1 = 11$, $Z_2 = 37$, $x_1 = +0,21$, $x_2 = 0,21$, $m = 5,5$ мм) бортового редуктора колісної машини спеціального призначення. Отримуваний способом РКДМ модифікований профіль зубчастих коліс забезпечує прогнозоване збільшення ресурсу зубчастої передачі внаслідок зменшення на поверхнях зубців напружень контакту у 1,24 рази за рахунок збільшення радіусів кривизни профілів зубців у полюсі зачеплення, зменшення проковзування зубців на 61% , створює умови безударного входження в контакт зубців коліс та підвищення довговічності передачі.

Список посилань

1. Левін Н. О. Математична модель та алгоритм оптимізації за критерієм мінімальних контактних напружень зубчастих передач з опукло-увігнутим контактом / Н. О. Левін, О. В. Устиненко, М. Бошанські, Р. В. Протасов, О. В. Бондаренко, С. В. Андрієнко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. Харків, НТУ "ХПІ", 2025, № 2, с. 52–56. doi: 10.20998/2079-0775.2023.2.08.
2. Пилипенко О. Модифікації зубців зубчастих коліс авіаційних редукторів для підвищення їх експлуатаційної надійності технологічності. / Пилипенко О., Колесник Д., Березняк А., Холодний Р. // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2021. - 2(8). - С. 112-125. doi: 10.37701/DNDIVSOVT.8.2021.12.
3. Pasternak S. Gear Cutting with Disk-Shaped Milling Cutters / Pasternak S., Danylchenko Y., Storchak M., Okhrimenko O. // S. P. Radzevich, M. Storchak (eds.), Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design, pp 233–254. Springer Nature Switzerland AG 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_5.
4. Литвиняк Я.М. Технологічне забезпечення експлуатаційних показників авіаційних та транспортних циліндричних зубчастих передач / Я.М.Литвиняк, О.Я.Литвиняк, О.Я.Зінків // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2025. - Вип. 59. - С. 70-86. doi.org/10.23939/istcipa2025.59.070.
5. Hrytsay I. Sinusoidal Gears and Alternative Method of Tooth Generation // S. P. Radzevich, M. Storchak (eds.), Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design, pp 233–254. Springer Nature Switzerland AG 2022. doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7.8.

УДК 539.3

Трубачев С.І., канд. техн. наук, доцент
Кривова С.Г., канд. техн. наук, доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, strubachev1@ukr.net

КОЛИВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

У сучасній промисловості багатошарові конструкції знайшли широке впровадження, тому діагностика та аналіз міцності та надійності таких конструкцій є актуальною задачею. Широке використання багатошарових систем при створенні конструкцій сучасної техніки потребує розвиток аналітичних та чисельних методів їх розрахунку. Особливостями роботи багатошарових конструкцій є піддатливість поперечному зсуву, а також висока чутливість до наявності міжшарових дефектів, які можуть виникнути в процесі експлуатації. В роботі розглядається тришарова конструкція що знаходиться на пружній основі. Для опису кінематики пакету прийняті гіпотези ламаної лінії: в несучих шарах справедливі гіпотези Кірхгофа-Лява, в заповнювачі нормаль залишається прямолінійною, але повертається на деякий додатковий кут. Деформації вважаються малими. При дослідженні конструкцій, складної геометричної форми, з довільними граничними умовами доцільно застосовувати чисельні методи розрахунку. В даній роботі для розрахунку багатошарових конструкцій використовується метод, що базується на варіаційно-сітковому підході. При цьому нескінченномірний простір допустимих функцій замінюється скінченномірним шляхом дискретизації досліджуемого об'єкта на скінченне число підобластей та апроксимації шуканих функцій в цих підобластях. Для багатошарових пластинчато-оболонкових систем в якості базової підобласті використовується трикутний скінченний елемент, в якому на відміну від інших моделей, застосовуються різні апроксимації переміщень за шарами. Переміщення в тонких несучих шарах апроксимуються лінійними та неповним кубічним поліномами, а для заповнювача приймається гіпотеза про кубічний розподіл переміщень за товщиною. Використання даної моделі дає можливість визначити напружено-деформований стан, як кожного шару окремо, так і всього пакету в цілому. Реакція основи відповідає моделі Вінклера.

При дослідженні міцності механічних систем, що знаходяться під дією вібраційних навантажень, основна складність полягає у визначенні спектру власних частот і форм коливань. В роботі для визначення спектру власних частот та форм коливань даної задачі пропонується використовувати метод підвищення жорсткостей [1], що являється більш ефективним та економічним методом, з точки зору обчислювальних ресурсів, в порівнянні з традиційним методом, в якому кожна наступна форма і частота знаходиться шляхом мінімізації на підпросторі, що ортогональний всім попереднім знайденим власним векторам. Для мінімізації отриманого функціоналу використовувався метод покоординатного спуску. Слід підкреслити, що метод підвищення жорсткостей дозволяє визначити весь спектр власних частот і форм коливань включаючи кратні, що важливо для розв'язку задачі о вимушених коливаннях механічних систем. При розрахунку вимушених коливань, шукані функції розкладаються в ряд Фур'є за власними формами коливань. Аналогічно розв'язується задачі вимушених коливань для пружних систем із зовнішнім та внутрішнім в'язким тертям за умови, що матриця демпфування пропорційна матриці жорсткості або матриці мас. На основі запропонованого підходу були визначені динамічні характеристики шаруватих авіаційних панелей, матеріал для несучих шарів вибирався Д16Т, а для заповнювача – фторопласт.

Список посилань

1. Бабенко А.Є. Визначення динамічних характеристик багатошарових фотоелектричних модулів сонячних батарей/ А.Є. Бабенко, О.О.Боронко, С.І. Трубачев// Матеріали 18 Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія, та інженерна освіта». Київ, 29 червня - 1 липня 2017 р. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. - с. 43-44.

УДК 621.9

Євдокимов О. Д., аспірант
Колесник В.О., канд. техн. наук

Сумський державний університет, yevdokymov.alexander@gmail.com

ГІБРИДНА МЕТОДОЛОГІЯ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ПІДБОРУ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

Процес підбору різучого інструменту та технологічного оснащення є багатокритеріальним завданням, ефективність вирішення якого впливає на механічну обробку та якість оброблених поверхонь. Як методологію автоматизованого підбору пропонується використовувати метод логіки обмежень та метод багатокритеріального ухвалення рішень (Multi-Criteria Decision Making) [1]. Використання методу логіки обмежень (Constraint Satisfaction Problem) на першому етапі дозволяє сформулювати множину технологічно сумісних варіантів (альтернатив). Фільтрація здійснюється за вектором параметрів: група матеріалу за ISO 513 (M), тип операції (P), ієрархічний код маршруту обробки деталі (O), геометричні обмеження (G) та умови охолодження на операції (C). Множина допустимих альтернатив F для зазначених параметрів визначається як:

$$F = \{s_i \in S \mid f_{constraints}(s_i; M, P, O, G, C) = 1\} \quad (1)$$

де S – повна множина комбінацій «інструмент-державка-адаптер»;

$f_{constraints}$ – булева функція відповідності сету технічним вимогам.

Для подальшого об'єктивного оцінювання технічно прийнятних альтернатив використовується багатокритеріальний аналіз з застосуванням методик MCDM. Метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process) використовується для розрахунку вектору вагових коефіцієнтів w на основі матриці парних порівнянь таких критеріїв як ціна, наявність комбінації інструменту на складі, загальний рейтинг та досвід використання. Метод зваженої суми (Weighted Sum Method) використовується для визначення інтегральної оцінки кожної альтернативи U_i через лінійну згортку нормалізованих значень критеріїв:

$$U_i = \vec{r}_i \cdot \vec{w} \quad (2)$$

де $\vec{r}_i$ – нормалізований вектор оцінок альтернативи;

$\vec{w}$ – вектор ваг критеріїв.

Метод визначення переваг за схожістю з ідеальним рішенням (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) дозволяє обрати рішення, що буде мати найменшу евклідову відстань до позитивного ідеалу та найбільшу до негативного. Індекс близькості до ідеалу C_i розраховується за формулою:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (3)$$

де D_i^- – відстань від альтернативи до антиідеального (найгіршого) рішення;

D_i^+ – відстань від альтернативи до ідеального (найкращого) рішення.

Спільне використання запропонованих методик дозволяє отримати технічно сумісні та керовані заданими критеріями інструментальні набори для будь якої операції.

Список посилань

1. Євдокимов О. Д. Розробка методології автоматизованого підбору різучого інструменту для вебзастосунку / О. Д. Євдокимов, В. О. Колесник // Технічні науки та технології. - 2025. - № 3 (41). - С. 115-130.

УДК 621.822

Міхєєв А.О., аспірант

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ,
andriymikhyeyev@gmail.com**ВИРІШЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ ТЕЧІЇ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ
В ПІДШИПНИКАХ ТА СИСТЕМАХ ЇХ ЖИВЛЕННЯ**

Вирішення гідродинамічної задачі течії мастильного матеріалу у підшипниках та системах їх живлення [1] базується на поєднанні високоточного числового моделювання, яке в свою чергу ґрунтується на рівнянні Рейнольдса (1), та інтелектуальних систем керування. Перспективні рішення спрямовані на підвищення несучої здатності, зниження втрат на тертя та збільшення довговічності вузлів [2], особливо у високошвидкісних та високотемпературних режимах.

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -6\mu\omega R^2 \frac{\partial h}{\partial \varphi} \quad (1)$$

де R – радіус сполучених поверхонь,
 φ – кутова координата, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$,
 ω – швидкість у напрямку φ ,
 p – тиск в кармані опори,
 z – лінійна координата,
 h – товщина шару робочої рідини,
 μ – в'язкість робочої рідини.

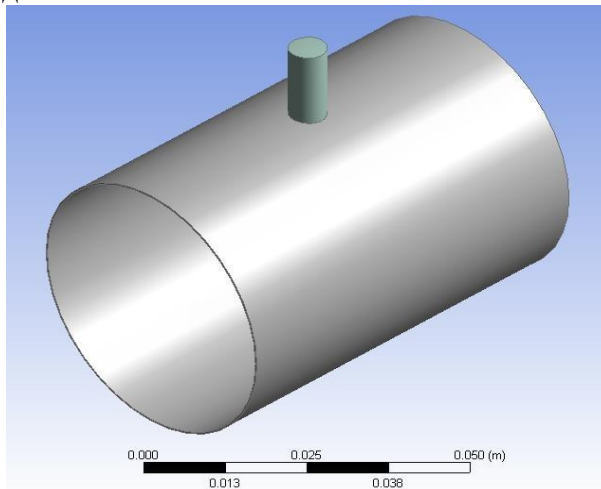


Рис. 1 – Модель плівки мастильного матеріалу гідростатичного підшипника

Перспективними є методи нанесення мікрорельєфу, наприклад, позитивних синусоїдальних хвиль, на поверхню підшипника для оптимізації розподілу плівки мастильного матеріалу та використання мастил з додаванням наночастинок для покращення в'язкісних характеристик, модель Крігера-Догерті, що дозволяє підвищити несучу здатність та стабільність, зокрема, високошвидкісних підшипників.

Список посилань:

1. Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Міхєєв А.О., Четвержук Т.І. Управління точністю траєкторних переміщень виконавчих органів верстата на гідростатичних підшипниках. «Перспективні технології та прилади»: Збірник наукових праць. Луцьк: ЛНТУ, 2024. Вип. 25. – С. 64-72. DOI: <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-10>
2. Федориненко Д. Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники: монографія / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон. – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – 403 с.

УДК 006.91:621.9.08

Кіливник С.В., аспірант

Оргіян О.А., доктор техн. наук

Національний університет «Одеська політехніка», orgiyan.a.a@op.edu.ua

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОТВОРУ, ЩО РОЗТОЧУЄТЬСЯ, З ВИКОРИСТАННЯМ ГІРОСКОПІЧНОГО ЕФЕКТУ

Гіроскопічний ефект, що виражається у властивості мас зберігати своє положення незмінним у просторі при швидкому обертанні, знаходить в даний час найширше поширення в техніці і в народному господарстві, особливо в автоматизованих системах управління. Через свої надзвичайні властивості і порівняльну простоту було зроблено спробу використовувати гіроскоп для стабілізації положення осі у просторі для підвищення точності розточування.

Відомо, що борштанги, що використовуються для тонкого розточування отворів із відношенням $L/d > 5$ (L – довжина борштанги, d – діаметр борштанги), практично втрачають стійкість при різанні. Вісь борштанги згинається, амплітуди згинальних коливань різко збільшуються, викликаючи спотворення форми отворів, що розточуються, і збільшення шорсткості.

Якщо замість віброгасника вбудувати у борштангу гіроскоп, що обертається з великою швидкістю, в пружній системі виникає динамічна стабілізація осі. До цього, також, збільшується демпфування в системі і пригнічуються коливання, що самозбуджуються.

Гіроскопічний ефект інтенсивно забезпечує зниження таких відхилень форм поверхонь, як овальність та хвилястість. Дуже ефективно впливає гіроскопічний ефект на зменшення радіального биття до 0,5 мкм при розточуванні отворів із відношенням $L/d > 8$.

З цією метою для експериментального випробування можливості та ефективності застосування гіроскопа було прийнято рішення застосувати в дослідженнях гіроскоп, що використовується в літакобудівництві для автопілотів. За своїми габаритами він досить малий (зовнішній діаметр 54,8 мм, ширина 32,8 мм) і може бути легко вбудований у розточувальну борштангу. Загальний вигляд гіроскопа та насадки представлено на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1 – Загальний вигляд а) насадка з гіроскопом, б) гіроскоп

Для експериментального визначення впливу гіроскопа на стабілізацію положення осі борштанги створена система, загальний вигляд якої показаний на рис. 2.

Для підвищення ефекту стабілізації навмисне використана борштанга 1 зниженої жорсткості з відношенням $L/d=170/20=8,5$. На передню частину борштанги, що використовується для тонкого розточування, напресований корпус 2. Корпус має порожнину закриту кришкою 3, в якій на нерухомій осі кріпиться гіроскоп 4. Провід електроживлення випущені через вісь гіроскопа і центральний отвір у борштангу. У корпусі 2 кріпиться нормалізований розточувальний різець 5.

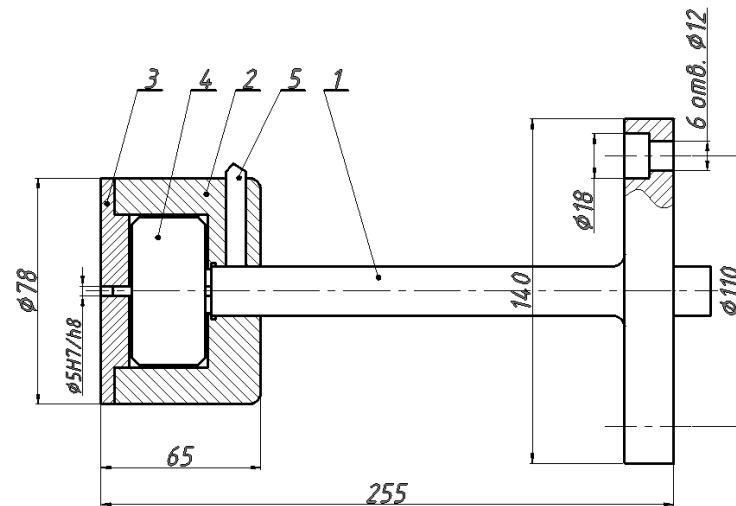


Рис. 2 – Схема розточної борштанги з гіроскопом

Для створення суттєвого гіроскопічного ефекту проводиться розкрутка гіроскопа до 12000 об/хв. Для створення такого швидкого обертання застосовано височастотний генератор.

Сутність методики попередніх експериментів полягає у наступному. Для вимірювання коливань борштанги в процесі різання біля її основи наклеєні два тензодатчики, що становлять вимірювальний напівміст. Як вимірювальний використовується ланцюг моста, що живиться змінним струмом. Датчики фіксують згинальні коливання борштанги в осьовій площині, що проходить через вершину різця. Сигнал розбалансу моста під дією навантаження надходить на підсилювач, а потім на осцилограф.

На першому етапі розточування проводиться без увімкненого гіроскопа і робиться запис зміни положення вершини різця в просторі. Для більшої достовірності та сумісності результатів процес розточування зупиняється, коли відбулася неповна обробка втулки за довжиною. При цьому включається лише подача. Потім розкручується гіроскоп і знову включається подача. Це зроблено для того, щоб зберегти вплив геометричної похибки оброблюваної поверхні однаковим в обох випадках. При другому етапі розточування знову проводиться осцилографування процесу. Розшифровка і співставлення осцилограм дає можливість оцінювати ступінь впливу гіроскопічного ефекту на стабілізацію осі борштанги і точність отворів, що розточуються.

Впровадження гіроскопічної стабілізації висуває нові вимоги до метрологічного контролю готових отворів, оскільки зниження радіального биття до рівня 0,5 мкм потребує застосування засобів вимірювальної техніки з високою роздільною здатністю та врахування похибок базування самої деталі. Таким чином, система не лише підвищує точність, а й створює базу для переходу до стабільного технологічного процесу в межах жорстких допусків прецизійного розточування.

Список посилань

1. L. Andrén, L. Håkansson, A. Brandt, I. Claesson, Identification of dynamic properties of boring bar vibrations in a continuous boring operation, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 18, Issue 4, 2004, P. 869-901, ISSN 0888-3270, DOI:10.1016/S0888-3270(03)00093-1.
2. Mittal, R.K.; Singh, R.K. Investigation of Gyroscopic Effect on the Stability of High Speed Micromilling via Bifurcation Analysis. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5, 130. DOI:10.3390/jmmp5040130.
3. Wan, M.; Dong, Z.Y.; Yang, Y.; Zhang, W.H. Stability Analysis of Milling Process by Combining the Gyroscopic Effect with the Symmetry and Runout of the Cutter. Meeh. Syst. Signal Process. 2021, 161, 107977.

УДК 621.914

Оргіян А.О., аспірант

Національний університет «Одеська політехніка», 9043822@as.op.edu.ua**ВПЛИВ РЕЖИМІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ОБРОБКИ**

Оцінка впливу на точність обробки режимів різання та стану рухомих стиків виконана за результатами трифакторного експерименту на основі теорії математичного планування експерименту. Теорія дозволяє замінити повний факторний експеримент (8 дослідів) дробним, скоротивши кількість дослідів до 4-х. Матриця планування дослідів відповідає напіврепліці 2^{3-1} і наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця планування дослідів

№ дослідів	X_0	X_1	X_2	X_3	Y
1	+	-	-	+	Y_1
2	+	+	+	+	Y_2
3	+	-	+	-	Y_3
4	+	+	-	-	Y_4

де X_1 – фактор глибини різання t з рівнями: «+» – 0,4 мм; «-» – 0,2 мм;

X_2 – фактор частоти обертання n з рівнями: «+» – 1000 об/хв; «-» – 500 об/хв;

X_3 – фактор стану стику бабка-стійка з рівнями: «+» – віджато; «-» – затиснуто;

Y – фактор точності обробки, що оцінюється почергово за шорсткістю, неплоскостністю обробленої поверхні, непаралельністю обробленої поверхні та базової в цілому, а також у напрямках переміщень столу та бабки.

Експеримент виконано при зустрічному фрезеруванні верхньої горизонтальної поверхні зразка торцевою фрезою у вертикальному шпинделі та подачі столом. Зразок був закріплений у центрі столу. Режими випробувань, визначені планом експерименту, наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Режими випробувань, визначені планом експерименту

№ дослідів	мм	об/хв	Вільні стики	м/хв	Контрольовані параметри
1	0,2	500	1 2	0,5	шорсткість, неплоскостність, непаралельність бази
2	0,4	1000	1 2	1	
3	0,2	1000	1	1	
4	0,4	500	1	0,5	

Результати експериментів обробляються методом регресійного аналізу з нехтуванням взаємодією окремих факторів. Середні значення факторів точності обробки, вимірюваних безпосередньо та розрахованих за формулами, наведено в табл. 3. Кутові характеристики непаралельності Δ , A і B виражені в одиницях ухилу.

Таблиця 3 – Середні значення факторів точності обробки

№ дослідів	мкм	мкм/мм	мкм/мм	мкм/мм	мкм
1	2,4	0,168	0,165	0,0311	1,33
2	2,6	0,231	0,231	0,0055	1,26
3	2,5	0,117	0,110	0,0411	1,24
4	2,6	0,194	0,183	0,0655	2,46

Ці результати показують, що шорсткість поверхні слабо залежить від варійованих факторів, а неплщинність і непаралельність бази змінюються суттєво. Найкращими для випробувань точності верстата є умови дослідів №3. Зіставлення величин A і B дозволяє зробити висновок, що основною причиною непаралельності є переміщення бабки.

Застосовуючи критерій Стюдента, за значеннями дисперсій S_A^2 і S_B^2 встановлено, що мінімальні значення A і B відрізняються від їхніх максимальних значень із достовірністю, що перевищує 95%. Тому можна вважати виправданим опис залежностей показників точності від змінних факторів. За відомими формулами регресійного аналізу знаходимо коефіцієнти представлення:

$$b_0 = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N}, \quad b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ji}}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}, \quad (1)$$

де U_i – значення параметра точності, отримане в досліді при значеннях варійованих факторів X_{ji} ,

N – кількість дослідів.

Обчислення коефіцієнтів регресії дає такі залежності:

$$\begin{aligned} A &= 0,098 + 0,35t - 0,68 \cdot 10^{-5}n - 0,052P, \\ B &= 0,0567 + 0,003t - 5 \cdot 10^{-5}n + 0,035P, \\ \Delta &= 0,105 + 0,35t - 1,4 \cdot 10^{-5}n - 0,044P, \\ \sigma_x &= 1,402 + 2,875t - 129 \cdot 10^{-5}n + 0,554P. \end{aligned} \quad (2)$$

Ці співвідношення дозволяють прогнозувати похибки обробки залежно від умов фрезерування.

Крім того, можна ранжувати вплив розглянутих змінних факторів на точність, надаючи їм середні значення в інтервалах варіювання. Найбільший вплив на непаралельність обробленої та базової поверхонь чинить глибина фрезерування, а найменший – швидкість обертання шпинделя. Глибина фрезерування впливає на непаралельність переважно за напрямком установчого переміщення бабки, а частота обертів шпинделя – за напрямком подачі столу. Затискач стику бабка-стійка приблизно однаково впливає на непаралельність в обох напрямках. Неплщинність обробленої поверхні найбільше залежить від швидкості обертання шпинделя, а глибина фрезерування чинить на неї найменший вплив.

Список посилань

1. Mohammed, Khaled & Altome, Ebraheem & Kalaf, Omer. (2025). Optimization of CNC Milling Parameters Using Surface Roughness as a Response Variable. The Journal of Comprehensive Sciences. 9. DOI: 463-474. 10.65405/0wtfws73.
2. Yaghoubi, S. and F. Rabiei, A profound evaluation of different strategies to improve surface roughness of manufactured part in wood-CNC machining process. Journal of Engineering Research, 2024.
3. Wang, Zairu. (2024). The milling parameters of mechanical parts are optimized by NC machining technology. Frontiers in Mechanical Engineering. DOI: 10. 10.3389/fmech.2024.1367009.
4. Osan, Andrei & Banica, Mihai & Florian, Cornel. (2026). Prediction of the Surface Quality Obtained by Milling Using Artificial Intelligence Methods. Coatings. DOI: 16. 478. 10.3390/coatings16040478.

УДК 621.941

Бадовський О.Б., аспірант

Національний університет «Одеська політехніка», badovskyi.8111276@stud.op.edu.ua

КОЛИВАННЯ КООРДИНАТНО-РОЗТОЧУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Координатно-розточувальні верстати (КРВ) призначені для остаточної обробки отворів та плоских поверхонь деталей, що мають високу точність розташування та форми. Застосовують КРВ переважно в умовах індивідуального та дрібносерійного виробництва для обробки корпусних деталей машин і приладів, верстатних пристроїв та інструменту. Випускають КРВ класів точності В, А та С одностійкової, двостійкової та горизонтальної компоновки.

Високі вимоги до точності КРВ мають забезпечуватися достатньою жорсткістю станини, напрямних та шпиндельного вузла, а також зниженням рівня збурювальних впливів приводу головного руху. Для підвищення продуктивності КРВ, поряд з автоматизацією, необхідно здійснювати якомога більшу концентрацію операцій на одному верстаті. Разом з тим, недостатня вібростійкість КРВ може перешкоджати виконанню операцій розточування та фрезерування. Таким чином, удосконалення конструкцій та підвищення показників якості КРВ мають ґрунтуватися на результатах досліджень жорсткості та вібростійкості.

Нами досліджено одностійкові КРВ, шпиндельний вузол яких може переміщатися по напрямних стійки. Поворотні столи, що встановлюються на двокоординатному столі, розширюють технологічні можливості верстата. Вимірювання жорсткості та коливань виконані на верстатах моделей 2А430 та 2В420.

Досліджено один із основних показників якості КРВ – змінність жорсткості при зміні напрямку навантаження, що безпосередньо впливає на похибки форми розточеного отвору. Виміряно переміщення вільного кінця контрольної оправки (20 мм, 60 мм), встановленої на шпинделі КРВ моделі 2А430, з використанням широкого підрізного різця (рис. 1).

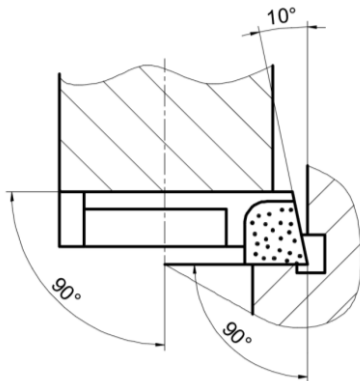


Рис. 1 – Схема установки різця для підрізання торця на контрольній оправці КРВ

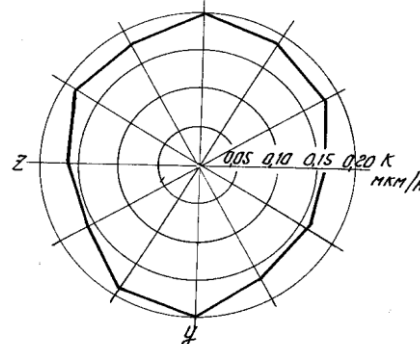


Рис. 2 – Кутова епюра радіальної податливості КРВ при довжині оправки 60 мм

За допомогою поворотного стола встановлювалися дванадцять рівнорозташованих радіальних напрямків навантаження та вимірювалися переміщення відносно станини верстата. За результатами вимірювань, проведених на 10 верстатах, побудовано кутові епюри (рис. 2) та визначено середнє значення податливості – 0,18 мкм/Н. Відношення податливостей у двох радіальних напрямках, у яких вони набувають екстремальних значень, лежить у межах від 1,1 до 1,3.

При зміні напрямку коливань оправки змінюються не лише деформаційні, а й дисипативні параметри системи. За осцилограмами вільних коливань та за амплітудно-частотною характеристикою пружної системи визначено значення логарифмічного декременту коливань δ оправки: він становить 0,14, а відношення його екстремальних значень $\delta_{\max}/\delta_{\min}$ сягає 1,2.

У спектрі коливань контрольної оправки проявляються інтенсивна гармоніка на частоті згинних коливань і група низькочастотних гармонік. Джерела коливань низької частоти виявлено під час аналізу спектрів коливань гільзи. Встановлено, що основними чинниками низькочастотних коливань та спотворень форми поперечного перерізу розточеного отвору є збурення, що передаються від ротора електродвигуна. Середні значення амплітуд високочастотних гармонік та їх середньоквадратичні відхилення зростають зі збільшенням частоти обертання двигуна.

Вимірювання коливань борштанг (діаметром 20 мм; довжиною 60...100 мм) при розточуванні та підрізанні торців зразків зі сталі 45, чавуну СЧ 18 та бронзи ОЦС 6-6-3 виконувалися за допомогою ємнісного датчика 3 (рис. 3). Змінні борштанги 2 закріплювалися в конусному отворі шпинделя 1. Сталеві і чавунні зразки являли собою плити 4, що встановлювалися на столі верстата 6 на монтажних плитках 5. Зразки з бронзи мали циліндричну форму. Отвори в бронзових зразках розточували алмазними різцями 2146-0001 при $t=0,1$ мм, $s=0,02$ мм/об, $V=230$ м/хв.

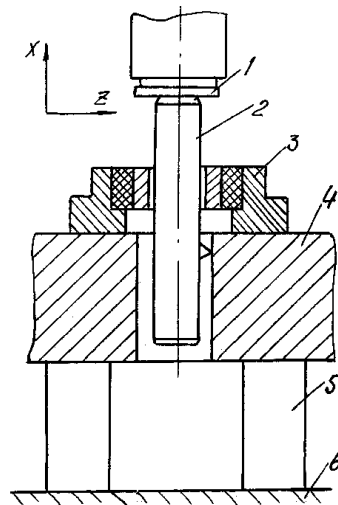


Рис. 3 – Схема вимірювань коливань борштанги КРВ при розточуванні

Змінність параметрів пружної системи під час обертання шпинделя викликає зміни амплітуд коливань. При малій частоті обертання низькочастотна гармоніка (подібно до податливості) має більшу інтенсивність у фронтальному напрямку y , а при великій частоті – у бічному z . У цьому ж напрямку z розвиваються і більш інтенсивні високочастотні коливання. Аналіз коливань гільзи, корпусу шпиндельної головки та стійки показав, що низькочастотні коливання пов'язані переважно з деформаціями в стиках корпусу шпиндельного вузла з гільзою та стійкою. Високочастотні коливання виникають внаслідок деформацій інструменту разом із системою «шпиндель-гільза».

Зі зростанням рівня високочастотних коливань при збільшенні вильоту борштанги КРВ нами встановлені граничні значення радіальної податливості $[k]$, які для сталі 45, чавуну СЧ 18 та бронзи ОЦС 6-6-3 становлять відповідно 0,08; 0,2 та 0,3 мкм/Н. Рекомендації щодо підвищення жорсткості стиків і зниження інтенсивності збурювальних впливів у приводі головного руху впроваджені в КРВ моделі 2Б420.

Список посилань

1. Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., & Budak, E. (2016). Chatter suppression techniques in metal cutting. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 65(2), 785-808. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.004
2. Cao, Y., & Altintas, Y. (2007). Modeling of spindle-bearing and machine tool systems for virtual simulation of milling operations. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(9), 1342-1350. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.006

3. Dai, Ye & Tao, Xueshi & Li, Zhaolong & Zhan, Shiqiang & Li, Yang & Gao, Yanhua. (2022). A Review of Key Technologies for High-Speed Motorized Spindles of CNC Machine Tools. Machines. 10.145. DOI: 10.3390/machines10020145.

УДК 621.9-1

Плис В.С., аспірант

Дегтярьов І.М., канд. техн. наук, доцент

Калашніков С.С., студент

Сумський державний університет, м. Суми, v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ З РОЗТИСКНОЮ ЦАНГОЮ ДЛЯ ОБРОБКИ КАНАЛІВ АПАРАТІВ СПРЯМОВУВАЛЬНИХ

Для реалізації експериментального дослідження з оброблення каналів апарату спрямовувального (АС) було виконано планування експерименту. План включає оброблення АС для різних матеріалів та режимів різання [1]. Для проведення експериментальних досліджень виникла необхідність у виготовленні дослідного зразка, як і було заплановано у [2] верстатного пристрою з розтискною цангою, який забезпечує надійне та точне закріплення заготовки АС під час оброблення.

Оскільки пристрій передбачається використовувати для виготовлення певної партії деталей, до окремих його елементів були висунуті підвищені вимоги щодо точності, шорсткості та твердості. Зокрема, розтискна цанга повинна мати твердість у межах 40–45 HRC, що забезпечує необхідні пружні властивості та стабільність закріплення. Відповідно, притискний конус повинен мати твердість, співставну або дещо більшу за твердість цанги, для запобігання схоплюванню контактних поверхонь під час експлуатації, тому була прийнята твердість 45–50 HRC.

Під час виготовлення дослідного зразка пристрою (рис. 1) з метою підвищення технологічності конструкції та покращення ергономічності його використання було прийнято низку технічних рішень. Зокрема, класичні призматичні шпонки були замінені на циліндричні (рис.2), що дозволило скоротити трудомісткість виготовлення та спростити досягнення необхідної точності базування. Таке рішення є доцільним, оскільки пристрій не передбачається часто демонтувати та повторно встановлювати на верстат. Крім того, забезпечення точності на циліндричних поверхнях є технологічно простішим порівняно з плоскими поверхнями.



Рис. 1 – Загальний вид дослідного зразка верстатного пристрою



Рис. 2 – Ілюстрація технічного рішення з використанням циліндричних шпонок

Для підвищення зручності закріплення пристрою на верстаті, покращення ергономічності та естетичного вигляду конструкції, а також збереження цілісності основи пристрою, традиційні пази для кріплення були замінені на східчасті отвори. Закріплення здійснюється гвинтами (рис.3) за аналогією із сучасними системами кріплення верстатних лещат типу KURT, що є більш зручним порівняно з класичним варіантом із використанням шпильок та гайок.



Рис. 3 – Ілюстрація технічного рішення з використанням східчастих отворів для закріплення пристрою на верстаті

Також у конструкції були передбачені рим-болти (рис. 1), основним призначенням яких є підвищення зручності та безпеки транспортування, а також монтажу пристрою. Для забезпечення надійного та рівномірного закріплення розтискної цангової оправки у конструкції передбачено вісім різьбових отворів М8, що дозволяє рівномірно розподілити зусилля затиску та підвищити жорсткість системи.

Наступним етапом дослідження стане проведення експериментальної обробки каналів апарату спрямовувального із застосуванням раніше визначених режимів різання [1].

Список посилань

1. Плис В. С., Дегтярьов І. М. Планування експерименту з обробки каналів апарату спрямовувального у верстатному пристрої з розтискною цангою / В. С. Плис, І. М. Дегтярьов // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали XIII Всеукраїнської наук.-техн. конф. (м. Суми, 21–24 квітня 2026 р.). – Суми : Сумський державний університет, 2026. – С. 26–27.
2. Плис В. С. Комплексний підхід до розробки верстатного пристрою для обробки деталей малої жорсткості на фрезерних операціях / В. С. Плис, І. М. Дегтярьов, Д. С. Мосненко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2025): Тези доповідей XV Міжнарод. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 22-23 травня 2025 р.): у 2 т. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – Т. 1. – С. 107.

УДК 621.95

Бабенко М.О., канд. пед. наук

Куркаєв М.Д., студент

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»,

maryna.babenko@donntu.edu.ua

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СВЕРДЛІННЯ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ МАЛИХ ДІАМЕТРІВ У КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХНЯХ

Необхідність оброблення глибоких отворів малого діаметра у криволінійних поверхнях (рис. 1) зумовлює комплексне вивчення проблеми застосування сучасних технологій осьового оброблення. Через нерівномірні умови врізання такі отвори визначаються нетехнологічними, тому потребують спеціальних підходів до вибору інструментів та стратегій оброблення.



Рис. 1 – Приклад деталі із глибокими отворами у криволінійних поверхнях

У технологічній практиці отвори прийнято класифікувати за їхньою відносною глибиною. За умови відношення довжини отвору (L) до діаметра (D_0) становить $L/D_0 > 5$ (деякі сучасні класифікації проводять цю межу на рівні $L/D_0 > 10$), то отвір вважається глибоким. Саме після досягнення цих показників звичайне свердління втрачає ефективність, тому беруться до уваги особливості технології глибокого свердління [1].

Серед технологічних вимог глибокого свердління: прямолінійність осі отвору, концентричність отвору відносно зовнішньої поверхні деталі та циліндричність по всій довжині. Проблемами забезпечення означених вимог є: зростання схильності інструмента до пружного згинання та відведення від заданої осі, ускладнене видалення стружки та відведення тепла із зони різання. Тому необхідною умовою забезпечення свердління глибоких отворів є внутрішня подача мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Важливим при цьому є не лише охолодження, а й видалення стружки із зони різання. У традиційній технології це забезпечується багаторазовим відведенням свердла під час свердління, дозволяючи уникнути пакетуванню стружки [2].

Для ефективного подолання означених вище проблем сучасне інструментальне виробництво пропонує інноваційні рішення у вигляді свердел нового покоління (рис. 2, а), які забезпечують стабільність процесу за рахунок використання покриттів із інноваційних матеріалів, систем внутрішнього охолодження для видалення стружки потоком МОР (іноді стисненого повітря), широких діапазонів співвідношень глибин різання до діаметра свердла [3].

Означена проблема потребує також розгляду проблеми утворення отворів у криволінійних поверхнях. Особливістю оброблення при цьому полягає в необхідності точного співвісного розташування інструмента відносно геометричної осі деталі із одночасним дотриманням умов жорсткого кріплення.

Існує традиційний підхід до свердління у криволінійних поверхнях, яких полягає у попередньому фрезеруванні площинки, перед виконанням свердління. Це сприяє

уникненню зміщення свердла при входженні в матеріал і підвищенню точності центрування отвору. Проте у сучасному висвітленні проблеми дана технологія має ряд недоліків: збільшення тривалості виробничого циклу; дестабілізація точності через похибки базування у випадку переустановлення заготовки або зміни її відносної орієнтації; нерівномірне навантаження та зношування інструмента із-за динамічних ударів фрези та нерівномірного опору матеріалу, яке призводить до прискореного локального зношування різальних крайок; додаткові витрати на контролювання; ризик накопичення системних помилок.

З урахуванням того, що отвір є глибоким, свердлильна операція за традиційною технологією має складатися як мінімум із трьох переходів: фрезерування площинки, свердління пілотного (центрувального) отвору, подальшого глибокого свердління із багатократним відведенням.

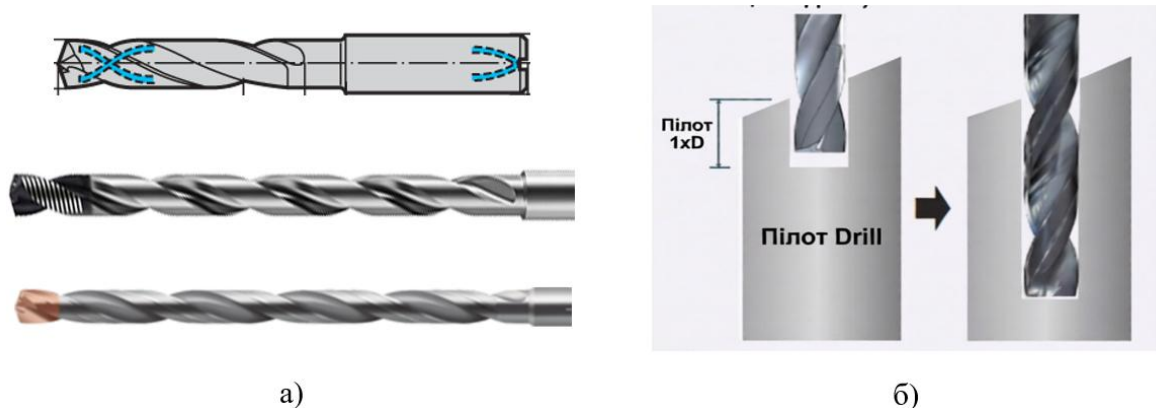


Рис. 2 – Сучасні технології глибокого свердління: а) сучасні свердла для глибокого свердління; б) свердла з кутом при вершині 180°

Вимоги щодо підвищення продуктивності оброблення спричиняють перехід до більш спрощених методів зменшення трудомісткості, скорочення часу виконання та зниження собівартості виготовлення.

Для умов автоматизованого виробництва сучасні виробники пропонують спеціалізовані твердосплавні свердла з кутом при вершині 180° (Flat Bottom). Такий спеціалізований тип осьового інструмента призначений для роботи в складних умовах врізання (рис. 2, б) та дозволяє виключити попереднє фрезерування лисок. Особливістю такого свердла є оптимізована форма стружкових канавок для відведення стружки. Плоский торець добре працює як пілотний, тобто формує стабільну плоску лунку (1D) на невелику глибину під основне свердло.

При використанні сучасних сверدل для свердління на похилих поверхнях обов'язковим є урахування рекомендацій виробників щодо зменшення значень швидкостей і подач при врізанні та при виході.

Таким чином, урахування новацій щодо технологічних можливостей свердління глибоких отворів малих діаметрів у криволінійних поверхнях дає можливість значно підвищити продуктивність процесу за рахунок скорочення технологічного часу шляхом зменшення кількості переходів, обрання сучасних різальних інструментів, призначення відповідних режимів різання.

Список посилань

1. Глибоке свердління та його особливості [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://novaengineering.com.ua/glyboke-sverdlinnya-ta-jogo-osoblyvosti/>
2. Li X. et al. Analytical Model of Hole Diameter and Self-Guiding Machining Mechanism of BTA Deep Hole Drilling // Materials. — 2022. — Vol. 15. — №15. — DOI: 10.3390/ma15155329. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://mdpi.com/1996-1944/15/15/5329>
3. Powerful guidance at new depths [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.walter-tools.com/en-us/news-kratotec-dc180-2024>

УДК 621.9

Давиденко В.В., аспірант
Медведєв В.В., канд. техн. наук, доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, vadim.medvedev@ua.fm

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Технологічна підготовка виробництва у сучасному машинобудуванні характеризується високими вимогами до якості та швидкості розроблення технологічної документації. Значна частина помилок виникає саме на етапі формування маршрутно-операційного технологічного процесу (МОТП), оскільки традиційний підхід передбачає ручну перевірку, що зумовлює суттєві витрати часу та високу ймовірність помилок. Існуючі CAD/CAM-системи ефективно вирішують задачі генерації траєкторій інструменту, проте комплексна автоматизована верифікація МОТП з урахуванням усіх поверхонь деталі, технологічної послідовності та візуальної симуляції стану деталі після кожної операції залишається невирішеною задачею [1, 2].

Аналіз літератури [1–4] свідчить про відсутність інтегрованого рішення, яке б поєднувало розпізнавання поверхонь 3D-моделей деталі та заготовки [4], синтаксичний аналіз МОТП, його автоматичну конвертацію в операційний технологічний процес (ОТП), поопераційну візуальну симуляцію у вигляді цифрового двійника [3] та генерацію структурованого звіту. Метою роботи є розроблення алгоритму автоматизованої верифікації МОТП на основі 3D-моделі деталі та заготовки із застосуванням концепції цифрового двійника.

Запропонований алгоритм реалізує замкнений цикл обробки даних. Вхідними даними є 3D-модель готової деталі, 3D-модель заготовки та текстовий документ МОТП у вигляді таблиці або структурованого тексту. 3D-моделі деталі та заготовки використовуються як номінальні геометричні еталони, а реальні відхилення форми та розташування поверхонь враховуються через задання полів допусків на номінальні розміри: система оперує не ідеалізованими поверхнями, а діапазонами геометричних параметрів. На етапі аналізу геометрії виконується топологічне розділення моделі на грані, ребра та вершини з подальшою класифікацією поверхонь за кривизною та нормальними (плоскі, циліндричні, конічні, сферичні, вільні). Для кожної поверхні визначається повний набір характеристик: геометрична форма та її параметри (діаметр, довжина, кут, радіус), точність розмірів і квалітет, допуски форми (площинності, циліндричності, круглості) та розташування (паралельності, перпендикулярності, співвісності), шорсткість (R_a , R_z), вимоги до термічної та хімічної обробки. Синтаксичний аналіз МОТП включає перевірку обов'язкових полів, структурування та сортування операцій, визначення маршруту обробки, нормалізацію назв поверхонь та інструментів, що забезпечує усунення внутрішніх неузгодженостей на ранніх етапах.

Конвертація МОТП в ОТП виконується з прив'язкою кожної операції до конкретних поверхонь і контролем технологічної послідовності (чорнова обробка перед чистовою, відповідність типів операцій типам поверхонь, призначення технологічних баз). Цифровий двійник створюється на основі булевих операцій видалення матеріалу та поопераційно симулює стан деталі, виділяючи оброблені поверхні, залишковий припуск та інструмент. Реальні відхилення геометрії заготовки враховуються заданням полів допусків на номінальні розміри. Зіставлення поверхонь 3D-моделі з результатом симуляції на кожній операції виявляє формальні невідповідності: відсутність операції для поверхні, порушення задокументованої послідовності, неможливість обробки інструментом конкретної поверхні. На завершальному етапі формується структурований звіт із підсумковим вердиктом щодо прийнятності МОТП для реалізації.

Розроблений алгоритм забезпечує автоматичне виявлення неузгодженостей у технологічній документації, скорочення часу підготовки виробництва та гарантує охоплення кожної поверхні деталі відповідними технологічними переходами з дотриманням вимог точності та шорсткості. Слід наголосити, що система не класифікує технологічні рішення як однозначно «помилкові»: вона виявляє формальні невідповідності, тоді як остаточне рішення щодо прийнятності технологічного маршруту залишається за технологом. Реалізація алгоритму є практично можливою в сучасних умовах: наявні геометричні ядра (Open CASCADE, ACIS), бібліотеки машинного навчання (PyTorch, TensorFlow), а також обчислювальні ресурси GPU та хмарних сервісів забезпечують виконання булевої симуляції та розпізнавання поверхонь у прийнятний для виробництва час, що підтверджує практичну реалізованість запропонованого рішення на підприємствах машинобудування.

Список посилань

1. Xu X. Computer-aided process planning – a critical review of recent developments and future trends / X. Xu, L. Wang, S. T. Newman // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2011. – Vol. 24, No. 1. – P. 1–31.
2. Fountas N. A. A survey on smart automated computer-aided process planning (ACAPP) techniques / N. A. Fountas, N. M. Vaxevanidis, C. I. Stergiou, R. Benhadj-Djilali // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 100, No. 9–12. – P. 2815–2833.
3. Lu Y. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues / Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, X. Xu // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2020. – Vol. 61. – P. 101837.
4. Chu X. Machining feature recognition based on a novel multi-task deep learning network / X. Chu, Y. Sun, Y. Cao, J. Liu, Z. Xu // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2022. – Vol. 77. – P. 102351.

УДК 629.7.018.77

Закревський А.А.

ТОВ «Ньюфолк НКЦ», andrey.zakrevskij@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ДРОНІВ В ПОЛЬОВИХ УМОВАХ ФАХІВЦЯМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ БРИГАДИ

Ключові переваги концепції адитивного виробництва для оборони відомі: швидка розробка продукту, свобода дизайну, індивідуальне обладнання, локалізоване виробництво під замовлення [1]. Реалізація цієї концепції щодо виробництва дронів у безпосередній близькості до лінії бойового зіткнення вимагає принципово іншого підходу по відношенню до технології, що існує у цивільному секторі чи стаціонарних промислових лабораторіях - технології польового виготовлення децентралізованими бригадами (ДБ) фахівців. Традиційні системи моделювання шляхом пошарового наплавлення (Fused Deposition Modeling), які орієнтовані на друк термопластиками типу полімолочної кислоти чи акрилонітрілбутадієнстиролу, виявляються непридатними для роботи зі структурними енергетичними матеріалами, які використовуються при виготовленні дронів. Головна перешкода полягає у необхідності високої температури плавлення філаменту, що створює недопустимі ризики мимовільної детонації або термічного розкладу активних наповнювачів та окиснювачів, інтегрованих у корпус дрону. Крім того, висока енергоємність таких систем та їхня надмірна чутливість до механічних вібрацій роблять їх вразливими в умовах тимчасових польових майданчиків. Альтернативою, що повністю відповідає суворим вимогам воєнного часу та логіці енергетичної прагматики, є технологія прямого нанесення чорнил або паст (Direct Ink Writing). Ця методика базується на екструзії в'язких композитних мас при кімнатній або контрольованій низькій температурі, що дозволяє безпечно

інтегрувати в єдину полімерну матрицю високоенергетичні компоненти, наноцелюлозні армувальні структури та хімічні окиснювачі без наближення до порогу термічної стабільності вибухових сумішей.

Інженерна архітектура мобільної системи прямого нанесення паст для потреб ДБ повинна базуватися на засадах надлишкової конструкційної жорсткості при одночасній мінімізації загальної маси обладнання. На відміну від громіздких лабораторних установок, рама польового 3D-принтера має бути спроектована з використанням легких титанових сплавів або інноваційних композитів із високим коефіцієнтом поглинання механічних вібрацій. Це забезпечує необхідну точність позиціонування екструзійного сопла навіть у складних умовах зовнішнього впливу, таких як артилерійські обстріли або робота поблизу важкої техніки. Кінематична схема типу CoreXY (де обидва двигуни за осями X та Y залишаються нерухомими щодо рами) є найбільш виправданою з військово-технічної точки зору, оскільки вона дозволяє суттєво зменшити масу рухомих частин і досягти високих швидкостей переміщення друкуючої головки при збереженні ідеальної стабільності платформи. З точки зору енергетичного планування, критично важливою є інтеграція приводів постійного струму з напругою 24V, які здатні живитися безпосередньо від мобільних акумуляторних батарей або від компактних паливних елементів, що використовують рідкі органічні носії водню (Liquid Organic Hydrogen Carriers) та біоетанол. Це дозволяє уникнути потреби у важких та демаскувальних перетворювачах напруги, підвищуючи загальну енергетичну стійкість виробничого циклу.

Ключовим технологічним вузлом такої системи є спеціалізована екструзійна головка, розроблена спеціально для переробки високонаповнених енергетичних композитів на основі каніфолі. На відміну від примітивних шприцевих екструдерів, найбільш ефективним рішенням є застосування двошнекової системи подачі з інтегрованими мікро-дозаторами. Такий підхід забезпечує не лише стабільну рівномірність виходу матеріалу, але й здійснює додаткову гомогенізацію енергетичної пасти безпосередньо за мілісекунди до нанесення чергового шару корпусу. Екструдер повинен бути оснащений змінними керамічними соплами з антифрикційним покриттям, яке запобігає закупорюванню тракту мікрокристаллами твердих окиснювачів. Особлива увага приділяється інтелектуальній системі активного контролю в'язкості, де високочутливі сенсори тиску в реальному часі коригують швидкість подачі матеріалу залежно від реологічних змін пасти та поточної температури навколишнього середовища. Це має вирішальне значення для безперебійної роботи в польових умовах: неопалюваних фортифікаційних спорудах або в екстремальних кліматичних зонах, від арктичної тундри до пустельних регіонів.

Енергетична ефективність мобільної виробничої платформи є визначальним фактором при плануванні тривалих автономних рейдів у глибину території противника. Традиційні системи адитивного виробництва витрачають до 60% загальної енергії на інтенсивний підігрів робочої поверхні для забезпечення адгезії першого шару деталі. У представленій концепції використовується унікальна природна здатність каніфольної матриці до хімічної адгезії при контакті з субстратом, що дозволяє повністю відмовитися від нагрівальних елементів платформи. Загальна споживана потужність одного вузла прямого нанесення пасти не перевищує 150 - 200 ватів. Це дозволяє малим ДБ одночасно експлуатувати декілька одиниць обладнання протягом тривалого часу, використовуючи лише енергію одного мікро-паливного елемента. Така радикальна енергетична ощадливість перетворюється на логістичну перевагу: кожен зекономлений джоуль енергії конвертується у додатковий грам палива для дронів або у додаткові години функціонування зашифрованої мережі зв'язку. Аналіз енергобалансу бригади підтверджує, що адитивне виробництво за «холодною» технологією є єдиним життєздатним шляхом до створення нескінченного боєзапасу в умовах повної ізоляції від основних ліній постачання.

Точність та повторюваність параметрів виробів у польових умовах досягається завдяки впровадженню систем адаптивного комп'ютерного калібрування. Мобільна установка оснащується лазерним сканером поверхні (Light Detection and Ranging), який перед початком кожного циклу друку формує високоточну цифрову карту висот робочого простору. Це дозволяє програмному забезпеченню автоматично компенсувати будь-які геометричні перекоси, спричинені встановленням обладнання на нерівну поверхню ґрунту. З військової точки зору, це гарантує отримання дронів з ідентичними аеродинамічними характеристиками незалежно від зовнішніх умов чи рівня технічної підготовки фахівців ДБ. Використання програмного забезпечення з відкритим кодом, адаптованого для завдань прямого нанесення паст, забезпечує високу живучість системи, оскільки будь-який критичний вузол може бути діагностований та відновлений за допомогою заздалегідь підготовлених запасних частин, виготовлених на цій же установці.

Список посилань

1. Горбулін В.П. Тенденції дронізації в Україні на сучасному етапі / В.П.Горбулін, С.П.Мосов. Вісник Національної академії наук України. 2024. №12 – с. 40-48. DOI: 10.15407/vism2024.12.040.

УДК 674.05:621.9.004.18:519.87

Іванишин Т.В., канд. техн. наук, доцент
Поберейко Б.П., докт. техн. наук, професор
Валюх О.А., канд. техн. наук, доцент

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, acit@nltu.edu.ua

ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУР АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ МАШИН

Необхідною передумовою ефективного проєктування, виготовлення та експлуатації автоматизованих систем машин є математичний опис процесів їх функціонування з урахуванням стохастичного характеру тривалостей технологічних операцій. Реальні виробничі процеси супроводжуються випадковими коливаннями часу оброблення заготовок, виникненням простоїв, зміною технічного стану обладнання, нестабільністю властивостей матеріалу та впливом інших неконтрольованих чинників, що суттєво впливають на продуктивність і надійність машинних систем. Тому застосування математичних моделей дає змогу досліджувати закономірності функціонування автоматизованих ліній, прогнозувати накладені втрати робочого часу, оцінювати ефективність різних структурних і компоновальних рішень та визначати оптимальні режими роботи обладнання [1-4]. Це створює наукове підґрунтя для проєктування нових високопродуктивних автоматизованих ліній, а також для оптимізації й удосконалення вже діючих виробничих систем з метою підвищення їх продуктивності, надійності та економічної ефективності.

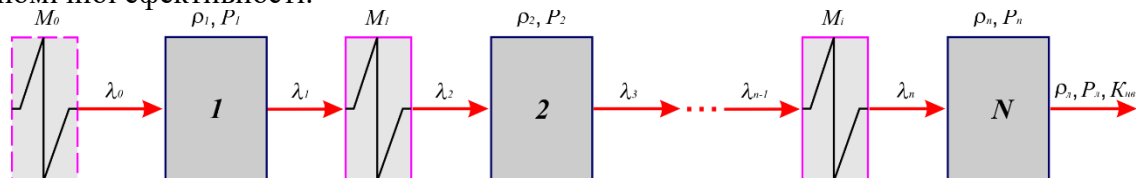


Рис. 1 – Структурна схема автоматизованої системи машин: 1, 2, ..., N – машини;

$M_0, \dots, M_i$ – місткості накопичувачів заготовок; $\lambda_0, \dots, \lambda_n$ – інтенсивності

подачі заготовок, $\rho_1, \dots, \rho_n$ – коефіцієнти використання робочого часу машин;

$P_1, \dots, P_n$ – продуктивності машин, ρ_n – коефіцієнт використання робочого

часу лінії, K_{nv} – коефіцієнт накладених втрат робочого часу лінії

За результатами теоретичних і практичних досліджень процесів функціонування автоматизованих систем машин у лісовій та деревообробній галузях встановлено, що тривалості технологічних операцій механічної обробки заготовок, як неперервні випадкові величини, адекватно описуються моделлю Ерланга з відповідною функцією розподілу ймовірностей [1, 2]:

$$F(t) = p\{\tau < t\} = 1 - e^{-K_n P_n t} \sum_{i=0}^{K_n-1} \frac{(K_n P_n t)^i}{i!}, \quad (1)$$

де $p\{\tau < t\}$ – ймовірність того, що тривалість операції τ на верстаті буде меншою від деякої її величини t ;

$P_n = 1/\bar{t}_n$ – продуктивність операції, де $\bar{t}_n$ – середня тривалість операції;

K_n – параметр розподілу Ерланга (коефіцієнт стабільності операцій на верстатах):

$$K_n = \frac{\bar{t}_n^2}{S^2(t_n)} \quad (2)$$

де $S^2(t_n)$ – величина дисперсії тривалості операції на верстаті.

Продуктивність автоматизованої системи машин визначається як добуток двох основних якісних параметрів будь-якого верстата, що входить до її структури [2]:

$$P_L = \rho_1 P_1 = \rho_2 P_2 = \dots = \rho_n P_n. \quad (3)$$

Коефіцієнт використання робочого часу всієї автоматизованої системи машин може бути визначений за допомогою виразу, що базується на положеннях теорії продуктивності ліній [2, 3]:

$$\rho_L = \frac{1}{1 + (\sum t_{ne} / \tau_u)} = \frac{1}{1 + \sum \frac{1 - \rho_n}{\rho_n}} \quad (4)$$

де $\sum t_{ne}$ – сумарні власні позациклові втрати робочого часу машин, хв;

τ_u – тривалість робочого циклу системи машин, хв.

Тоді коефіцієнт накладених втрат робочого часу автоматизованої системи машин визначається за виразом [1-3]:

$$K_{не} = 1 - \rho_L. \quad (5)$$

Список посилань

1. Дудюк Д. Л. Оцінка й елімінування втрат робочого часу в автоматизованих системах деревообробного виробництва / Д. Л. Дудюк, Л. Д. Загвойська. – Львів: вид. дім “Панорама”, 2003. – 140 с.
2. Іванишин Т. В. Моделювання двоверстатної автоматизованої лінії з нестабільним ритмом роботи та стохастичними тривалостями оброблення деталей / Т. В. Іванишин, Б. П. Поберейко, О. А. Валюх // Міжнародний електронний науково-практичний журнал “WayScience”: зб. наук. тез IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions, 8-9 червня 2023 р. – Дніпро, 2023. – С. 155-157.
3. Іванишин Т. В. Система масового обслуговування як модель для формалізації показників ефективності функціонування автоматизованих ліній з жорстким агрегуванням двох машин / Т. В. Іванишин, Б. П. Поберейко, О. А. Валюх // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк: ЛНТУ, 2023. – №76. – С. 86-90. DOI 10.36910/775.24153966.2023.76.12.
4. Іванишин Т. В. Моделювання та аналіз якісних показників функціонування автоматизованих машинних систем змішаної структури // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, вип. 101: зб. наук.-техн. праць Міжнародної науково-практичної конференції «Розбудова і відновлення машинобудівного комплексу України». – Харків: ХНАДУ, 2023. – С. 7-12. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.7.

УДК 621.878.23-182.38

Федишин Б.М., PhD, асистент

Київський національний університет будівництва і архітектури, fedyshyn_bm@knuba.edu.ua

СТВОРЕННЯ СІТКИ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО СТЕНДУ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН

Створення за допомогою САД систем, 3D моделі приводу з рухомим просторово орієнтованим ножом дозволяє виконати розбиття моделі на сітку кінцевих елементів (рис. 1. а) це надає можливість симулювати різні види роботи, навантажень та лінійних переміщень (рис. 1. б). Також за рахунок побудованої 3D моделі приводу, можна швидко відтворити натурну модель приводу переміщення, та самого рухомого просторово орієнтованого ножа відвалу бульдозера [1, 3], без створення серії прототипів.

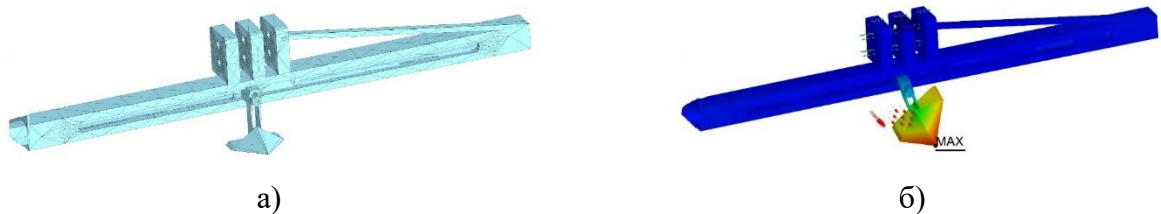


Рис. 1 – 3D модель: а) сітка скінченних елементів б) візуалізація сумарного лінійного переміщення

Отримані дані під час симуляцій дають можливість вирішити відомі недоліки випробувального стенду [2] та удосконалити його конструкцію. Також такі симуляції надають розуміння як розповсюджується навантаження в моделі, що надає змогу правильно розмістити вимірювально-реєструюче обладнання (рис. 2).

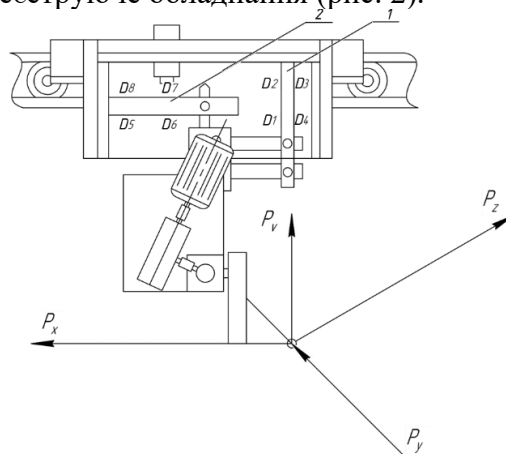


Рис. 2 – Схема дії сил опору робочого середовища та розміщення тензодатчиків:

1 – тензодатчики вимірювання осьової і тангенціальної сили різання; 2 – тензодатчики вимірювання нормальної і ортогональної сили різання

Список посилань

1. Rashkivskiy V., Fedyshyn B. (2023). Development of the information model of the soil cutting process spatially oriented knife of dynamic action. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, (102), 24–30. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0301>
2. Патент України на винахід 13846, МПК G 01 L 5/16, G 01 N 3/58 (2006.01). Стенд для реєстрації сил різання / Л. Є. Пелевін, М. О. Пристайло, Т. Ю. Пристайло (Україна); заявник і патентовласник Науково-дослідний інститут будівельної, дорожньої та інженерної технології, № у 2005 10393; заявлено 03.11.2005; опубліковано 17.04.2006, Бюлетень № 4.
3. Rashkivskiy V., Fedyshyn B. (2023). Modelling of soil destruction process by bulldozer using a spatially oriented working unit. Transfer of innovative technologies, 6(1), 58–70. <https://doi.org/10.32347/tit.2023.61.0202>

УДК 62-5:681.2; 004.93

Копей В.Б., докт. техн. наук, професор
Онисько О.Р., докт. техн. наук, професор
Крошней О.Д., студент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
volodymyr.kopey@nuing.edu.ua

МОДЕРНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З ІНДИКАТОРАМИ ГОДИННИКОВОГО ТИПУ ЗА ДОПОМОГОЮ ARDUINO ТА OPENCV

На багатьох машинобудівних підприємствах досі застосовують контрольні пристрої з індикаторами годинникового типу, наприклад для вимірювання і контролю відхилень форми і розташування поверхонь. Проте такі вимірювання важкого автоматизувати. Замість індикаторів годинникового типу можна застосувати сенсори лінійного переміщення, що здатні передавати дані у цифровому вигляді для їхньої подальшої обробки. Однак їхня ціна є значно вищою, а конструкція пристрою потребує певної модифікації для їхнього встановлення.

Метою цієї роботи є розроблення концепції низьковитратної модернізації пристроїв з індикаторами годинникового типу, а також алгоритму та програмного забезпечення для автоматизації вимірювань.

Розглянемо приклад вимірювання радіального або торцевого биття деталей обертання. Відповідні контрольні пристрої містять підшипникові вузли або центри для обертання деталі та індикатор, що торкається поверхні з відхиленнями. Контроль биття виконується шляхом обертання деталі рукою з визначенням крайніх положень стрілки індикатора.

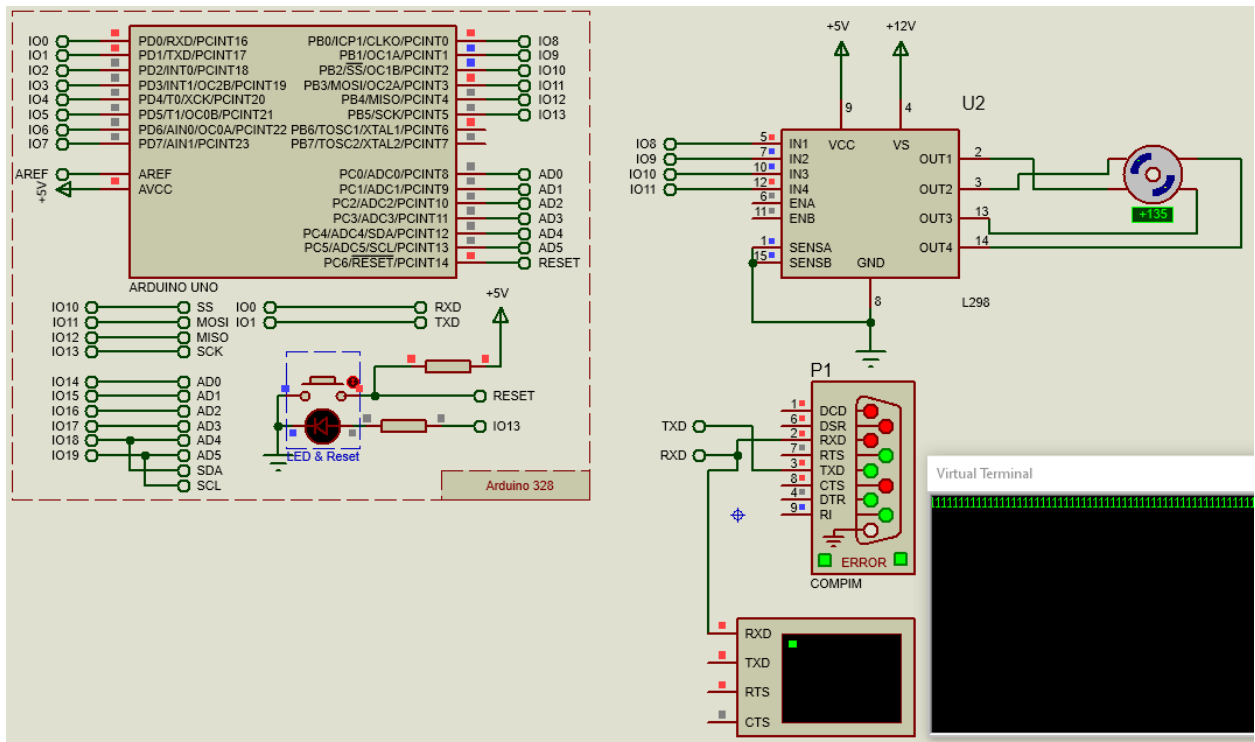
Для автоматизації цього процесу знадобиться мінімальна модернізація контрольного пристрою – оснащення його кроковим двигуном та веб-камерою. За допомогою крокового двигуна можна повертати деталь на кут за командами керуючої програми. Для цього знадобиться дешевий мікроконтролер, наприклад Arduino Uno, та недорогий драйвер крокового двигуна, наприклад A4988. В мікроконтролер завантажено просту програму (скетч stepperUart.ino [1]), що отримує з комп'ютера команду кроку (наприклад "1") через UART і повертає двигун на мінімальний кут, наприклад 1,8°. На комп'ютері працює Python-програма mainArduino.py [1], що з використанням PySerial надсилає цю команду 360/1,8 раз для здійснення обертання на 360°. За допомогою USB-веб-камери і пакету машинного зору OpenCV 4.13 Python-модуль main1.py [1] розпізнає положення стрілки індикатора та перетворює його у відповідне значення переміщення. Основною функцією модуля є функція detect, яка повертає кут нахилу стрілки індикатора. Для точного розпізнавання положення стрілки запропоновано наступний її алгоритм:

1. Знайти усі лінії за допомогою перетворення Хафа.
2. Якщо кількість знайдених ліній менша двох, то функція повертає None.
3. Створити список з такими ознаками лінії, як координати точок, довжина, кут нахилу, відстань точок 1 і 2 до центра індикатора. У список додати тільки ті лінії, у яких точки розташовані близько до центра і краю.
4. Сортувати список за довжиною і шукати найдовшу лінію.
5. Шукати другу найдовшу лінію гострої стрілки. Вона повинна бути відхилена на невеликий кут, що залежить від форми стрілки, наприклад 4°.
6. Функція повертає середнє значення кутів двох знайдених ліній (рис. 1а).

Для віртуального тестування програми (без застосування реального контрольного пристрою) можна використати програму Proteus (Labcenter Electronics Ltd.) з компонентом COMPIR, що дозволяє скетчу обмінюватись даними з Python-програмою, та програму Com0Com, що створює віртуальні послідовні порти (рис. 1б).



a)



6)

Рис. 1 – Результат розпізнавання стрілки а) та Proteus-модель системи керування кроковим двигуном б)

Можливими способами удосконалення модуля для розпізнавання стрілки є використання інших алгоритмів машинного зору, їхнє комбінування [1], поєднання з алгоритмами машинного навчання (main6.py [1]) та тонке налаштування їхніх параметрів. Для запобігання стороннього впливу на зображення слід закривати індикатор і камеру циліндричним кожухом з рівномірним освітленням циферблату. Код розроблених програм (бета-версія) опубліковано на GitHub під вільною ліцензією [1]. Автори запрошують приєднуватись до проекту усіх зацікавлених.

Список посилань

1. Kopei V. Dial-Indicator-OpenCV. URL: <https://github.com/vkopey/Dial-Indicator-OpenCV> (accessed 17.05.2026).

УДК 621.941-229.3:531.133

Бойко А.В., аспірант

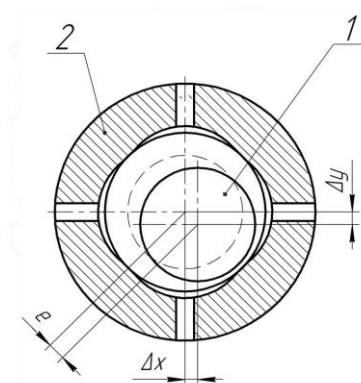
Єрошенко А.М., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Чернігівська політехніка», 0500605013a@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАЛЬНОГО ЗМІЩЕННЯ ОСІ ШПИНДЕЛЯ НА ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ

Одним з найважливіших параметрів які впливають на точність роботи шпинделя є коаксіальність осей шпинделя. Здатність опор підтримувати необхідне положення осі шпинделя в більшій мірі залежить від товщини масляної плівки та гідравлічних характеристик опори [1].

Для спрощення первинної математичної моделі розглянемо одну опору з чотирма карманами. Кармани 1 та 3 розташовані на осі X, а кишені 2 та 4 — на осі Y. Похибка форми шпинделя та опори дорівнює 0, похибка циліндричності шпинделя та опори дорівнює 0, в'язкість мастила незмінна. Подача мастила забезпечується системою живлення з регуляторами.



1 – шпиндель; 2 – гідростатична опора; Δx , Δy – зміщення шпинделя в горизонтальній та вертикальній площині

Рис. 1 – Схема змещення шпинделя в гідростатичній опорі

Точність обертання у межах однієї опори оцінюється через величину радіального зміщення $e(t)$ в момент часу t , де $x(t)$ та $y(t)$ — миттєві координати зміщення осі шпинделя під дією зовнішнього збурення

$$e(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$$

Координати зміщеного положення осі $x(t)$ та $y(t)$ формуються внаслідок балансу між зовнішніми силами (різання, вага, дисбаланс) та внутрішніми реакціями гідростатичного шару мастила. Баланс сил між зовнішнім навантаженням та реакцією масляного шару:

$$F_{x,ext}(t) = F_{x,hyd}(t)$$

$$F_{y,ext}(t) = F_{y,hyd}(t)$$

Гідростатичні сили [2]:

$$F_{x,hyd}(t) = [p_1(t) - p_3(t)] * A_e$$

$$F_{y,hyd}(t) = [p_2(t) - p_4(t)] * A_e$$

На зміщення осі впливають компоненти зовнішньої сили $F_{x,ext}$, $F_{y,ext}$, ефективна площа кишені A_e та гідродинамічні тиски в кожній із чотирьох кишень p_1 , p_2 , p_3 , p_4 .

Тиск у кожному окремому кармані p_j ($j = 1, 2, 3, 4$) визначається з умови нерозривності потоку: витрата мастила, що заходить у карман через капілярний дросель ($Q_{in,j}$), повинна

дорівнювати витраті мастила, що витікає з кармана через несучі перемички підшипника назовні ($Q_{out,j}$) [3]:

$$Q_{in,j} = Q_{out,j}$$

Підставляючи рівняння витрати мастила, яке входить і виходить, ми можемо вивести значення тиску в залежності від товщини плівки [2]:

$$p_j = \frac{p_s}{1 + \left(\frac{128 * B * l_c}{\pi * d_c^4} \right) * h_j^3} = \frac{p_s}{1 + \alpha * h_j^3}$$

На тиск у кармані впливають тиск живлення (p_s), геометрія дроселів (d_c , l_c), геометрія перемичок (B) та безпосередньо товщина масляної плівки (h_j).

Поточна товщина масляної плівки h_j над кожним карманом є функцією від початкового (номінального) радіального зазору опори h_0 та фізичного зміщення шпинделя (x , y)[4]:

$$h_1 = h_0 - x, \quad h_3 = h_0 + x$$

$$h_2 = h_0 - y, \quad h_4 = h_0 + y$$

Звідси випливає зворотний кінематичний зв'язок, який показує, що зміщення є функцією від зміни товщини плівок:

$$x = \frac{h_3 - h_1}{2}, \quad y = \frac{h_4 - h_2}{2}$$

Об'єднуючи всі рівні в єдину систему, підставимо значення тисків через товщину плівок у рівняння рівноваги сил:

$$F_{x,ext} = A_e * p_s * \left[\frac{1}{1 + \alpha * h_1^3} - \frac{1}{1 + \alpha * h_3^3} \right]$$

$$F_{y,ext} = A_e * p_s * \left[\frac{1}{1 + \alpha * h_2^3} - \frac{1}{1 + \alpha * h_4^3} \right]$$

Для отримання прямої інженерної залежності зміщення від товщини масляної плівки проведемо лінеаризацію кубічної функції в околі номінального зазору h_0 . Це дозволяє отримати фінальне аналітичне рівняння некоаксіальності (зміщення осі шпинделя e):

$$e = \frac{\sqrt{F_{x,ext}^2 + F_{y,ext}^2} * (1 + \alpha * h_0^3)^2}{6 * A_e * p_s * \alpha * h_0^2}$$

Список посилань

1. Fedorynenko, D. Yu., Sapon, S. P., & Boyko, S. V. Accuracy of Spindle Units with Hydrostatic Bearings. *Acta Mechanica et Automatica*. 2016. Vol. 10, no. 2. P. 117–124.
2. Bassani, R., & Piccigallo, B. *Hydrostatic Lubrication*. Volume 22 (Tribology Series). Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. 541 p.
3. Stolarski, T. A. *Tribology in Machine Design*. 2nd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 352 p.
4. Федориненко Д. Ю., Сапон С. П., Космач О. П. Інформаційно-вимірювальний комплекс для дослідження точності шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах. *Науковий вісник НГУ*. 2015. № 6. С. 58–64.

УДК 621.438:620.193/199:621.793.7

Вишнепольский Є.В., канд. техн. наук, доцент

Бондарев А.А., аспірант

Національний університет «Запорізька політехніка», andrey.bondarev@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНІЗМІВ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Газотурбінний двигун (ГТД) є високотехнологічною системою з широким спектром застосування – від цивільної авіації до техніки спеціального призначення. Удосконалення процесів виготовлення його деталей потребує пошуку нових рішень для захисту складнопрофільних поверхонь від газоабразивного зношування та термічної деградації. Найбільш репрезентативним прикладом таких вузлів є сопловий апарат (СА). Його геометрія визначається формою газоповітряного тракту (ГПТ) та лопатками зі змінним профілем кривизни [1, 2]. Незалежно від конструктивного виконання – у вигляді складальної одиниці чи монолітної деталі – ключовими елементами, що потребують зміцнення, залишаються трактові поверхні та перо лопатки.

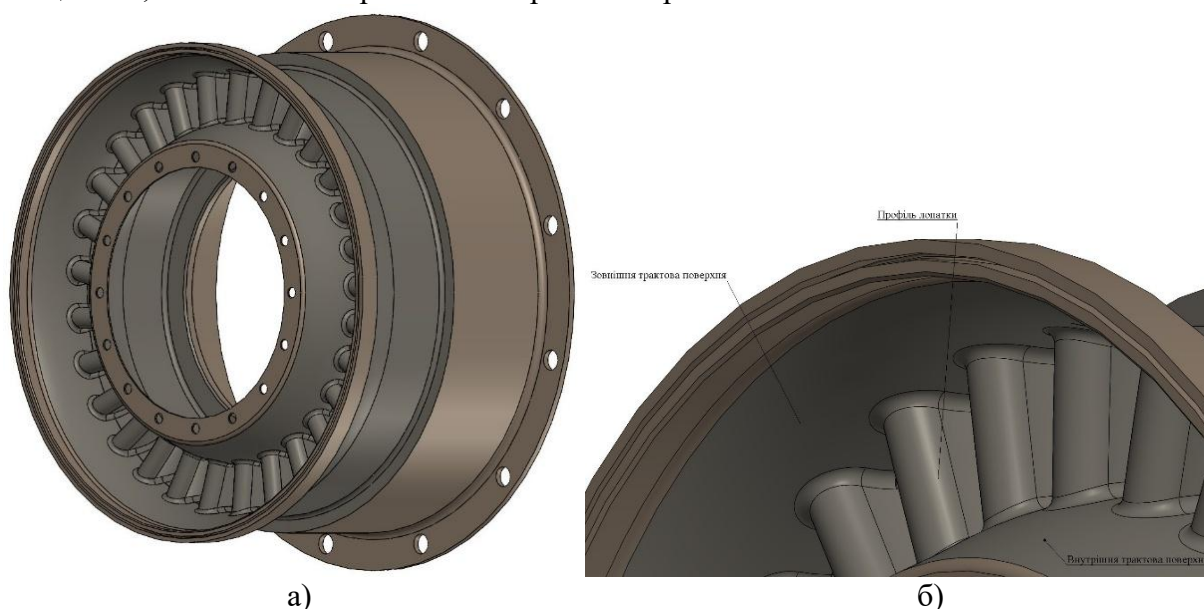


Рис. 1 – Типовий вигляд а) 3D-моделі СА ГТД б) складова ГПТ (збільшено)

Сьогодні до основних методів, що дозволяють підвищити здатність таких складних просторових конструкцій витримувати екстремальні термомеханічні навантаження (зокрема форсажні режими військової авіації та тривалі цикли експлуатації цивільних магістральних лайнерів), належать наступні рішення. Вони враховують як вимоги щодо стійкості до високих температур, так і технологічні аспекти: забезпечення монолітності конструкції, скорочення циклу виготовлення та підвищення ремонтпридатності виробу:

1) підбір матеріалу. Пріоритет для виготовлення надається саме застосуванню жароміцних та жаростійких сплавів типу Inconel 718 чи 738, René 80 чи N5 – нікелевим суперсплавам з високою термостійкістю [3] або сплавам типу ЖС чи ВХ [4] зі схожими фізико-хімічними характеристиками та гарними ливарними властивості. Особлива увага приділяється використанню сплавів, спроможних до спрямованої кристалізації або отримання монокристалічної структури, що дозволяє суттєво підвищити опір повзучості в умовах високих відцентрових та термічних навантажень. Це забезпечує зменшенню меж зерен, що суттєво підвищує опір повзучості та термічний втомі в умовах інтенсивного газодинамічного та теплового впливу в проточній частині двигуна;

2) підбір чи проектування «з нуля» геометрії ГПТ. Застосування попередніх напрацювань закладає міцний фундамент в тандемі з розрахунками, які проводять за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) типу ANSYS [5] чи Abaqus або Simcenter (NX Nastran). Це дозволяє провести аналіз напружено-деформованого стану швидше та передбачити ймовірність утворення дефектів в критичних зонах ще до виготовлення прототипу. На етапі перевірки моделюється ефективність систем пасивного та активного повітряного охолодження пера лопаток і трактової поверхні. Окремо розглядається можливість декомпозиції соплового апарату на складальні одиниці для підвищення ремонтпридатності, спрощення технології виготовлення та можливості заміни окремих елементів деталей у процесі експлуатації;

3) нанесення теплозахисного покриття (ТЗП). Найпоширенішими наразі виступають наступні: на основі $ZrO_2-Y_2O_3$, з вмістом Al та Si або металокерамічні на основі Cr_3C_2-NiCr [6]. Завдяки ТЗП утворюється більш стійка до пошкоджень поверхня, що ефективно протистоїть зародженню первинних дефектів (ерозійних виразок, мікротріщин).

Слід зазначити, що розглянуті методи можуть застосовуватися як в тандемі один з одним, так і окремо в залежності від умов роботи ГТД та його призначення. Застосування такої варіативності забезпечує можливість адаптувати технологічний цикл до конкретних експлуатаційних вимог, здатних точково посилювати найбільш навантажені ділянки профілю без надмірного здорожчання всього виробу.

Наразі найбільш поширеним напрямком для досліджень в провідних авіабудівних компаніях залишаються саме пошуки методів нанесення та підбору матеріалів для ТЗП, зокрема методи забезпечення їхньої високої адгезійної міцності та стійкості до термічної втоми в умовах багаторазових циклів «нагрів-охолодження», які є критичними для циклічних режимів роботи двигунів подвійного призначення.

Список посилань

1. The Jet Engine / Rolls-Royce. — 5th ed. — Derby : Rolls-Royce plc, 2015. — 288 p.
2. Boyce M. P. Gas Turbine Engineering Handbook. 4th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011. 950 p.
3. Reed, R. C. (2006). The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>.
4. Зубченко, А. С. (ред.). (2003). Марочник сталей и сплавов (2-е изд., доп. и испр.). Машиностроение.
5. T. Stolarski, Y. Nakasone and S. Yoshimoto, «Engineering Analysis with ANSYS Software»; Elsevier Butterworth-Heinemann; 2006.
6. Lakhwinder, S., Vikas, C., & Grewal, J. S. (2012). A Review on Detonation Gun Sprayed Coatings. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 11(3), 243–265.

УДК 621.9.06.

Четвержук Т.І., канд. техн. наук, доцент
Редько Р.Г., канд. техн. наук, доцент
Полінкевич Р.М., канд. техн. наук, доцент
Редько П.Г., аспірант

Луцький національний технічний університет, eti_tar@ukr.net

МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ У ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Пружні деформації відомі за відносними зміщеннями всередині твердого тіла під дією зовнішніх сил. Згідно теорії деформацій, напружень і пластичності твердих тіл у контексті технічної механіки. У роботі [1] представлено методіку розрахунку силових зміщень вузлів металорізальних верстатів з використанням технологій CAD та CAE. Процеси, які пов'язані зі змінами геометрії ріжучого інструмента та відповідно його зносом впливають на кінцеву

точність оброблення деталей. Теплові ефекти в верстатах з ЧПК відповідають приблизно за 70% похибок оброблюваної заготовки, що призводить до витрат матеріалів, енергії та грошей. Відповідно в даній роботі ми розглянемо методи компенсації пружних деформацій у верстатах з ЧПК, що в свою чергу призведе до підвищення продуктивності механічного оброблення деталей із застосуванням верстатів з ЧПК [2] та ефективності виробництва.

Сучасні системи ЧПК використовують таблиці для компенсації багатьох похибок верстатів. Процедури для вимірювань та компенсації похибок мають велике значення та відповідають обмеженим вимогам до допусків, повторюваності та підходам статистичного аналізу. У світових системах управління якістю часто використовується нормальний розподіл для моделювання невизначеності вимірювань. Зазвичай пружні деформації у верстатах залишаються невідомими, і оператор повинен знаходити джерело невеликих похибок, коли розмір або поверхня деталі оцінюється як «поза допуском». На рис.1 представлено алгоритм чисельної компенсації деформацій у верстатах з ЧПК.

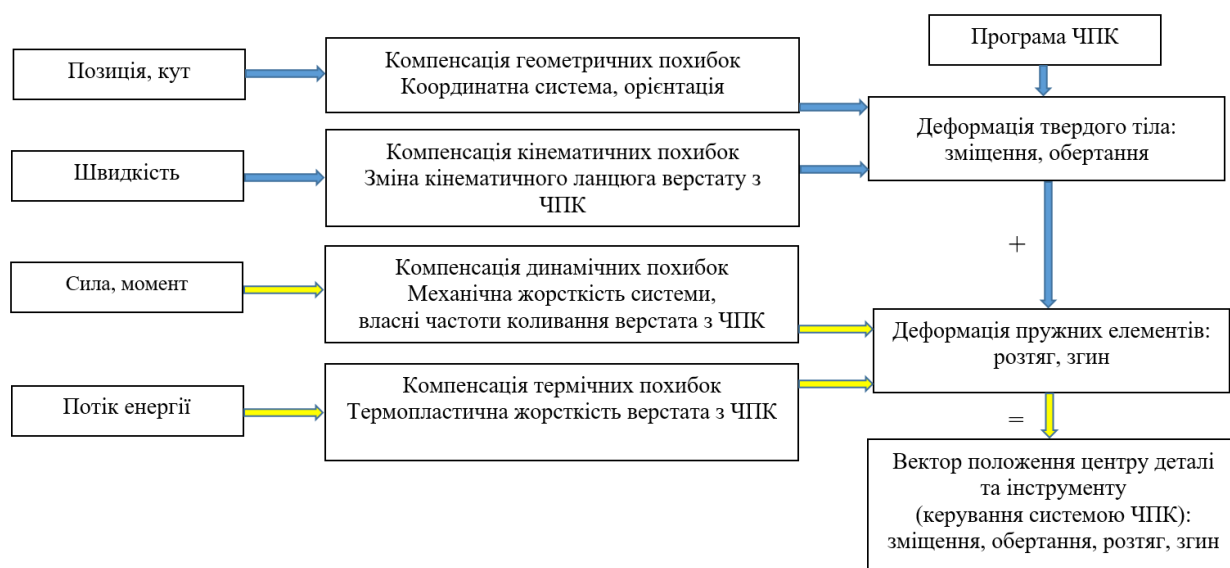


Рис. 1 – Алгоритм чисельної компенсації геометричних, кінематичних, динамічних та теплових деформацій під навантаженням у верстатах з ЧПК

Геометричні та кінематичні вимірювання похибок для верстатів з ЧПК у виробничому середовищі виконуються за допомогою великомасштабних лазерних вимірювальних пристроїв з компенсацією впливу навколишнього середовища. Вимірювання динамічних похибок вимагають визначених умов для створення сили та ходу між центральною точкою інструменту та заготовкою. Спеціальні процедури вимірювань для модального аналізу на основі динамічних збурень призводять до динамічної реакції верстата, причому збурення вимірюються акселерометрами у всьому кінематичному ланцюгу верстата з ЧПК. Динамічні шейкери (вібратори) забезпечують амплітуди вібрацій до міліметрів із силами в сотні кілоньютонів у діапазоні частот від 1 до 400 Гц.

Згідно алгоритму (рис. 1), починаючи з помилок у координатній системі, орієнтації та кінематичному ланцюгу, система ЧПУ забезпечує компенсацію геометричних та кінематичних помилок. Система ЧПУ виправляє деформації тіла за допомогою операцій «зміщення» та «обертання», виконаних за допомогою однорідних матриць трансформації. Синіми стрілками показано гармонійні компенсації позиції/кутів у умовах квазістабільності та без навантаження. Врахувавши механічну жорсткість, власні частоти коливання та термопластичну жорсткість верстата, система ЧПУ за підтримки цифрового двійника забезпечує динамічні та теплові компенсації похибок. Жовті стрілки позначають змінні компенсації під процесними навантаженнями. Ця стратегія чисельної компенсації геометричних, кінематичних, динамічних та теплових деформацій під навантаженнями

прогресує порівняно з пружними деформаціями з геометричних, кінематичних, динамічних та теплових модулів.

Фактичні значення приводів верстатів з ЧПК постійно вимірюються на частотному перетворювачі та передаються до PLC-контролера через швидку автоматизовану шину як змінні параметри (фактичне значення положення осі X, фактичне значення положення осі Y, фактичне значення положення осі Z, фактичне значення потужності шпинделя). Експериментальний верстат з ЧПУ буде також оснащено пристроєм інтернету речей (IoT), що містить комп'ютер з ЧПК-інтерфейсом для контролю та вимірювання змінних параметрів, розширюючи або замінюючи функції компенсації у комерційних системах ЧПК в режимі реального часу.

Грунтуючись на принципах та елементах похибок пружних деформацій, наступним кроком наших досліджень буде побудова модельної симуляції для реальних випробувань верстатів. Чисельне компенсування пружних деформацій у верстатах з ЧПК за даною методикою є інноваційним порівняно існуючими підходами, особливо у нестабільних температурах та силових навантаженнях процесів механічного оброблення у всій робочій зоні верстатного устаткування.

Список посилань:

1. Taras Chetverzhuk, Oleg Zabolotnyi, Viktor Sychuk, Roman Polinkevych and Anatolii Tkachuk. A Method of Body Parts Force Displacements Calculation of Metal-Cutting Machine Tools Using CAD and CAE Technologies. Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC), Print ISSN: 2516-0281, Online ISSN: 2516-029X, pp. 37-47, Vol. 3, No. 4, 1st October 2019, Published by International Association of Educators and Researchers (IAER), DOI: 10.33166/AETiC.2019.04.004, Available: <http://aetic.theiaer.org/archive/v3/v3n4/p4.html>.

2. Редько П.Р., Четвержук Т.І. Шляхи підвищення продуктивності механічного оброблення деталей із застосуванням верстатів з ЧПК. Тези доповідей XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент». м. Житомир 11-13 листопада 2025 р. С. 109-112.

УДК 621.798

Залета А.О., аспірант

Луцький національний технічний університет, zaleta.andriy@gmail.com

МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У МАШИНАХ ДЛЯ ПАКУВАННЯ ШТУЧНИХ ВИРОБІВ

У високопродуктивних пакувальних автоматах головними джерелами шуму та вібрації є вузли дозування, особливо мультиголовочні вагові дозатори, віброролки та відсікачі. Вібрація не лише знижує надійність пакувальної машини, а й часто призводить до пошкодження крихкої штучної продукції. Високий рівень шуму, в свою чергу, порушує норми охорони праці.

Метою даної роботи є дослідження причин зменшення ефективності функціонування машин для пакування штучних виробів внаслідок віброакустичних навантажень та аналіз методів зниження рівня вібрації.

До основних проявів руйнівного впливу вібрації безпосередньо на машину відносяться наступні:

1. Самовільне розкручування різьбових з'єднань, що призводить до появи люфтів, перекосів станини та, зрештою, до аварійної поломки.

2. Руйнування захисних оксидних плівок на металевих поверхнях, що призводить до фретинг-корозії – зносу, що виникає в місцях щільного прилягання деталей.

3. Поява мікроскопічних лунок на кільцях підшипника від ударів кульок або роликів в одні й ті самі точки, внаслідок чого підшипник починає шуміти, перегріватися і швидко руйнується.

4. Витіснення мастила із зони контакту рухомих деталей, що – через роботу в режимі сухого або граничного тертя – призводить до їх швидкого перегріву та заклинювання.

5. Поява мікротріщин у місцях спаювання на платах контролерів, що призводить до помилок у роботі машини.

6. Виникнення радіального биття штоків пневмоциліндрів, що прискорює зношування ущільнювачів та може призвести до розгерметизації пневмосистеми.

7. Розрегулювання давачів, яке може бути наслідком як механічного зміщення, так і електронного збою (декалібрування).

8. Поширення вібрації на вузол розмотування рулону, що призводить до зміщення пакувального матеріалу та спричиняє перекошування пакета і брак зварного шва.

Таким чином, вібрація діє як каталізатор системного зношування пакувальної машини. Вона запускає ланцюгові реакції, які безпосередньо впливають на надійність усього пакувального комплексу. Саме тому аналіз методів зниження віброакустичних навантажень є актуальною науковою задачею.

Отож, розв'язання задачі зниження віброакустичних навантажень у вузлах дозування штучної продукції лежить на стику прикладної механіки, динаміки машин, акустики та матеріалознавства [1-6].

Найбільш дієвим способом вирішення проблеми надмірного шуму та вібрацій є усунення джерела вібрації на етапі конструювання геометрії деталей. Ця мета може досягатись, зокрема, завдяки оптимізації траєкторії та профілю лотків: заміна прямолінійних вібралотків на лотки з оптимізованим криволінійним профілем (наприклад, брахістохронним або циклоїдальним) дозволяє продукції рухатися плавно, без мікроударів об стінки. Також може мати місце динамічне балансування рухомих частин, а саме – використання механізмів із противагами (демпферними масами), коли робочий орган, наприклад, заслінка дозатора, рухається в один бік, а балансир рухається в протилежний, гасячи інерційні сили. Не менш ефективною є зміна кута падіння продукції за рахунок каскадних або спіральних шибєрів з мінімальним кутом нахилу. За такої умови штучні вироби не падають, а плавно ковзають, зменшуючи при цьому акустичний удар [3].

У випадках, коли конструктивно вібрацію прибрати неможливо, її енергію потрібно перевести в іншу форму. На цьому рівні вирішення проблеми можуть бути застосовані вібродемпферні покриття внутрішніх поверхонь фасувальних бункерів та лотків спеціальними еластомерами, поліуретаном або харчовим силіконом. Вони гасять звук від удару штучних виробів об метал. Крім того, допускається виготовлення стінок дозаторів не з монолітного листового металу, а з тришарового матеріалу «сталь/в'язкопружний полімер/сталь». Така структура має високий коефіцієнт поглинання звуку та вібрації. В окремих випадках, якщо дозволяють санітарні норми та вимоги до міцності, доцільно замінювати металеві деталі виготовлені із сучасних полімерів (ПОМ або ПЕ-ВП), які завдяки своїм властивостям є значно тихішими в роботі [5].

Розглянемо також методи ізоляції та демпфування, адже вони заважають вібрації переходити від вузла дозування на загальну частину пакувальної машини. Варіантами реалізації цього методу є встановлення вібралотків та електромагнітних приводів на комбіновані опори (гумово-металеві або пневматичні), які відсікають високочастотні коливання, або ж закриття зони дозування акустичним екраном чи кожухом, який локалізує шум, не даючи йому поширюватись [6].

Ще одним ефективним напрямком усунення розглядуваної проблеми є група підходів, пов'язаних з керуванням приводами з використанням інтелектуальних систем, а саме: запобігання виникненню резонансу шляхом налаштування частоти роботи віброприводів так, щоб вона не співпадала з власною частотою коливань конструкції машини; замість різкого увімкнення/вимкнення приводу дозатора (прямокутний імпульс) задання сервоприводу згладженого S-подібного графіка прискорення; встановлення додаткових

п'єзоелектричних актуаторів, які генерують мікровібрацію у протифазі до основної руйнівної вібрації, взаємно анігілюючи їх.

Зауважимо, що найкращий ефект дає комплексне інженерне рішення: модернізація профілю лотка та його футерування поліуретаном у поєднанні з S-подібним керуванням приводом. Це дозволяє не лише знизити високочастотні коливання, а й підвищити точність дозування, подачі та пакування штучної продукції за рахунок стабілізації її потоку.

Список посилань

1. Гавва О. М. Динаміка пакувальних автоматів : монографія. – Київ : ІАЦ «Упаковка», 2011. – 232 с.
2. Якимчук М. В. Надійність та динаміка технологічного обладнання штучних виробів : навч. посіб / М. В. Якимчук, В. Г. Топольницький. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 184 с.
3. Яровий О. В. Дослідження віброакустичних характеристик дозувально-наповнювальних автоматів штучної продукції / О. В. Яровий, А. А. Бойко // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2019. – № 3. – С. 112-118.
4. Аркуша О. В. Зниження динамічних навантажень у вібротранспортних бункерах пакувальних комплексів / О. В. Аркуша, О. І. Пилипенко // Харчова промисловість, 2015. – № 18. – С. 45-51.
5. Клименко М. П., Шевченко В. М. Застосування полімерних композиційних матеріалів для гасіння коливань у робочих органах пакувальних машин / М. П. Клименко, В. М. Шевченко // Наукові праці НУХТ, 2021. – Т. 27, № 2. – С. 89-97.
6. Шостак Т. Л. Моделювання процесу віброізоляції високошвидкісних виконавчих механізмів фасувально-пакувального обладнання /Т. Л. Шостак // Технічна інженерія, 2022. – № 1(89). – с. 63-70.

УДК 621.941-229.3:531.133

Корюковець О. С., студент
Бойко С.В., канд. техн. наук, доцент
Ігнатенко О. А., ст. викладач

Національний університет «Чернігівська політехніка», oleksii6380@gmail.com

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ AUTODESK FUSION В ПРОЦЕСІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА

В умовах переходу промисловості до концепції Індустрії 4.0 та впровадження гнучких виробничих систем, критичного значення набуває швидкість та безперервність циклу «ідея – цифрова модель – готовий виріб». Традиційні системи автоматизованого проєктування (САПР) важкого та середнього класу, яскравим представником яких є SolidWorks, історично базуються на локальній архітектурі та модульному підході. Це часто призводить до розриву інформаційного потоку між етапами конструювання та безпосередньої технологічної підготовки виробництва (ТПВ). На противагу цьому, хмарні платформи нового покоління, зокрема Autodesk Fusion, пропонують принципово іншу філософію – All-in-One (CAD/CAM/CAE/PCB у єдиному середовищі) [3] [2]. Це зумовлює актуальність дослідження їхньої ефективності порівняно з класичними інструментами.

Дослідження робочих процесів в обох програмних комплексах дозволяє виокремити ряд концептуальних, технологічних та архітектурних відмінностей, які безпосередньо впливають на ефективність роботи інженера-конструктора та технолога.

1. Архітектура моделювання та управління структурою виробу (PDM). SolidWorks використовує традиційну парадигму розділення файлів: «Деталь» (Part), «Збірка» (Assembly) та «Креслення» (Drawing). Для ефективного керування цими зв'язками, особливо в командній роботі, підприємству необхідно розгортати окремий сервер і налаштовувати SolidWorks PDM. Натомість Fusion базується на хмарній системі управління даними, де контроль версій здійснюється автоматично [2]. Крім того, Fusion підтримує багатотільне моделювання в межах одного файлу (Multi-body design) та підхід «зверху-

вниз» (Top-Down). Це означає, що всі компоненти, їхні зчленування (Joints) та кінематика можуть розроблятися в єдиному робочому просторі. Додатковою CAD-перевагою Fusion є гібридне середовище: можливість безшовно поєднувати твердотільне параметричне моделювання з T-Splines (для створення складної ергономічної геометрії) та інструментами Direct Modeling для редагування імпортованих полігональних сіток (Mesh), що є незамінним при реверс-інжинірингу після 3D-сканування.

2. Наскрізна інтеграція CAD та CAM. Етап розробки керуючих програм для обладнання з числовим програмним керуванням (ЧПК) є головною конкурентною перевагою Fusion [3]. У випадку із SolidWorks, для повноцінної роботи технолога найчастіше необхідно інтегрувати сторонні плагіни (SolidCAM, Mastercam тощо) або експортувати геометрію в нейтральних форматах (STEP, IGES), що розриває зв'язок між моделлю та траєкторією. У Fusion середовище *Manufacturing* є вбудованим [2]. Будь-яка зміна розмірів чи допусків у конструкторському середовищі миттєво ініціює автоматичний перерахунок траєкторій різального інструмента без необхідності переналаштування переходів. CAM-модуль покриває широкий спектр завдань:

- *Субтрактивні технології*: підготовка програм для фрезерних верстатів (від базової 2.5D до складної безперервної 5-осьової обробки) та лазерного розкрою матеріалів;

- *Адитивні технології*: вбудовані слайсери для 3D-друку пластиками (FDM, SLA), синтезу металів, а також генерація G-коду для нестандартних кінематичних систем, таких як екструзія будівельних сумішей чи глини.

3. CAE-аналіз та хмарні обчислення. Виконання інженерних розрахунків методом скінченних елементів (MCE) у SolidWorks Simulation вимагає значних апаратних потужностей (процесора та оперативної пам'яті) безпосередньо на робочому місці інженера [1]. Fusion вирішує цю проблему шляхом делегування ресурсомістких процесів на хмарні кластери Autodesk [2]. Окремо варто виділити модуль *Generative Design* (генеративний дизайн), що базується на алгоритмах штучного інтелекту. На відміну від класичної топологічної оптимізації, яка лише видаляє зайвий матеріал, Generative Design самостійно синтезує десятки варіантів конструкції виходячи з крайових умов.

4. Командна взаємодія та гнучкість впровадження. Модель ліцензування Software as a Service (SaaS) та кросплатформеність (підтримка Windows і macOS) роблять Fusion надзвичайно гнучким інструментом [3]. Можливість відкривати доступ до 3D-моделей через браузер без встановлення ПЗ дозволяє миттєво узгоджувати технологічні рішення із замовниками або членами розподіленої команди. Це робить платформу оптимальним вибором для інноваційних хабів, сучасних освітніх центрів, фаблабів та мобільних інжинірингових лабораторій, де швидкість прототипування та мобільність мають вирішальне значення.

Висновки: Цифрова трансформація сучасного промислового простору вимагає не просто оновлення інструментарію, а докорінної зміни мислення. Проведений аналіз чітко демонструє, що Autodesk Fusion постає не просто як альтернатива класичним САПР, а як концептуально нова філософія інжинірингу, адаптована до викликів епохи Індустрії 4.0.

У той час як традиційні гіганти класу SolidWorks роками вибудовували потужні, але монументальні й локально обмежені екосистеми, Fusion руйнує звичні інформаційні бар'єри. Він стирає умовні кордони між творчим задумом конструктора (CAD), точним аналітичним розрахунком (CAE) та суворими технологічними реаліями виробничого цеху (CAM). Завдяки безшовній параметричній асоціативності хмарного середовища, шлях від першого цифрового ескізу до фізичного втілення деталі на ЧПУ-верстаті чи адитивній установці стає єдиним, безперервним і динамічним процесом.

Впровадження алгоритмів штучного інтелекту у вигляді генеративного дизайну та делегування важких обчислень у хмару звільняє інженера від рутини, дозволяючи зосередитися на головному – інноваціях та оптимізації. Fusion доводить, що майбутнє

технологічної підготовки виробництва належить мобільності, кросплатформеності та миттєвій командній взаємодії.

Звичайно, важка промисловість із багатотисячними збірками ще довго спиратиметься на класичні десктопні стандарти. Проте для гнучкого виробництва, високотехнологічних стартапів, сучасних освітніх хабів та експериментальних лабораторій Autodesk Fusion стає тим самим технологічним містком, який перетворює складні інженерні виклики на швидкі, елегантні та економічно ефективні рішення. Це не просто автоматизація процесів — це створення нового стандарту гнучкості, де межа між ідеєю та готовим продуктом стає тоншою, ніж будь-коли раніше.

Список посилань

1. Application of the CAD/CAE system Solidworks in the tasks of analysis of strength of parts of the clamping fixtures / O. Petrov та ін. *Journal of mechanical engineering and transport*. 2024. Т. 19, № 1. С. 95–102. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-95-102> (дата звернення: 17.05.2026).
2. Autodesk. Fusion overview. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
3. Shapr3D. CAD software comparison 2025: best tools by workflow and industry. *Shapr3D: 3D Modeling software | Windows & Mac & iPad*. URL: <https://www.shapr3d.com/content-library/cad-software-comparison-2025-complete-analysis-of-11-leading-platforms-for-manufacturing>

УДК 629.7.018

Семак І.В., ст. викладач
Гаркавенко С.О., студент

Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, inna.semak@npp.kai.edu.ua

АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів зумовлює підвищення вимог до конструкційних матеріалів [4-6]. Особливого значення набуває забезпечення високих показників міцності, надійності та довговічності за умов мінімізації маси конструкції. Актуальним є застосування композиційних матеріалів із покращеними характеристиками [1-3].

Особливу роль відіграє проблема зниження маси конструкції за одночасного підвищення її міцності та стійкості до втоми, температурних і корозійних впливів. Традиційні металеві матеріали поступово доповнюються або замінюються композиційними системами, що забезпечують значні переваги за питомими характеристиками [4, 5].

Метою роботи є аналіз властивостей конструкційних матеріалів для БПЛА та розробка підходу до їх комплексного оцінювання з урахуванням експлуатаційних факторів.

Об'єктом дослідження є конструкційні матеріали, що використовуються у безпілотних літальних апаратах, зокрема металеві сплави та полімерні композиційні матеріали.

Аналіз сучасних матеріалів, що застосовуються у конструкціях БПЛА, дозволив виділити три основні групи: металеві сплави, полімерні композиційні матеріали та функціональні матеріали спеціального призначення [4-6]. Кожна з цих груп характеризується перевагами та обмеженнями, що визначають область їх застосування.

Металеві матеріали (зокрема алюмінієві та титанові сплави) відзначаються високою надійністю та передбачуваністю властивостей, проте поступаються за питомою міцністю сучасним композиційним матеріалам [4]. У свою чергу, полімерні композиційні матеріали (вуглепластики, склопластики, органопластики) забезпечують значне зниження маси конструкції при збереженні або підвищенні міцнісних характеристик [1-3, 5].

Оцінювання якості конструкційних матеріалів здійснюється за сукупністю критеріїв, серед яких основними є механічна міцність, густина, термостійкість, корозійна стійкість та

довговічність [2, 3]. Для визначення зазначених характеристик використовуються як традиційні методи механічних випробувань, так і сучасні методи неруйнівного контролю, що дозволяють оцінювати стан матеріалу без його руйнування [1].

З метою підвищення об'єктивності та узагальнення результатів оцінювання доцільним є використання комплексного підходу на основі інтегрального показника якості [2, 3]. Такий показник дозволяє врахувати вплив декількох критеріїв одночасно та отримати узагальнену кількісну оцінку придатності матеріалу для використання у конструкціях БПЛА.

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i P_i$$

де Q – інтегральний показник якості матеріалу;

w_i – вагові коефіцієнти значущості окремих параметрів;

P_i – нормовані значення показників якості;

n – кількість врахованих критеріїв.

Вагові коефіцієнти визначаються з урахуванням умов експлуатації БПЛА та функціонального призначення конструкції. Запропонований підхід забезпечує можливість кількісного порівняння різних матеріалів та підвищує обґрунтованість прийняття інженерних рішень при їх виборі.

Для оцінювання якості конструкційних матеріалів застосовуються як руйнівні, так і неруйнівні методи контролю. Особливе значення мають методи неруйнівного контролю (ультразвуковий, термографічний, акустичної емісії), які забезпечують можливість діагностики стану матеріалів без порушення їх цілісності.

Проведений аналіз показав, що найбільш ефективним є комбіноване використання матеріалів у конструкції БПЛА [4-6]. Зокрема, застосування композиційних матеріалів для обшивки та допоміжних елементів у поєднанні з металевими сплавами для силових вузлів дозволяє досягти оптимального співвідношення маси та міцності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у:

- систематизації критеріїв оцінювання матеріалів для БПЛА;
- запропонуванні інтегрального показника якості;
- адаптації підходу до умов експлуатації безпілотних систем.

Практичне значення полягає у можливості використання запропонованого підходу при виборі матеріалів на етапах проєктування та модернізації БПЛА.

У роботі проведено аналіз конструкційних матеріалів для безпілотних літальних апаратів. Запропоновано підхід до їх комплексного оцінювання на основі інтегрального показника. Показано можливість кількісного порівняння матеріалів за сукупністю критеріїв. Отримані результати можуть бути використані при виборі матеріалів для авіаційних конструкцій.

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність використання комплексного підходу до оцінювання якості конструкційних матеріалів для БПЛА. Запропонований інтегральний показник дозволяє враховувати сукупність експлуатаційно значущих характеристик та забезпечує підвищення обґрунтованості інженерних рішень.

Встановлено, що найбільш перспективними є полімерні композиційні матеріали, які забезпечують високі питомі характеристики та відповідають сучасним вимогам авіаційної техніки.

Список посилань

1. Бороzeneць Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Застосування композиційних матеріалів в авіаційних конструкціях та проблеми оцінки їх стану // Науково-популярний журнал «Колега» НАН України, № 1. 2012 – С. 38-39.

2. Бороzeneць Г.М., Семак І.В. Оцінка впливу вологості і агресивних середовищ на фізико-механічні характеристики конструкційних вуглепластиків. Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування» № 3 (68). 2015 С. 85 – 89.

3. Борозенець Г.М., Семак І.В. Вплив конструктивно-технологічних факторів на міцність вуглепластиків // Проблеми тертя та зношування. – 2017. № 2 (75). – С. 108-112.
4. Campbell F.C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. – Elsevier, 2019.
5. Airbus Industries. A350 XWB Structural Materials. – 2021.
6. Boeing Commercial Airplanes. Composite Materials Overview. – 2020.

УДК 621.897.87

Вольченко О.І., докт. техн. наук, професор

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, divo99@ukr.net

Журавльов Д.Ю., докт. техн. наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, dmytro.2103@ukr.net

Журавльов О.Ю., канд. техн. наук, доцент

Сумський державний університет, san.75@i.ua

ПЕРЕРОЗПОДІЛ ПИТОМИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ПАРАХ ТЕРТЯ БАРАБАННО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ

При обертанні гальмового барабана проти годинникової стрілки закон розподілу питомих навантажень стає більш рівномірним у зв'язку з тим, що кінець колодки, до якого прикладено зусилля F , стає збігаючим. За умови $p_{1\max} < p_{\max}$, оскільки величина $p_{1\max}$ обумовлена тільки значенням зусилля притискання, а $p_{\max}$ складається з тиску, що виникає внаслідок дії сили F , і тиску, виникнення якого пов'язане із захопленням набігаючої поверхні фрикційної накладки гальмового барабана [1].

Якщо колодка розташована в гальмовому механізмі таким чином, що заминаючі зусилля прикладаються до обох її кінців (рис. 1 в, г), то розподіл питомих навантажень стає ще більш рівномірним, і величина різниці $p_{2\max} - p_{1\max}$ при $F_1 = F_2$ обумовлена тільки присутністю процесу захоплення накладок поверхні накладок робочою поверхнею гальмівного барабана [2]. З цього твердження слід, що змінюючи значення зусиль F_1 і F_2 можна досягти гальмівної колодки при обертанні гальмівного барабана в різні напрямки рівномірної навантаженості пар тертя гальма за умови, що радіуси кривизни поверхонь тертя накладок та барабана однакові. Але під час роботи гальма енергія гальмування перетворюється на теплову, яка акумулюється в основному в тілі гальмівного барабана. Останній виготовлений із металу, має високий коефіцієнт теплопровідності та поглинає більшу кількість теплоти, ніж фрикційні накладки, матеріал яких є фактично ізолятором. Таким чином, температура барабана стає вищою за температуру фрикційних накладок. Нагрівання тіл викликає їхнє теплове розширення, причому коефіцієнт теплового розширення металу α_m є на порядок вище ніж α_f фрикційного матеріалу.

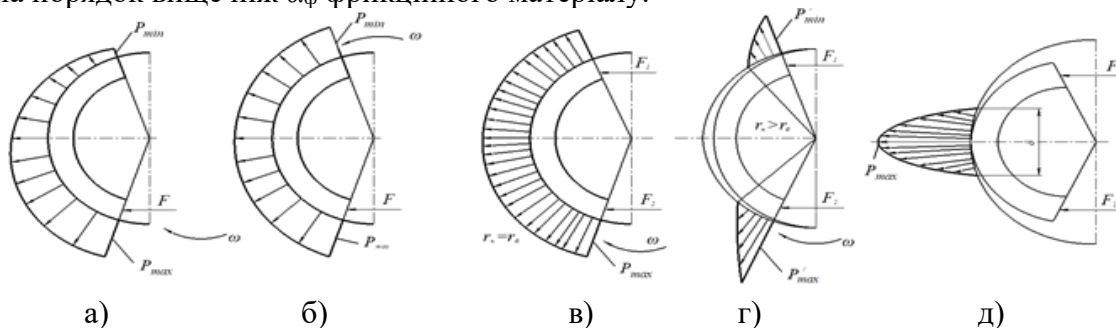


Рис. 1 – Епюри питомих навантажень у парах тертя барабанно-колодкового гальма транспортного засобу за умови ($r_n = r_b - a$, б, в; $r_n > r_b - z$; $r_n < r_b - d$) відтискання зусиллям F одного (а, б) і двох (в, г, д) кінців

Внаслідок теплового розширення радіус кривини поверхні тертя гальмового барабана зменшується, а фрикційної накладки збільшується, тобто $r_n > r_b$.

$$r_{\delta} = r - \Delta h_{\delta} = r - h_{\delta} \cdot \alpha_{i\delta} \cdot \Delta t; \quad (1)$$

$$r_n = r + \Delta h_n = r + h_n \cdot \alpha_{in} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де r – початковий (технологічний) радіус поверхонь тертя гальмового барабана та фрикційної накладки;

$\alpha_n, \alpha_{\delta}$ – коефіцієнти теплового розширення матеріалів фрикційної накладки та барабана;
 ΔT – зміна температури під час нагрівання.

У зв'язку із зміною розмірів поверхонь тертя спряжених деталей виникає перерозподіл питомих навантажень (рис. 1 б). При $r_n > r_{\delta}$ контакт поверхонь гальмового барабана з фрикційною накладкою здійснюється по кромках останньої, розташованих уздовж її кінців. Необхідно відзначити, що в початковий момент набігаючий кінець накладки, є більш навантаженим, але з плином часу при набіганні поверхні барабана на згаданий кінець накладки остання деформується (змінюється), при цьому її кривина збільшується. Це призводить до збільшення площі контакту, а отже, до зменшення питомого навантаження. Збігаючий кінець накладки, навпаки, внаслідок взаємодії з поверхнею барабана стає пологішим, що також визначає зростання площі контакту на цій ділянці накладки та зменшення питомих навантажень на ній. Таким чином, при певних співвідношеннях F_1 і F_2 можна досягти однакових площ контакту на кінцях накладки та рівності питомих навантажень на них. Цілком зрозуміло, що при зростанні різниці $r_n - r_{\delta}$ звужується ділянка взаємодії фрикційної накладки з барабаном, зменшується площа контакту, збільшується питома навантаження на цих ділянках. З викладеного випливає висновок про те, що необхідно забезпечити рівність радіусів кривини робочих поверхонь фрикційних накладок і гальмового барабана саме в тому тепловому режимі, який є найбільш характерним для даного гальмового механізму. Насправді цього можна досягти так. На підставі експериментальних даних або результатів аналітичних розрахунків температур поверхонь тертя заданого гальма для конкретних умов експлуатації визначають його робочий тепловий режим, тобто такий режим, в якому дане гальмо працює найтриваліший час. Будують графіки зміни радіусів поверхонь тертя для барабана та накладок окремо залежно від температури. Задаються конкретними значеннями температури поверхонь тертя і на криву $r_{\delta} = f(t)$ еквідистатним переносом накладають криву $r_n = f(t)$ так, щоб згадані криві перетнулися у точці, які відповідають заданому тепловому режиму роботи гальма. Наприклад, барабанно-колодкове гальмо транспортного засобу КрАЗ-250 має діаметр робочої поверхні 440 мм, товщину обода барабан 22,5 мм, товщину накладки 20 мм. Априорі відомо, що температурою насичення обода барабана заднього гальмового механізму є температура тертя поверхонь величиною 325 °С.

На рис. 2 наведено графіки зміни радіусу кривини поверхонь тертя гальмового барабана та фрикційної накладки згаданого гальма.

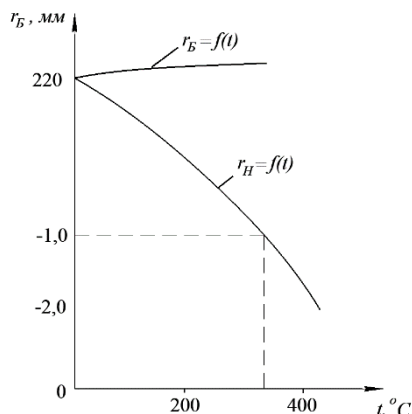


Рис. 2 – Закономірності зміни радіусів кривини поверхонь тертя обода гальмівного барабана (r_{δ}) та фрикційної накладки (r_n) від контактної температури в парі тертя гальма

Необхідно зауважити, що при встановлених розмірах на початковій стадії гальмування гальмо працюватиме в режимі, коли $r_{\delta} > r_n$. При такому співвідношенні розмірів контактуючих поверхонь епюру розподілу питомих навантажень має пік у середній частині фрикційної накладки (рис. 1, д).

Список посилань

1. Сторож Я. Б. Стабілізація завантаженості фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12 – машини нафтової і газової промисловості. Івано-Франківськ, 2006. – 248 с.
2. Проектний та перевірний розрахунок фрикційних вузлів барабанно- та дисково-колодкових гальм транспортних засобів / А. Х. Джанахмедов, О. І. Вольченко, Д. Ю. Журавльов та ін. – Баку: Апострофф, 2016. – 366 с.

УДК 621.891.001.57

Фідровська Н.М., докт. техн. наук, професор

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, nfidrovskaya@ukr.net

Вольченко Д.О., докт. техн. наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, vol21@ukr.net

Возний А.В., канд. техн. наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
andrii.voznyi@gmail.com

Вудвуд О.М., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Одеська політехніка», alex.vudvud@gmail.com

ЗНОСО-ФРИКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАР ТЕРТЯ ГАЛЬМ ТА ЇХ ПОКРАЩЕННЯ

В одному колісному механізмі барабанно-колодкового гальма транспортного засобу середньої вантажопідйомності демонтаж фрикційних накладок на двох колодках займає півтори години. Демонтаж серійних фрикційних накладок з двох гальмівних стрічок з їх нерівномірним зносом на набігаючій і збігаючій гілці займає шість годин. Тому для зменшення часу на демонтаж накладок не відпрацьованих до допустимої величини зносу необхідно застосовувати їх вузькі конструкції з особливим горизонтальним кріпленням.

Від способів кріплення та робочої площі фрикційних накладок залежать експлуатаційні параметри стрічково- і барабанно-колодкових гальмівних пристроїв [1]. Для стабілізації питомих навантажень у фрикційних вузлах стрічково-колодкового гальма [2] запропоновано дослідно-конструкторський приклад ділянки вузла тертя. В останньому було запропоновано ділянку стрічки змінної жорсткості за рахунок сталеві прокладки, яка знаходилася між стрічкою та накладкою та перекривала 4/5 її поверхні. При цьому з боку частини набігаючої стрічки була менша її жорсткість. Кріпилися елементи вузла чотирма болтами.

Зупинимось на конструктивних особливостях кріплення тонких накладок у фрикційному вузлі тертя (рис. 2).

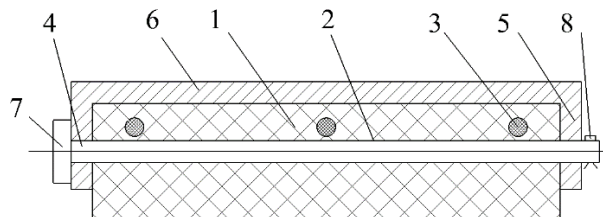


Рис. 1 – Кріплення вузьких фрикційних накладок у вузлах стрічково-колодкового гальма: 1, 2 – накладка з отвором; 3 – армуючий дріт; 4, 5, 6 – отвори у відбортівці гальмівної стрічки; 7 – штифт; 8 – шплінт

Вузька накладка 1 має конструктивні розміри: ширину, довжину ϕ товщину. У тілі фрикційного елемента вище його допустимого зносу виконано кріпильний отвір 2. Останній розташований над поперечно армуючим дротом 3, що збігається з отвором 4 у відбортовці 5 гальмівної стрічки 6, а з боку вільного краю обода шківів встановлений штифт 7, що з'єднує накладку 1 з стрічкою 6. Штифт 7 стопориться шплінтом 8.

Конструктивні розміри у плані вузьких накладок становлять 230,0х60,0мм при товщині 20,0 мм. Така конструкція кріплення фрикційних накладок дозволяє поліпшити зносо-фрикційні властивості пар тертя гальм.

За рахунок чого досягається поліпшення зносо-фрикційних властивостей у парах тертя з вузькими накладками у стрічково-колодкових гальмах:

- квазірівнювання питомих навантажень шляхом зменшення площ набігаючої та збігаючої поверхонь, що дозволить досягти їх мінімального зношування;
- збільшити сумарний динамічний коефіцієнт взаємного перекриття пар тертя ($K_{\text{вз}}$) при експлуатації вузьких накладок стабілізуючи поверхневі температури (θ_n), та градієнти ($d\theta_n/dl$), і навіть динамічний коефіцієнт тертя (f) (рис. 2).

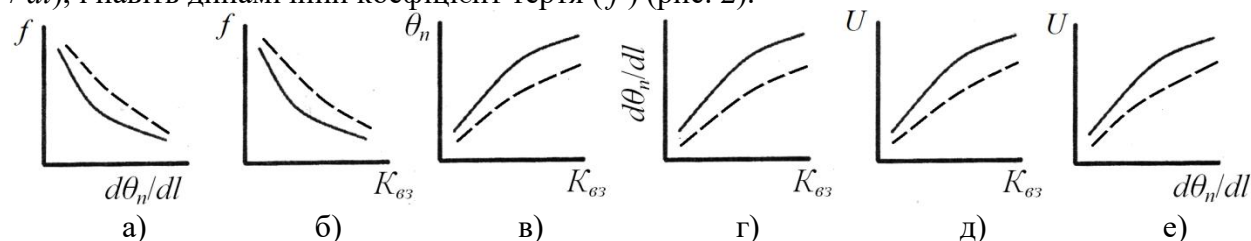


Рис. 2 – Закономірності зміни експлуатаційних параметрів серійних (суцільна лінія) та вузьких (штрихова лінія) фрикційних накладок у парах тертя стрічково-колодкового гальма

З залежностей видно, що закономірності мають квазілінійний характер.

Спочатку розглянемо експлуатаційні параметри широких фрикційних накладок (криві 1, 2 і 5, 6, рис. 2 а, б, які описуються залежностями (1)-(4)).

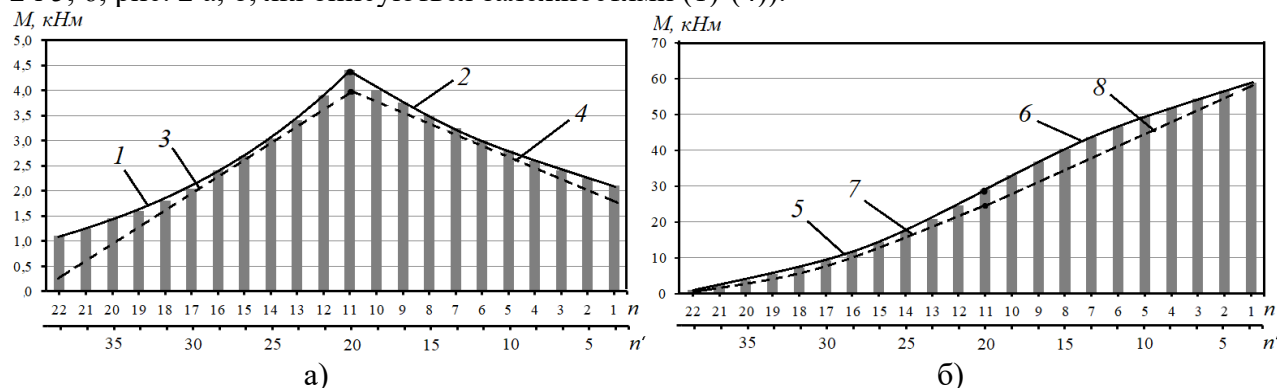


Рис. 2 – Закономірності зміни гальмівних моментів, що розвиваються кожною серійною (n) і прогнозованою (n') накладками (а) і сумарних їх значень (б) від кута охоплення накладками гальмівного шківів при спуску колони бурових труб на глибину 5350,0м при вимушеному повітряному охолодженні лебідки У2-5-5 (позначення закономірностей для широких накладок – широка лінія, а для вузьких – штрихова лінія)

$$M = 0,16 \cdot e^{0,17(22-n)} \quad (1)$$

$$M = 1,96 \cdot e^{0,074n} \quad (2)$$

$$M = 0,00056 \cdot e^{0,28n} \quad (3)$$

$$M = 60 - 31,5 \cdot e^{-0,19n} \quad (4)$$

З рис. 2 а випливає, що максимальна різниця гальмівних моментів на широких фрикційних накладках (між 11-ю і 1-ю) набігаючої гілки гальмівної стрічки становить 2,25 кНм, а на фрикційних накладках (між 12-ю і 22-ю) збігаючої гілки - 2,92 кНм. При цьому максимальний гальмівний момент реалізується на 11-й фрикційній накладці і дорівнює 4,42 кНм, а мінімальний - на 22-й накладці - 1,08 кНм. Слід зауважити, що 1-а, 17-а і 22-а фрикційні накладки гальма працювали при природному охолодженні, тоді як всі інші накладки - в режимі комбінованого охолодження. Що стосується сумарних значень гальмівних моментів, що розвиваються фрикційними накладками (рис. 2 б) набігаючої і збігаючої гілок стрічки, то їх значення, відповідно, рівні 34,58 і 24,86 кНм, тобто фрикційні накладки набігаючої гілки стрічки реалізують в 1,39 рази більший гальмівний момент, ніж її збігаючої гілки. Різниця між їх значеннями становила 9,72 до Нм.

Прогнозовані значення гальмівних моментів (криві 3, 4 і 7, 8, рис. 2 а, б). описуються залежностями (5)-(8):

$$M = 1,22 \cdot n^{1,92} \quad (5)$$

$$M = 102,5 \cdot n^{-0,58} \quad (6)$$

$$M = 2,05 \cdot 10^{-4} \cdot n^{3,05} \quad (7)$$

$$M = 56,8 - 29,5 \cdot e^{-0,11n} \quad (8)$$

Таким чином, за рахунок вузьких накладок у парах тертя гальма лінеаризований гальмівний момент, а отже, і зменшився нерівномірний знос їх робочих поверхонь.

Список посилань

1. Гальмівні пристрої: Довідник / М.П. Александров, В.М. Федосєєв, М.В. Новожилов; За заг. ред. М. П. Александрова. М.: Машинобудування, 1985. - 312с.
2. Сторож Я. Б. Стабілізація завантаженості фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12 – машини нафтової і газової промисловості. Івано-Франківськ, 2006. – 248 с.

УДК 621.9.04:004.94

Орел В.М., канд. техн. наук, докторант
Мельничук П.П., докт. техн. наук, професор

Державний університет «Житомирська політехніка», vadymorelkr@gmail.com

Саленко О.Ф., докт. техн. наук, професор

Костенко А.О., аспірант

Гаврушкевич Н.В., ст. викладач

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, gavrushkevichnataliya@gmail.com

ЗМІНА МІКРОСТРУКТУРИ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ АДИТОВАНИХ ВИРОБІВ ПРИ ФІНІШНІЙ МЕХАНІЧНІЙ ПОСТОБРОБЦІ

Адитивні технології на сучасному етапі розвитку машинобудування та авіаційної техніки набули широкого практичного застосування завдяки можливості виготовлення складнопрофільних виробів, оптимізації матеріаловитрат та забезпечення високого рівня функціональної інтеграції конструкцій. Зокрема, технології типу FDM, SLS, SLA та інші активно впроваджуються у серійне та дослідне виробництво деталей із полімерних та композиційних матеріалів, що підтверджується значною кількістю наукових досліджень та інженерних рішень.

Разом із тим, незважаючи на технологічні переваги адитивного формування, питання забезпечення якості поверхневого шару виробів залишається невирішеним у більшості практичних випадків. Встановлено, що сформована поверхня характеризується відхиленнями від заданої геометрії, зумовленими особливостями процесу шарового нанесення матеріалу, кінематикою викладання та термомеханічними ефектами. У результаті формується дефектний поверхневий шар, якому притаманна змінна шорсткість уздовж контрольної лінії, наявність порожнин, міжшарових дефектів, мікротріщин і зон концентрації напружень. Такі структурні недосконалості суттєво знижують експлуатаційні характеристики виробів, зокрема їх міцність, зносостійкість та довговічність.

Появі таких недосконалостей сприяє дискретність процесу нарощування матеріалу, що призводить до виникнення так званого «staircase effect».

Подолання зазначених недоліків у більшості випадків здійснюється шляхом застосування фінішної механічної обробки – точіння, фрезерування, шліфування або комбінованих методів. При цьому ключовим технологічним завданням є зняття такого шару матеріалу, який дозволяє усунути геометричні похибки адитивного формування, видалити дефектний приповерхневий шар, а також забезпечити стабільні показники шорсткості поверхні. Вибір параметрів обробки повинен враховувати специфіку адитивних матеріалів, зокрема їх структурну неоднорідність, знижену жорсткість, наявність армуючих елементів та схильність до крихкого руйнування.

Досліджено процес формування мікроструктури поверхневого шару адитивно виготовлених виробів при фінішній механічній обробці. При цьому виходили із наступних міркувань. Адитивний виріб має дефектний шар, що може містити: залишкові напруження $\sigma_{\text{зал}}$, концентратори напружень $\sigma_{\text{конц}}$, а також мікротріщини певної геометрії.

Під час експлуатації відбувається розвиток дефектів на початкових ініціаторах, їх об'єднання та формування мережі макродефектів. Оскільки велика кількість концентраторів напружень зосереджена саме на поверхнях заготовок, механічне оброблення дозволяє виправити не тільки дефекти просторового розташування поверхонь та підвищити точність виконуваних розмірів, а і змінити (модифікувати) поверхневий шар так, щоб концентрація дефектів на поверхні і у приповерхневому шарі була мінімальною. З іншого боку, дія різального клина може провокувати появу значних напружень у зоні різання, які також можуть ініціювати появу вторинних дефектів.

Сумарний напружений стан можна представити як $\sigma_{\text{еф}} = \sigma_{\text{зал}} + \sigma_{\text{конц}}$ тоді завдання фінішної обробки полягає у мінімізації товщини шару, в якому $\sigma_{\text{еф}} > \sigma_{\text{доп}}$. При цьому гранична глибина різання визначається як $t_{\text{кр}} = \frac{2k}{K_s}$.

Моделювання поведінки матеріалу під дією різального клина (за умови уяви матеріалу у вигляді порожнистої ниткової структури).

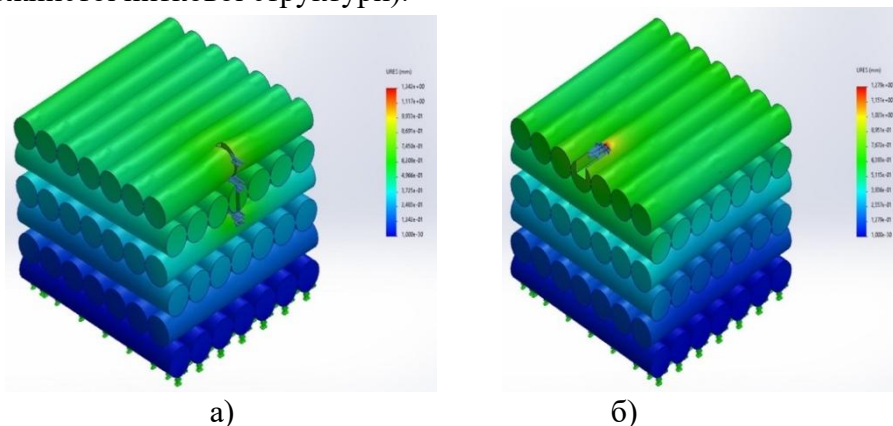


Рис. 1 – Постобробка умовним різальним клином: а) сила різання направлена впоперек волокон викладання; б) – різання уздовж волокна

Процес різання аддитивних виробів має виражений циклічно-динамічний характер. На відміну від металів, де переважає пластичне зсувне деформування, різання аддитивних виробів реалізується переважно через локальне квазікрихке руйнування матеріалу в зоні контакту з різальним клином. Механізм циклу руйнування подібний до різання компактних пластмас і включає такі стадії: пружна деформація матеріалу в зоні контакту, зародження та розвиток субмікротріщин і мікротріщин, досягнення критичного рівня напружень, розвиток пошкоджень у вигляді високоеластичних деформацій, формування магістральної тріщини або системи розгалужених тріщин, швидке закритичне зростання тріщини, відділення шару матеріалу та зменшення сили різання.

Тривалість, амплітуда та частота циклів залежать від швидкості різання, товщини зрізу, фізико-механічних характеристик матеріалу та кута між напрямком різання і напрямком армування.

Аддитивні вироби характеризуються домінуванням пружних властивостей і малою зоною пластичності в вершині тріщини. З позицій лінійної механіки руйнування їх можна розглядати як квазікрихкі матеріали.

Оскільки відомо, що зі зростанням швидкості навантаження зменшується критичний коефіцієнт інтенсивності напружень старту тріщини K_{Ic} , що свідчить про охрупчування матеріалу, то умовою поширення тріщини є виконання енергетичного або силового критерію:

$$G \geq G_c \text{ або } K \geq K_c,$$

де G – швидкість вивільнення енергії пружної деформації,

K – коефіцієнт інтенсивності напружень,

G_c, K_c – їх критичні значення.

Тож очевидно, що характер руйнування істотно залежить від швидкості різання. Це головний чинник, що визначає особливості формування поверхневого шару. За недостатньої кінетичної енергії відбувається поступовий ріст і злиття мікротріщин з утворенням магістральної тріщини. Формується відносно крупна фрагментована стружка, спостерігається підвищена сила різання та нестабільність процесу. Ступінь деструкції аддитивних виробів визначається кутом між напрямком армування та вектором швидкості головного руху різання. Найбільш сприятливим є випадок, коли напрям викладання волокон збігається з напрямком різання ($\varphi \approx 0^\circ$). У цьому режимі зменшується сила різання, скорочується тривалість циклів руйнування та мінімізується пошкодження поверхневого шару.

При механічному різанні поверхневий шар зазнає змін, і для узагальненого випадку типовими будуть діаграми, наведені на рис. 2.

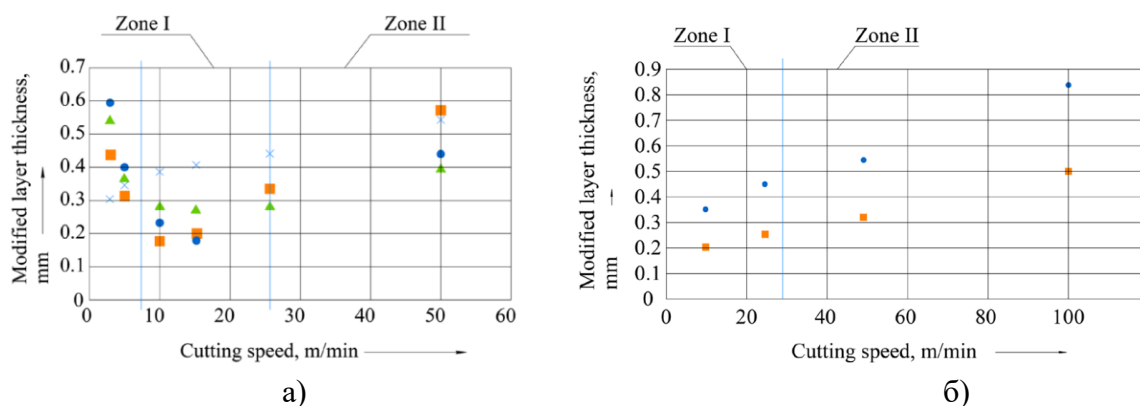


Рис. 2 – Зміна товщини модифікованого шару під час механічної обробки: а – під час різання (токаріння, фрезерування, свердління), б – під час шліфування; ■ – розрахунковий рівень; ● – експериментальні значення; ▲ – експериментальні, отримані при свердлінні; × – експериментальні, отримані для точіння

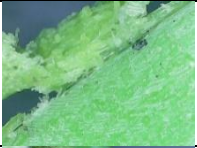
Шорсткість поверхні виробів з формується внаслідок взаємодії геометричних параметрів інструмента, кінематики процесу різання та фізико-механічних властивостей матеріалу. Для лезової обробки (точіння, фрезерування, свердління) профіль мікронерівностей має регулярний періодичний характер, зумовлений дискретністю подачі інструмента та формою його різальної кромки. Згідно з композиційною моделлю, реальний профіль поверхні визначено двома складовими:

$$z(x) = z_c(x) + z_r(x),$$

де $z_c(x)$ – систематична (кінематична) складова; $z_r(x)$ – випадкова складова

Експериментальні дослідження виконані для процесів точіння та фрезерування композитного матеріалу. Варіювались режими різання (глибина різання t , подача S , швидкість різання V або частота обертання ω), а також напрям обробки відносно шару викладання волокон при екструзії, див. табл. 1.

Таблиця 1– Режими фрезерування та отримана шорсткість поверхні

Milling							
Processing modes			Machining direction	Surface quality		Microphotography	
Cutting depth t , mm	Feed rate S , mm/s	Number of revolutions ω , rpm		Ra	Rz	Surface	of chips
0,5	100	200	Per layer	1,2	6		
0,5	100	200	Perpendicular	1,8	9		
1	100	350	Per layer	0,48	2,4		
1	100	350	Perpendicular	0,72	3,6		
0,5	150	350	Per layer	0,90	4,5		
0,5	150	350	Perpendicular	1,35	6,8		
0,5	100	350	Per layer	0,40	2,0		
0,5	100	350	Perpendicular	0,6	3		

Під час проведення регресійного аналізу використано степеневу модель: $Rz = kV^{-n}$, що для наведених даних дозволило запропонувати таке рівняння:

$$Rz \approx 1,8 \cdot 10^5 \cdot V^{-1,15}.$$

Аналіз експериментальних даних свідчить про суттєвий вплив швидкості різання на параметри шорсткості поверхні. Зокрема, при зниженні швидкості різання від 1500 до 570 мм/с спостерігається різке зростання параметра шорсткості Ra (з 6 до 38 мкм), що вказує на нестабільність процесу та підвищену інтенсивність руйнування поверхневого шару. Це пояснюється зменшенням кінетичної енергії процесу, що призводить до переходу від стабільного дисперсного руйнування до нерегулярного зростання та злиття мікротріщин. У свою чергу, підвищення швидкості різання сприяє стабілізації процесу, зменшенню критичного коефіцієнта інтенсивності напружень та формуванню більш рівномірної поверхні.

Список посилань

1. Орел, В. М., Козловська, Т. Ф., Саленко, О. Ф., & Мельничук, П. П. (2025). Постооброблення виробів інженерного призначення, отриманих методами адитивного пошарового моделінгу. *Технічна інженерія*, (1(95)), 76–93. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-76-93](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93).
2. Damage Mechanisms of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method / O.Salenko, D.Dzhulii, V.Drahobetskyi and other // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023 : Lecture Notes in Mechanical Engineering* ; in V.Ivanov, I.Pavlenko, O.Liaposhchenko and other (eds). – Cham : Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-32774-2_27.

УДК 621.941-229.3.

Луців І.В., докт. техн. наук, професор

Державний університет «Житомирська політехніка», liv.tern@ukr.net

Волошин В.Н., канд. техн. наук, доцент

Буховець В.М., канд. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя, voloshyn@tk.te.ua

КОНЦЕПЦІЇ ЗАТИСКУ ІНСТРУМЕНТІВ МАЛИХ ДІАМЕТРІВ З ЦИЛІНДРИЧНИМ ХВОСТОВИКОМ

Інструменти малих діаметрів (зазвичай від 0,5 до 8 мм) з циліндричним хвостовиком є основою для високоточної обробки, високошвидкісної обробки (HSM) у сферах, де потрібна висока точність, складна геометрія або робота у важкодоступних місцях. Через малу жорсткість самого інструменту навіть незначне радіальне биття або недостатнє зусилля затиску призводять до його миттєвого руйнування.

Інструментальний затискний патрон (ІЗП) служить ланкою, яка зв'язує шпиндель та різальний інструмент, і від нього в значній мірі залежить збалансованість всієї системи. ІЗП для високоточної та високошвидкісної обробки повинні відповідати ряду вимог [1, 2]: мінімальне радіальне биття; висока радіальна жорсткість; невелика маса та момент інерції; хороші демпфувальні властивості та висока динамічна жорсткість; гарантований надійний затиск на високих частотах обертання; висока точність балансування; симетричність зусилля затиску. Тому пошук концепцій затиску інструментів малих діаметрів з циліндричним хвостовиком в металообробці є актуальним і важливим завданням.

Метою даної роботи є забезпечення системного підходу при пошуку принципів затиску інструментів з циліндричним хвостовиком для високошвидкісної обробки, що є основою концептуального проектування ІЗП. Це також дозволить вибирати відповідні альтернативи існуючих принципів затиску та області пошуку конструктивного виконання ІЗП при їх проектуванні.

На сьогоднішній день існує ряд ІЗП з механічним та гідравлічним затиском інструментів з циліндричним хвостовиком [1-3]. Відносно новими в порівнянні з ними є патрони із

силовим запресуванням, в яких закріплення хвостовика інструменту проходить виключно за рахунок зусиль повернення матеріалу у вихідне положення [1, 2, 4], та патрони, в яких затиск інструменту проводиться методом теплової посадки з натягом [1, 2, 5]. Наукові дослідження і досвід експлуатації показує, що для всіх випадків обробки ідеального ІЗП не існує. Окрім того, існує необхідність створення нових конструкцій ІЗП для певних умов високоточної та високошвидкісної обробки, що вимагає вирішення задач, пов'язаних з пошуком нових принципів затиску.

Задача пошуку принципів затиску відноситься до задачі вибору і пошуку ефективного принципу дії [6]. Така задача не має точних математичних рішень, а її розв'язання вимагає застосування евристичних методів. Вона зводиться до такого розподілу енергії після затиску, при якому виключається або зводиться до мінімуму надходження енергії ззовні, а надійне утримання інструменту забезпечується за рахунок внутрішньої енергії.

У більшості випадків для забезпечення взаємодії ІЗП з хвостовиком інструменту необхідно затратити енергію для деформаційного зміщення або переміщення затискної поверхні (поверхонь) ІЗП для затиску хвостовика інструменту в процесі обробки. Така енергія може бути отримана безпосередньо внаслідок дії відповідного фізичного поля, або шляхом перетворення інших видів енергії (гідравлічної, теплової, магнітної, електричної, створеної відцентровими силами та ін.).

В рамках даної роботи на основі відомих видів фізичних полів (фізичних ефектів) при їх дії на відповідні об'єкти та виходячи із вимог, які ставляться до ІЗП для високоточної та високошвидкісної обробки, та з використанням вепольного аналізу [6] розроблено концепції ІЗП для затиску інструментів малих діаметрів з циліндричним хвостовиком, ряд з яких приведений на рис. 1.

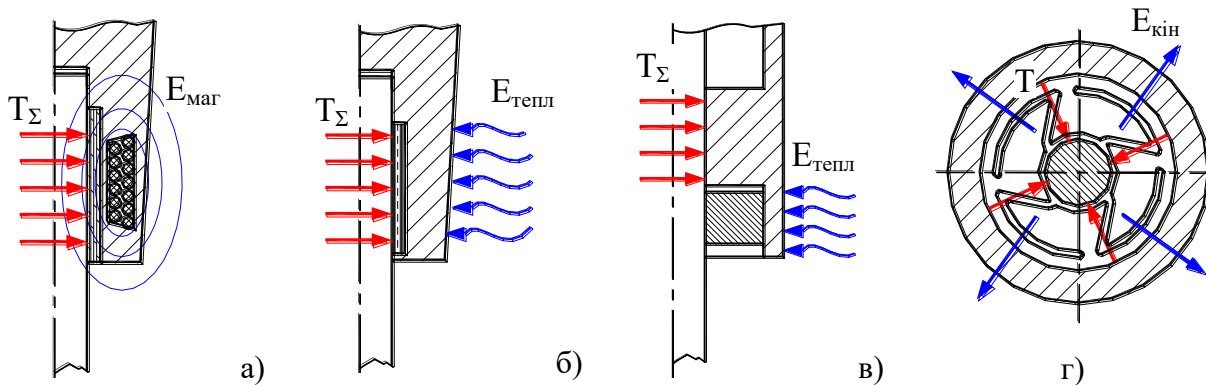


Рис. 1. – Варіанти запропонованих концепцій ІЗП для затиску інструментів малого діаметру з циліндричним хвостовиком із використанням: а) магнітореологічних матеріалів та енергії магнітного поля; б) легкоплавких матеріалів та енергії теплового поля; в) матеріалів з пам'яттю форми та енергії теплового поля; г) кінетичної енергії затискних елементів

При пошуку концепцій затиску ІЗП враховані ряд обмежень: охоплення цільного хвостовика інструменту поверхнею (поверхнями) затиску можна забезпечити тільки зовні; прикладання зусилля затиску має бути перпендикулярним до осі хвостовика інструменту; силовий контур має бути закритим для зменшення впливу відцентрових сил, що виникають в процесі обертання шпинделя.

На основі концепції перетворення кінетичної енергії затискних елементів у затискне зусилля розроблено конструкцію ІЗП для затиску інструментів малого діаметру з циліндричним хвостовиком. За допомогою САЕ-системи проведено моделювання зусиль затиску та напружено-деформованого стану в залежності від частоти обертання шпинделя, а також встановлені місця виникнення найбільших напружень.

Список посилань

1. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием: монография [Текст]/ Ю.Н. Кузнецов, В.Н. Волошин, П.М. Неделчева, Ф.В. Эль-Дахаби. – Габрово: «Васил Априлов», 2010. – 724 с.
2. Stephenson D. Metal cutting theory and practice. Third Edition/ D.Stephenson, J.Agapiou – New York: CRC Press, 2016. – 932 p.
3. Кузнецов Ю.М. Високоточні надшвидкісні патрони для хвостового різального інструменту/ Ю.М. Кузнецов, О.А. Гуменюк / Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування» – 2005. – №45. – С. 80 – 83.
4. Klingauf P. Schrumpfen – eine Frage der Technik. Haltekräfte entscheiden über den erfolgreichen Einsatz / P. Klingauf, W. Klingauf // Werkstattstechnik. – 2003. – Н.3 (93). – S. 224-225.
5. TRIBOS-Mini polygonal toolholders [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://schunk.com/de/en/tools/toolholder-quickfinder/tribos-mini/c/PGR_4951
6. Кузнецов Ю.М. Теорія розв'язання творчих задач/ Ю.М. Кузнецов. – К.: ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗИС», 2003. – 294 с.

УДК. 621.91.01

Приходько В.П. канд. техн. наук, доцент

Ковбаса В.І., магістр

КПІ імені Ігоря Сікорського, м. Київ, privas@bigmir.net

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНИХ МЕТОДІВ У ПРОЦЕСАХ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

В сучасних технологічних процесах (ТП) виробництва деталей все ширше використовуються адитивні методи. Найчастіше вони застосовуються в складі традиційних ТП - для отримання заготовок, рідше – для отримання готових деталей. Очевидною перевагою використання адитивних методів є підвищення гнучкості відповідних ТП та ряду інших показників, у тому числі, зменшення витрат матеріалів і створення нових конструкцій, неможливих для традиційного виробництва. Інтеграція адитивних технологій в традиційні технологічні процеси поєднує 3D-друк та послідовне механічне оброблення матеріалів з метою забезпечення заданої якості виробів, зокрема точності розмірів та високої ефективності виробництва. При проектуванні таких ТП виготовлення деталей, які оптимально вирішуватимуть поставлені завдання, необхідно знання технологічних можливостей та економічних показників (продуктивності та собівартості) використання адитивних технологій. У даний час накопичено недостатньо даних, що необхідні для обґрунтованого прийняття рішень, щодо структури ТП при використанні адитивних методів, у зв'язку з чим є необхідність у виконанні відповідних досліджень та отриманні результатів, потрібних при проектуванні ТП.

Для оцінки можливості підвищення ефективності виготовлення деталей на основі використання адитивних технологій в умовах малосерійного виробництва були розроблені та досліджувались три варіанти ТП виготовлення деталі: 1) ТП1- на основі традиційної технології з обробленням на верстатах з ЧПК; 2) ТП2-з використанням заготовок, отриманих адитивним методом ЕВМ (електронно-променево плавлення); 3) ТП3-з використанням заготовок, отриманих адитивним методом DED (спрямоване енергетичне наплавлення, плазмове).

Для визначення необхідності та обсягів післяоброблення була виконана статистична оцінка точності розмірів заготовок, отриманих в умовах реального виробництва. Результати статистичного аналізу точності розмірів заготовок, отриманих в реальному виробництві з використанням адитивних технологій, засвідчили, що адитивні методи дозволяють отримати точність розмірів (180-210мм.), що відповідає IT10, а для менших розмірів – навіть IT9-10.

Така точність розмірів заготовок дозволяє не виконувати переходи чорнового і чистового оброблення, а при обробленні точних поверхонь, обмежитись викінчувальним обробленням (тонке точіння, розточування та шліфування), тобто суттєво скоротити маршрути оброблення елементарних поверхонь за рахунок цього, в даному випадку отримати суттєве (у 4-5 раз) скорочення трудомісткості механічного оброблення.

Найбільш раціональним варіантом технологічного процесу для розглянутих умов є варіант з використанням заготовок, отриманих адитивним методом ЕВМ. Такий варіант, за рахунок скорочення кількості переходів і операцій, забезпечує менший обсяг механічного оброблення, кращу точність вихідної геометрії, стабільність процесу. Метод DED, у порівнянні з методом ЕВМ, забезпечує меншу точність (в середньому на один квалітет), але демонструє якість, прийнятну для скорочення подальшого механічного оброблення.

УДК 621.9.06-52

**Горогоцький Ю.О., аспірант
Кологойда А.В., канд. техн. наук**

Національний університет «Чернігівська політехніка», Yuriy1980@stu.cn.ua

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОДАЧІ ЗАГОТОВОК НА ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Одним із ключових шляхів збільшення продуктивності механообробного виробництва в сучасних умовах є автоматизація. За наявності стабільного попиту на продукцію, підприємства мають можливість оновлювати парк обладнання шляхом залучення кредитів, лізингу чи грантових програм. Проте ситуація з кваліфікованим персоналом для роботи на верстатах є значно складнішою: підготовка нових спеціалістів (операторів та налагоджувальників) потребує значного часу та витрат. В Україні цей дефіцит критично загострений через воєнний стан, міграційні процеси та мобілізацію. Відтак, роботизація та автоматизація виробничих процесів стає не просто елементом розвитку, а єдиним життєздатним шляхом вирішення проблеми кадрового голоду та забезпечення безперебійної роботи підприємств.

Для автоматизації роботи токарних верстатів з ЧПК найчастіше використовуються периферійні пристрої автоматичного завантаження заготовок, зокрема барфідери (для пруткового матеріалу) та роботи-маніпулятори для штучних заготовок (рис. 1). Проте широке впровадження таких рішень обмежується двома факторами: значною вартістю самого обладнання та необхідністю проведення складних інжинірингових робіт з інтеграції, програмування та переналагодження під кожен нову деталь. Орієнтовний рівень капітальних інвестицій у ці пристрої наведено в таблиці 1.



а)



б)

Рис. 1 –Робот для завантаження заготовок а) та барфідер б)

Таблиця 1 – Системи подачі заготовок токарних верстатів з орієнтовною вартістю

Назва	Принцип роботи	Вартість
Барфідер	Подача заготовки через отвір у шпинделі верстата	Від 10 000\$
Робот-маніпулятор	Захват заготовки з зони зберігання за допомогою маніпулятора і встановлення її в затискний пристрій верстату	Від 25 000\$
Спеціалізований пристрій	Подача заготовки з бункера, лотка чи касети з допомогою простих механізмів подачі (пневмоциліндри чи актуатори). Також можуть використовуватись робочі рухи верстата	Як правило до 5000\$

Оскільки вартість встановлення таких готових рішень дуже висока і в багатьох випадках може бути економічно не окупною, є доцільність розглянути варіант виготовлення спеціалізованого пристрою для завантаження заготовок. Основною перевагою є те, що такі пристрої зазвичай виготовляються під конкретну деталь або групу деталей, та мають значно меншу вартість (табл. 1) ніж існуючі на ринку готові універсальні рішення. Проте недоліком таких пристроїв є їх низька універсальність, тобто пристрій проектується під конкретні заготовки та конкретну модель верстату.

Один з варіантів такого пристрою було розроблено для подачі штучних заготовок діаметром Ф22-26мм та довжиною 85-95мм на токарний верстат з ЧПК моделі Goodway TS150 (рис. 2). Пристрій складається з лотка-накопичувача для заготовок, відсікача та захвата для заготовок. Заготовка подається з захвата в трикулачковий патрон за допомогою пневмоциліндра, що керується системою ЧПК верстата. Після обробки готова деталь викидається з патрона з допомогою пружинного штовхача у вловлювач деталей що входить в комплектацію верстата. Даний пристрій не має своєї системи керування та приводиться в дію лише рухами верстата та його системою ЧПК.

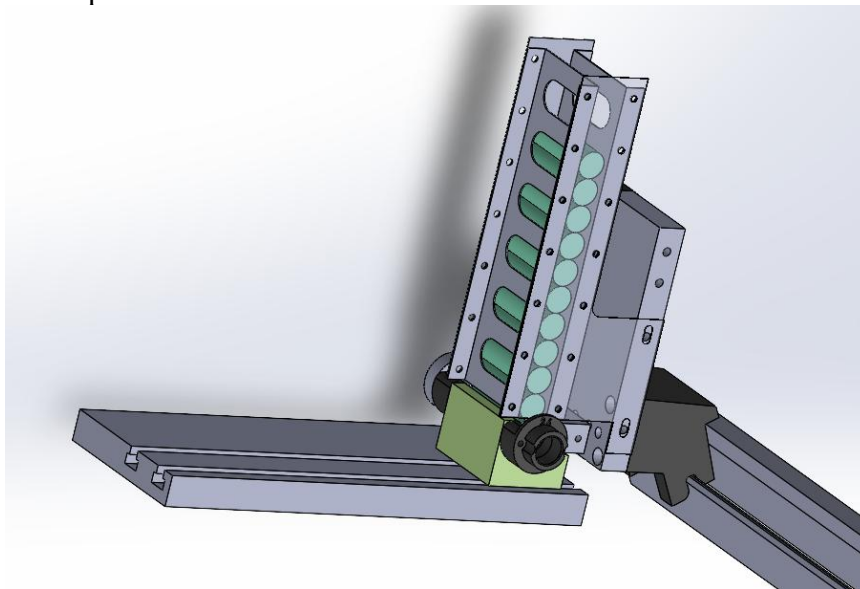


Рис. 2 – Спеціалізований пристрій для подачі заготовок

Список посилань

1. Ринок праці в умовах війни: демографічні виклики для України. (25.05.2024) Укрінформ. <https://www.ukrinform.ua/rubric-polytics/3909003-rinok-praci-v-umovah-vijni-demografichni-vikliki-dla-ukraini.html>
2. Кадровий голод. Що відбувається на ринку праці в Україні під час війни. (10.07.2024) Фонд демократичної ініціативи імені Ілька Кучеріва. <https://dif.org.ua/article/kadroviy-golod-shcho-vidbuvaetsya-na-rinku-pratsi-ukraini-pid-chas-vijni>

УДК 621.892.2(045)

Мельник В.Б., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, melnikvb408@gmail.com

Леусенко Д.В., доктор філософії

Національний транспортний університет, м. Київ leusenko.d@gmail.com

Гриб Д.Р., аспірант

Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, drhryb@gmail.com

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА УТВОРЕННЯ МІНЕРАЛЬНИМИ ОЛИВАМИ ЗНОСОСТІЙКИХ ТРИБОСТРУКТУР В ЛОКАЛЬНОМУ КОНТАКТІ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

У процесі очищення мінеральних олив електростатичними очисниками вони перебувають під впливом зовнішнього електричного поля високої напруги (3-9 кВ), що може змінювати їхні мастильні властивості. Згідно з теорією Пула-Френкеля, взаємодія електричного поля з компонентами складних вуглеводнів здатна спричинити дисоціацію молекул та утворення реакційно активних радикалів [1].

Порівняння енергій розриву хімічних зв'язків з енергією електричного поля свідчить про можливість утворення ненасичених вуглеводнів і функціональних груп типу СО, СООН та СН. Найбільш інтенсивно такі процеси відбуваються поблизу електродів, де напруженість поля максимальна.

Для дослідження впливу електричного поля на склад олив використовували робочу рідину АМГ-10 у стані постачання та після обробки полем напруженістю $1,5 \times 10^3$ кВ/мм. Аналіз проводили за допомогою інфрачервоного спектрофотометра YR-20. Встановлено, що концентрація основних компонентів рідини практично не змінюється, однак після обробки спостерігається зростання інтенсивності піку в області валентних коливань складних ефірів ($\nu = 1370 \text{ см}^{-1}$), що свідчить про зміну структури окремих компонентів оливи [1].

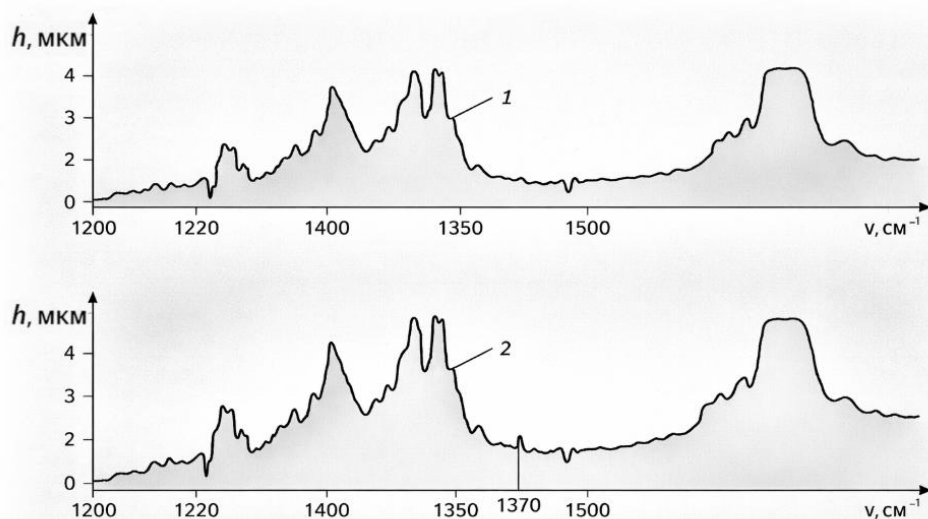


Рис. 1 – Інфрачервоні спектрограми рідини АМГ-10: 1 – у стані постачання; 2 – після обробки електричним полем.

Відомо, що під час роботи вузлів тертя мінеральні оливи можуть утворювати самогенеруючі органічні плівки (СОП), які характеризуються високими протизносними властивостями [2, 3]. Формування таких трибоструктур відбувається внаслідок взаємодії ненасичених вуглеводнів і вільних радикалів з окисненими поверхнями металів.

Експериментальні дослідження проводили на машині тертя СМЦ-2, оснащений системою вимірювання товщини мастильного шару, у режимі кочення з проковзуванням. Для дослідів використовували оливу І-20 у стані постачання, після очищення механічним фільтром ФГ-44/2-2 та після обробки електроочисником з напругою на електродах 5 кВ. Умови випробувань відповідали роботі зубчастих передач: контактна напруга – 500 МПа, швидкість кочення – 1,8 м/с, проковзування – 20–80 %, температура – 363 К.

Таблиця 1 – Гранулометричний склад забруднень оливи І-20А (визначено приладом ПКЖ-904А)

Стан оливи	Гранулометричний склад забруднень, шт/см ³					Клас Чистоти ДСТУ ГОСТ 17216-2004
	5...10 мкм	10...25 мкм	25...50 мкм	50...100 мкм	Менше 100 мкм	
У стані постачання	6358	756	58	3	-	9
Після фільтрації	367	132	-	-	-	5
Після електроочищення	295	150	-	-	-	5

Наявність СОП визначали за зміною товщини мастильного шару до та після випробувань. Результати показали, що обробка мінеральних олив зовнішнім електричним полем сприяє інтенсифікації утворення захисних трибоstruktur. Встановлено також, що активні радикали адсорбуються на поверхнях механічних домішок, утворюючи ізований масляний шар, який зменшує абразивний вплив частинок на поверхні тертя [2].

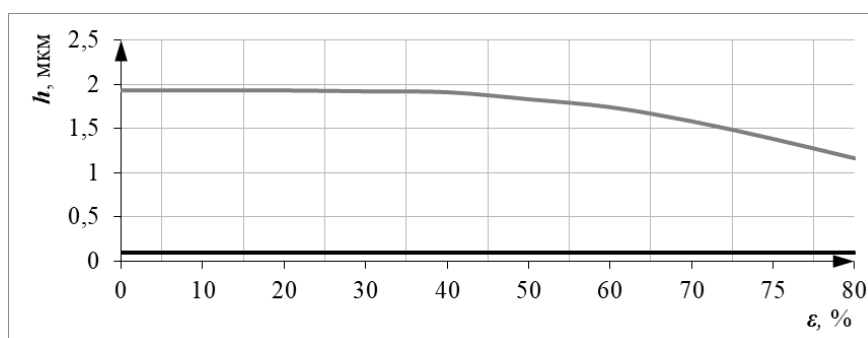


Рис. 2 – Зміна товщини мастильного шару після обробки олив електричним полем

Дослідження показали, що обробка мінеральних олив електричним полем напруженістю $1,5 \times 10^3$ кВ/мм забезпечує зниження зношувальної здатності механічних домішок у 2,5 раза та підвищує здатність мастильних матеріалів до утворення самогенеруючих органічних плівок [2, 3].

Список посилань

1. Федина В.П., Приходчук А.В., Вплив електрофізичної обробки на елементний склад рідини АМГ-10 // Проблеми експлуатації наземної техніки та застосування ПММ в цивільній авіації. – К.:КНЦА, 1992, С.25-28.
2. Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Савчук А.М., Гриб Д.Р., Кобзар Н.О. Масляна дія індивідуальних вуглеводнів та їх вплив на утворення трибоплівок при терті поверхонь з локальним контактом. // Проблеми тертя та зношування, 2025. №4 (109). С.70-81. ISSN 0370-2197. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(109\).20752](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(109).20752).
3. Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Радько О.В. Аналіз хімічного складу поверхневих трибоплівок, утворених в локальному контакті зубчастих передач після припрацювання в масляному середовищі з карбонофторидними присадками. // Проблеми тертя та зношування, 2025. №1(106). С.105-111. ISSN 0370-2197. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(106\).19838](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(106).19838).

УДК 629.7.02:539.67

Мозговий О.В., канд. техн. наук, доцент

Іщенко Р.М., канд. фіз.-мат. наук, доцент

Національний транспортний університет, м. Київ, mavimfto@gmail.com

Семеренко Ю.О., канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник

Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України

РОЗСІЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ КОМПОЗИЦІЙНИМ МАТЕРІАЛОМ АЛЮМІНІЙ-СТАЛЬ ПРИ ТЕРМОЦИКЛІЧНИХ ОБРОБКАХ

Композиційні матеріали з металевою матрицею широко використовуються у багатьох галузях машинобудування завдяки вищим фізико-механічним та фізико-хімічним властивостям ніж у металах. Розробка нових принципів в конструюванні виробів, підвищення їх технологічності допомагають всебічні випробування композиційних матеріалів в реальних умовах експлуатації. Метод механічної спектроскопії має високу структурну чутливість тому дозволяє вивчати явища, властивості і характеристики твердих тіл на мікроскопічному рівні. Він допомагає при рішенні багатьох конкретних задач в матеріалознавстві.

В роботі приведені результати досліджень внутрішнього тертя та мікротвердості волокнистого композиційного матеріалу (ВКМ) АД1-сталь після термоциклічних обробок, режими яких відповідають умовам експлуатації виробів із ВКМ. Об'ємний вміст волокон у ВКМ АД1-сталь – 15%. Армуючі волокна виготовлені із сталі ЭП322. Розсіювання механічної енергії вимірювали оберненим крутильним маятником при частоті 1 Гц. Амплітуда деформації змінювалась в межах 10^{-6} – 10^{-4} , температурну залежність внутрішнього тертя вимірювали від 20 до 400 °С, мікротвердість - приладом ПМТ-3.

Різні коефіцієнти лінійного розширення матриці і волокон при охолодженні від високих температур при виготовленні композита переводять матрицю у розтягнутий стан. При цьому у матриці народжується велика кількість лінійних і точкових дефектів. Густина дислокацій і концентрація гартувальних вакансій підвищується і під дією внутрішніх напруг, які виникають при термоциклюванні. Внаслідок наявних неоднорідностей утруднюється рух дислокацій, що призводить до збільшення міцності матеріалу. Експериментальні дослідження залежності величини мікротвердості алюмінієвої матриці алюміній-сталь від віддалі між волокнами підтверджують, що густина дислокацій найбільша поблизу волокон.

Пропонується підвищити енергомісткість матриці композитів, а значить і зміцнити ВКМ, формуванням у матриці специфічної субструктури шляхом її багаторазового термоциклювання в різних режимах за наявності напружень, які обумовлені істотними розходженнями коефіцієнтів лінійного розширення матриці і волокон ВКМ.

Вимірюючи значення мікротвердості в процесі термоциклювання зразків було встановлено, що характер ходу кривих залежності мікротвердості матриці на різних віддаль від волокон не змінився. Але із збільшенням числа термоциклів середнє значення мікротвердості між двома волокнами зростає.

Термоциклювання ВКМ алюміній-сталь проводили в діапазоні від верхніх температур до кімнатної: 150, 300, 400, 500, 600 °С. Паралельно із визначенням мікротвердості проводились вимірювання температурної залежності внутрішнього тертя.

150 °С ↔ 20 °С. Ці термообробки не вносять істотних змін в температурну залежність внутрішнього тертя, спостерігається незначне зростання фону, яке викликане накопиченням надлишку вакансій на межі матриця-волокно. Їх накопичення сприяє порушенню міжфазного зв'язку в окремих місцях і в результаті викликає ріст фону внутрішнього тертя.

300 °C ↔ 20 °C. При такому термоциклованні величина фону внутрішнього тертя при кімнатній температурі залишається постійною і формування непружних ефектів не відбувається.

400 °C ↔ 20 °C. Термоцикловання в цьому інтервалі зумовлює формування на кривих температурної залежності при нагріванні непружних ефектів при 230, 270, 300 і 360 °C (рис. 1), які зв'язані із структурними змінами в алюмінієвій матриці. Так, пік при 360 °C співпадає з температурою примісної зернограничної релаксації в алюмінії. Решта непружних ефектів свідчать про формування і стабілізацію в алюмінії дислокаційної субструктури, яка формується в алюмінієвій матриці під впливом температури і внутрішніх напруг. Характерним для температурних залежностей внутрішнього тертя досліджуваних матеріалів є різке зростання його значень після температури 150 °C. Дислокації у матриці композиційного матеріалу знаходяться в полі значних внутрішніх напруг, тому утворення субструктури відбувається при нижчих температурах ніж в неармованому алюмінії.

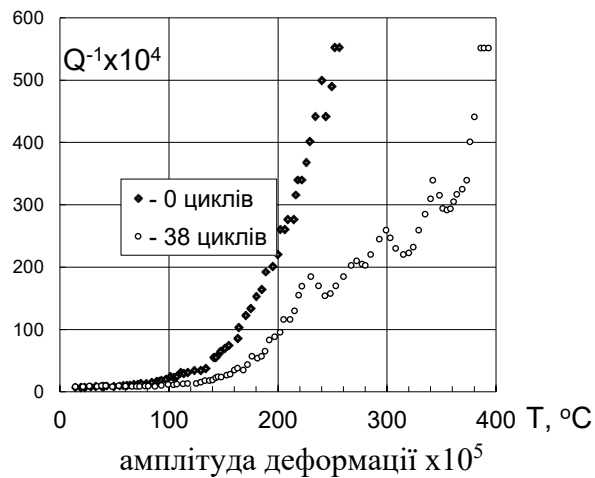


Рис. 1 – Температурна залежність внутрішнього тертя ВКМ алюмінії-сталь при термоциклованні в інтервалі температур 400 °C ↔ 20 °C

500°C ↔ 20 °C. Характер проявлення непружних ефектів при такому термоциклованні свідчить про формування більш досконалої субструктури. Уже після 6 термоциклів найбільш чітко проявляється ефект при 260 °C, що обумовлений неконсервативним рухом дислокацій в стінках. Зменшення ефекту при 290 °C і його зміщення в бік високих температур до 300 °C засвідчує, що переважна більшість дислокацій вишикувались у дислокаційні стінки, а всередині полігонів залишились окремі їх скупчення. Найкраще субструктурні ефекти проявляються після 8 – 12 термоциклів.

Разом з цим, при 500 °C уже розпочинається хімічна взаємодія на межі “волокно-матриця”. Збільшення кількості термоциклів приводить до росту крихкого інтерметалідного прошарку. Після 60 термоциклів цей прошарок починає руйнуватись з утворенням мікротріщин. Такий процес супроводжується різким ростом фону внутрішнього тертя при кімнатній температурі.

600 °C ↔ 20 °C. Розширення інтервалу термоцикловання до температур інтенсивного розвитку взаємодії між волокнами і матрицею викликає утворення інтерметалідних зон і періодичне зростання величини фону ВТ з наростаючим періодом.

Отримані результати дозволяють встановлювати необхідні механічні характеристики композитів зміною дислокаційної структури в матриці за допомогою термоциклічних обробок. Оптимальними є режими від 300 і 400 °C до 20 °C з утворенням полігональної дислокаційної структури та підвищення енергомісткості матеріалу.

УДК 621.91.01

Тихоненко А.В., аспірант
 ООО “Прогрестех-Україна”, Київ, anton.tikhonenko2@gmail.com
 Данильченко Ю.М., докт. техн. наук, професор
 Данильченко М.А., канд. техн. наук, доцент
 КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, yumd@i.ua

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ ЗАГОТОВКИ ПІД ЧАС ТОЧІННЯ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ ЇЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Дослідження взаємодії інструменту і заготовки в процесі поздовжнього точіння доводять суттєвість впливу жорсткості закріпленої в патроні заготовки на загальну жорсткість системи «шпиндель-патрон-заготовка» [1] та змінний характер цієї жорсткості при зміні положення зони різання під час обробки [2]. Експериментальні дослідження статичних і динамічних характеристик затиснутої в патроні і підтиснутої заднім центром заготовки при різних умовах навантаження (без різання) проведено в [3], але вплив зміни геометричних характеристик заготовки при обробленні на зміну її жорсткості не досліджувався.

Подані результати дослідження базуються на аналітично визначеній функції жорсткості заготовки від рухомого (по осі X) навантаження (сили різання), з урахуванням зняття шару матеріалу. Радіальні жорсткості закріплення заготовки в патроні k_{sY1} і k_{sY2} , а також радіальна жорсткість закріплення заготовки в задньому центрі k_{rY} (рис. 1,а) визначались із використанням вищезазначеної функції жорсткості за результатами натурального експерименту [3] при вимірюванні пружних зміщень заготовки в трьох точках А, В і С (рис. 1,б) та визначення відповідних жорсткостей (рис. 1,а).

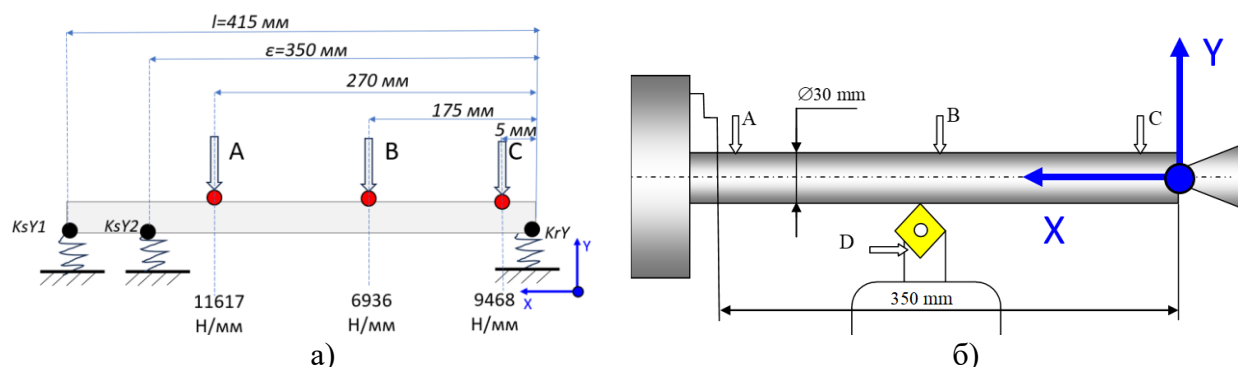


Рис. 1 – Розрахункова схема (а) і схема вимірювання (б) пружних зміщень заготовки

Результати моделювання радіальної жорсткості як функції рухомого навантаження (крива 1, рис.2) без різання цілком узгоджуються із експериментально визначеними жорсткостями [3] в контрольних точках (точки 2), що доводить адекватність вищезазначеної функції жорсткості. Також визначені теоретичні криві радіальної жорсткості з урахуванням зміни початкових розмірів заготовки при поздовжньому точінні з глибиною різання 1 мм (крива 3), 2 мм (крива 4) та 2.5 мм (крива 5). Порівняння експериментально отриманих жорсткостей в контрольних точках 2 із розрахунковими значеннями в тих самих точках (крива 5) із урахуванням поступового зменшення діаметру заготовки засвідчує значний вплив зміни геометричних характеристик заготовки на жорсткість.

Додатково, відповідно до розрахункової схеми (рис. 1,а) і схеми вимірювання (рис. 1,б) з використанням Ansys в Static Structure було отримано 3д модель пружно деформованої заготовки з імітацією зняття шару матеріалу. Порівняльні результати досліджень подані на рис. 3. Зазначені результати демонструють що відмінність результатів теоретичних досліджень за розробленою моделлю і моделлю Ansys з урахуванням різної глибини різання не перевищує 2%.

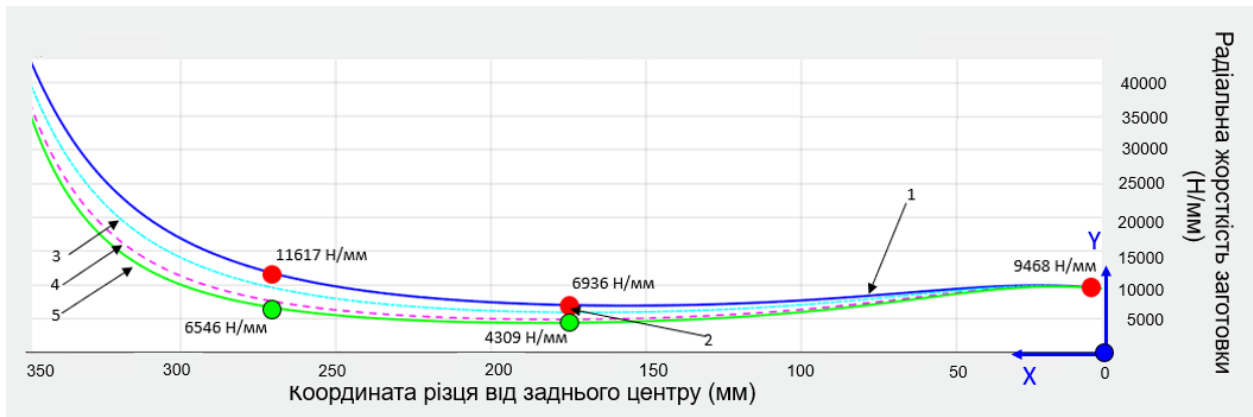


Рис. 2 – Радіальна жорсткість заготовки: теоретична (крива 1), експериментальна (контрольні точки 2), теоретична з врахуванням зняття матеріалу на глибину 1 мм (крива 3), 2 мм (крива 4) та 2,5 мм (крива 5)

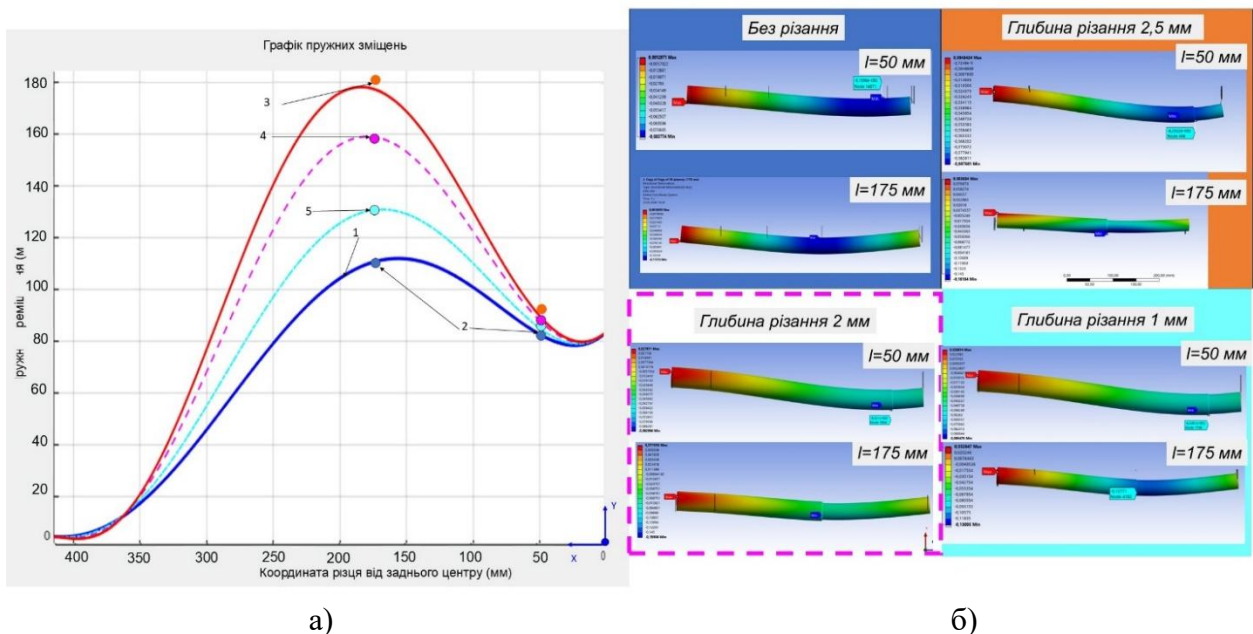


Рис. 3 – Пружні зміщення заготовки: а) теоретична пружна лінія заготовки під навантаженням без різання (крива 1, контрольні точки 2) та теоретичні пружні зміщення під навантаженням зі зняттям матеріалу: глибина різання 2,5 мм (контрольні точки кривої 3); глибина різання 2 мм (контрольні точки кривої 4), та 1 мм (контрольні точки кривої 5); б) 3D модель пружно деформованої заготовки при навантаженні в контрольних точках 2, 3, 4 та 5

Список посилань

1. Danylchenko, Y.; Storchak, M.; Danylchenko, M.; Petryshyn, A. Cutting Process Consideration in Dynamic Models of Machine Tool Spindle Units. *Machines* **2023**, *11*, 582. <https://doi.org/10.3390/machines11060582>
2. Lu, K., Lian, Z., Gu, F., & Liu, H. (2018). Model-based chatter stability prediction and detection for the turning of a flexible workpiece. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *100*, 814-826. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.08.022>
3. Данильченко М. А. Забезпечення динамічної якості технологічної обробної системи при точінні [Електронний ресурс] : дис. канд. техн. наук : спец. 05.02.08 / Марія Андріївна Данильченко; наук. керівник Петраков Ю. В. ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського", Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2021. – 133 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/52472>

УДК 624.072.2

Підгурський М.І., док. техн. наук, професор

Биків Д.З., аспірант

Підгурський І.М., кан. тех. наук, доцент

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, ipidhurskyu@gmail.com

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ТРИКУТНОЮ ПЕРФОРАЦІЄЮ ЗАЛЕЖНО ВІД ГЕОМЕТРІЇ ОТВОРІВ

Перфоровані сталеві двотаврові балки мають широке застосування у машинобудуванні та будівництві. Отвори (перфорація) в стінках часто виконують різну функцію, яка залежить від методу їх виготовлення. Для збільшення параметрів міцності та жорсткості використовують метод, що включає процес розрізання стінки за певною кривою з подальшим зварюванням двох частин, що збільшує поперечний переріз конструкції. Для зменшення ваги та для технологічних проходів використовують метод безпосереднього вирізання отворів необхідної форми та розмірів у стінці [1, 2].

У роботі виконано дослідження основної балки лонжерона причепа із двотавра ІРЕ 300 довжиною 8 м, при вільному шарнірному обпиранні двох його кінців. Для зменшення ваги конструкції і збільшення її ефективності у стінці балки виконані трикутні отвори, висотою 100, 150 та 200 мм (рис. 1 (а, б, в)). Наявність отворів збільшує концентрацію напружень, що може призводити до руйнування [1, 3]. Для зменшення цього ефекту в кутах трикутних отворів (рис. 1 (г)) висотою 150 та 200 мм виконані заокруглення із радіусом 10, 25 та 50 мм, а для висоти 100 мм – заокруглення із радіусом 10, 25 та 33 мм (рис. 1 (г, д, е)). Для зменшення крайових ефектів крайні отвори розташовують від опори на 625 мм. Ширина перегородок між отворами становить близько 50 мм (див. рис. 1). Балка навантажена рівномірно розподіленим навантаженням 10 кН/м, а для більш коректного визначення критерію ефективності врахована власна вага конструкції. За допомогою моделюючого експерименту у програмі ANSYS визначено прогин балок, еквівалентні напруження в їх полицях та навколо отворів перфорації (табл. 1).

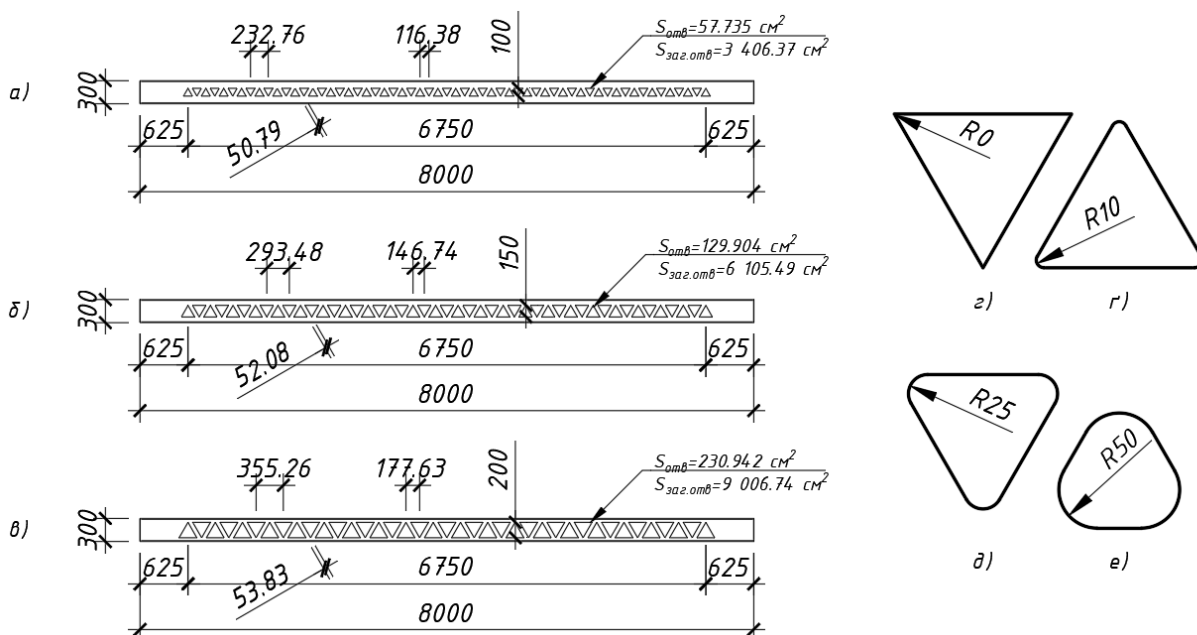


Рис. 1 – Геометричні параметри балок з трикутною перфорацією з висотою отвору 100 мм (а), 150 мм (б), 200 мм (в), без заокруглення (г) та з заокругленням отворів радіусом 10 мм (г), 25 мм (д) і 50 мм (е)

З врахуванням зазначених факторів запропоновано критерії ефективності жорсткості (1) та міцності (2, 3):

$$K_f = \frac{[f_u] \cdot m_0}{f \cdot m} \quad (1) \quad K_{\sigma,pl} = \frac{[\sigma_u] \cdot m_0}{\sigma_{pl} \cdot m} \quad (2) \quad K_{\sigma,w} = \frac{[\sigma_u] \cdot m_0}{\sigma_w \cdot m} \quad (3)$$

де $[f_u]$, $[\sigma_u]$ – граничне значення прогину, мм та напружень, МПа відповідно;

m_0, m – вага суцільної та перфорованої балки, кг;

f, σ_{pl}, σ_w – прогин, мм та напруження в полиці і стінці, МПа.

Результати розрахунку представлено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати дослідження НДС балки з трикутною перфорацією

Вид балок		Вага, кг	Прогин, мм	Макс. еквівалентні напруження, МПа		Критерій ефективності		
				полиця	стінка	жорст. K_f	міцність	
							$K_{\sigma,pl}$	$K_{\sigma,w}$
Суцільна		337,94	33,839	149,91	-	0,946	2,301	-
Перф. $a = 100$ мм	$R = 0$ мм	318,95	34,475	151,36	162,46	0,983	2,415	2,250
	$R = 10$ мм	319,63	34,393	153,11	192,61	0,984	2,382	1,894
	$R = 25$ мм	323,18	34,211	153,17	157,02	0,978	2,355	2,298
	$R = 33$ мм	326,31	34,110	151,65	124,47	0,972	2,356	2,871
Перф. $a = 150$ мм	$R = 0$ мм	303,91	35,460	154,71	209,28	1,003	2,480	1,833
	$R = 10$ мм	304,45	35,355	156,14	245,05	1,005	2,453	1,563
	$R = 25$ мм	307,27	35,121	156,68	215,90	1,002	2,422	1,757
	$R = 50$ мм	317,31	34,615	154,97	166,45	0,985	2,371	2,207
Перф. $a = 200$ мм	$R = 0$ мм	287,74	37,091	163,20	261,02	1,013	2,483	1,552
	$R = 10$ мм	288,19	36,971	164,66	285,54	1,015	2,457	1,417
	$R = 25$ мм	290,53	36,714	164,71	243,31	1,014	2,436	1,649
	$R = 50$ мм	298,91	36,121	162,73	221,12	1,002	2,397	1,764

З результатів дослідження (див. табл. 1) помітно, що зі збільшенням отворів перфорації зростають прогини балки та напруження, як в полиці так і навколо отворів. При цьому деякі критерії ефективності покращуються (чим більше значення K , тим більш ефективна конструкція за матеріаломісткістю).

Суцільна балка є найбільш жорсткою та міцною з представлених, але критерії її ефективності (за жорсткістю і міцністю) є найменшими. Найбільш ефективними конструкціями (за жорсткістю) виявились балки з найбільшим розміром отвору перфорації.

Критерій міцності (по полиці) майже не змінюється в залежності від розміру отвору, тоді як збільшення радіуса заокруглення кутів поступово зменшує цей критерій. При збільшенні розміру отвору критерій міцності (по стінці) погіршується, тоді як збільшення радіуса заокруглення спочатку погіршує цей параметр, а потім поступово покращує.

Список посилань

1. Investigation of the stress-strain state of beams with different types of web perforation / Ivan Pidgurskyi, Vasyl Slobodian, Denys Bykiv, Mykola Pidgurskyi // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2021. — Vol 103. — No 3. — P. 79–87.

2. Методи виготовлення сталевих перфорованих двотаврових балок з регулярною та нерегулярною структурою отворів / Биків Д., Кос А., Підлужний О., Підгурський І., Підгурський М. // Матеріали І МНТК „Прикладна механіка“, 6-7 червня 2024 р. — Т. : ТНТУ, 2024. — С. 76–79.

3. Drozd K., Nieoczyn A. (2021) Analysis of Longitudinal Beam Damage of a Container Chassis Semi-Trailer Using Finite Element Method – Case Study. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1190

УДК 378.147:004.925.84:621.7

Холодний В.Ю., канд. тех. наук, викладач

Коваль Є.С., викладач

Гольченко О.С., студент

Коровніченко Н.А., студент

Вище професійне училище №7 м. Кременчука Полтавської обл.

ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ ШАРІВ ПРИ FDM ДРУЦІ НА МІЦНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛІ

Підготовка конкурентоспроможного технічного фахівця потребує не лише засвоєння теоретичних дисциплін, а й формування здатності застосовувати знання в умовах реальних інженерних завдань. Одним із ефективних інструментів досягнення цієї мети є практико-орієнтовані навчальні кейси, що поєднують комп'ютерне 3D-моделювання, адитивні технології та методи прикладної механіки [4, 5].

Авторами розроблено та апробовано навчальний кейс на основі реального інженерного завдання: відновлення працездатності дверного дотягувача шляхом реверсивного проєктування та виготовлення методом FDM 3D-друку зруйнованого пластикового елемента кріплення важеля. Вибір об'єкту зумовлений його доступністю та показовістю: дверний дотягувач є механізмом, у якому реалізуються пружинне накопичення енергії, гідравлічне демпфування і механічна передача зусилля через важіль. Елемент кріплення сприймає знакозмінні навантаження при кожному циклі роботи, що робить аналіз умов його експлуатації змістовним і практично значущим.

Навчальний процес у межах кейсу охоплював такі етапи: вимірювання зруйнованої деталі та відтворення її геометрії у CAD-системі; підготовку моделі до друку з урахуванням технологічних обмежень FDM-процесу; друк першого зразка; аналіз причин його руйнування; розробку удосконаленого рішення та виготовлення другого зразка.

Для покращення міцнісних характеристик деталі було розглянуто декілька варіантів розміщення моделі під час 3D-друку. Перший варіант передбачав друк деталі у положенні, за якого шари матеріалу розташовувались перпендикулярно до напрямку прикладання основного навантаження. Саме у такому положенні була виготовлена деталь жовтого кольору. Після прикладання навантаження відбулась пошарова руйнація виробу по лініях міжшарової адгезії, що підтвердило недостатню міцність деталі при такому способі орієнтації моделі під час друку [1, 2].

Перший надрукований зразок (матеріал – PLA) зруйнувався по площині розшарування вже під час першого навантаження. У ході аналізу зламу студенти встановили, що обрана орієнтація деталі при друці призвела до збігу ліній між шарами з напрямком прикладання основного зусилля. Оскільки міжшарова адгезія у FDM-виробах суттєво поступається міцності матеріалу вздовж волокон, деталь зруйнувалась по найслабшій зоні. Цей результат став відправною точкою для змістовної дискусії щодо анізотропії механічних властивостей адитивно виготовлених деталей (рис. 1) [1, 3].

Після отримання негативного результату були використані базові знання з прикладної механіки для аналізу роботи вузла кріплення дверного дотягувача. Студенти розглянули розкладання сил у місці встановлення деталі, визначили напрямки дії основних навантажень та проаналізували характер передачі зусилля через важіль механізму. На основі проведеного аналізу конструкції дверного дотягувача було прийнято інженерне рішення змінити орієнтацію моделі при друці таким чином, щоб шари пластику були розташовані вздовж напрямку прикладання основного навантаження та краще сприймали робочі зусилля [1, 3].

На основі аналізу навантажень у вузлі кріплення було прийнято обґрунтоване інженерне рішення: змінити орієнтацію моделі при друці так, щоб шари матеріалу були паралельні до

площини дії основного зусилля. Додатково скориговано параметри заповнення критичних зон. Другий зразок успішно витримав експлуатаційне навантаження, підтвердивши ефективність прийнятого рішення.



Рис. 1 – Фотографії зразків

Педагогічна цінність кейсу визначається тим, що він забезпечує реальну міждисциплінарну інтеграцію знань із:

- комп’ютерного 3D-моделювання (реверсивне проєктування, підготовка моделі);
- адитивних технологій (FDM-процес, параметри друку, технологічні обмеження);
- технічної механіки (аналіз сил, моментів і характеру навантажень у реальному механізмі);
- матеріалознавства (анізотропія FDM-матеріалів, механізми руйнування);
- інженерного аналізу конструкцій (виявлення причин відмови, прийняття конструктивних рішень) [2, 3].

Принципово важливим є те, що студенти проходять повний інженерний цикл: проєктування – виготовлення – випробування – аналіз відмови – вдосконалення. Руйнування першого зразка не є невдачею навчального процесу – воно є його ключовим елементом, що моделює реальну виробничу ситуацію та формує готовність сприймати технічну проблему як задачу, що потребує аналізу, а не як кінцевий результат [4, 5].

Таким чином, впровадження подібних кейсів у навчальний процес технічних спеціальностей є ефективним засобом формування інженерного мислення, навичок технічного аналізу та міждисциплінарних компетентностей, необхідних для вирішення реальних виробничих задач [4, 5].

Список посилань

1. Salenko O., Zagirnyak M., Orel V., Shlyk S., Kulynych V. FDM products strength increasing using the algorithmic means of 3-D printers working // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Kremenchuk, 2022. P. 1–5.
2. Джулій Д. Ю., Орел В. М., Гаврушкевич А. Ю., Костенко А. О., Саленко О. Ф., Аврамов К. В. Формування тонких стінок у виробках інженерного призначення FDM принтингом // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : матеріали XXVI Міжнародної науково-технічної конференції «Форум інженерів-механіків 2024». Київ, 2024. С. 154–157.
3. Орел В. М., Козловська Т. Ф., Саленко О. Ф., Мельничук П. П. Постооброблення виробів інженерного призначення, отриманих методами адитивного пошарового моделінгу // Технічна інженерія. 2025. № 1 (95). С. 76–93. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-76-93](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93).
4. Гуменюк Ю. О., Шихненко О. П. Використання технологій 3D-друку в освітньому процесі технічних спеціальностей // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання. 2021. № 61. С. 85–91.
5. Кузьменко О. В., Левченко І. В. Адитивні технології як засіб формування практичних компетентностей майбутніх інженерів // Професійна освіта: методологія, теорія та технології. 2022. № 15. С. 112–120.

УДК 621.6-11

Павленко П.М., докт. техн. наук, професор
Заслужений діяч науки і техніки України
Лауреат Державної премії України з науки і техніки,
Національний університет «Київський авіаційний інститут», petro.pavlenko@npp.kai.edu.ua

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ АВІАЦІЙНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Сучасна авіаційна конструкція працює в умовах змінного навантаження, локальних концентрацій напружень і накопичення втомних пошкоджень. Її фактичний стан не завжди може бути достатньо точно описаний лише початковою розрахунковою моделлю. У процесі експлуатації змінюються жорсткість окремих зон, граничні умови, спектр навантаження та характер пошкоджуваності. Тому традиційна схема, у якій міцнісний розрахунок виконується окремо від експлуатаційного контролю, має обмежену прогностичну цінність для конкретного екземпляра конструкції.

Більш перспективним є підхід, у якому розрахункова модель, сенсорні дані та алгоритми ідентифікації стану працюють у єдиному інформаційному контурі. У такій постановці цифровий двійник не є лише тривимірною візуалізацією або архівом даних. Він розглядається як динамічно оновлювана інженерна система, що поєднує фізично обґрунтовану модель напружено-деформованого стану, потік вимірювань і процедури прогнозування залишкового ресурсу. Саме така логіка відповідає сучасним напрямкам розвитку *airframe digital twin*, *structural health monitoring* та *inverse finite element method* [1-3].

В даній доповіді представлена методологія є побудови цифрового двійника авіаційної конструкції, яка інтегрує розрахунок міцності, дані моніторингу та алгоритми оновлення параметрів моделі. Такий двійник має забезпечувати оцінювання напружено-деформованого стану, виявлення ознак деградації жорсткості, накопичення втомного пошкодження та прогноз залишкового ресурсу в експлуатації.

В якості об'єкту дослідження взятий типовий елемент авіаційної конструкції: панель обшивки, лонжерон, силовий вузол або зона з концентратором напружень. Для таких елементів критичними є не тільки максимальні розрахункові напруження, але й їх зміна в часі. Важливими також є реальна історія навантаження, поява локальних дефектів, зміна ефективної жорсткості та розвиток тріщини.

Узагальнено цифровий двійник авіаційної конструкції доцільно подати як впорядковану сукупність взаємопов'язаних компонентів:

$$DT = \langle G, M, S, D, U, P \rangle, \quad (1)$$

де G – геометричний опис конструкції;

M – фізико-механічні властивості матеріалу;

S – розрахункова модель напружено-деформованого стану;

D – потік експлуатаційних і діагностичних даних;

U – алгоритми оновлення параметрів;

P – блок прогнозу міцності, пошкоджуваності та ресурсу.

Формула (1) принципово важлива, оскільки відокремлює інженерний цифровий двійник від звичайної цифрової моделі. Вона показує, що двійник виникає лише тоді, коли модель, вимірювання та прогноз пов'язані між собою через контур оновлення.

Методологічно розробка такого двійника включає чотири рівні. Перший рівень становить фізично обґрунтована розрахункова модель. Вона визначає поля переміщень, деформацій і напружень, а також допомагає вибрати критичні зони для розміщення датчиків. Другий рівень утворюють дані моніторингу. Для авіаційних конструкцій це

можуть бути тензометричні вимірювання, волоконно-оптичні сенсори, вібраційні сигнали, акустична емісія та ультразвукова діагностика [1].

Третій рівень містить алгоритми ідентифікації, оновлення та прогнозу. Їх завдання полягає в тому, щоб за обмеженим набором вимірювань уточнювати приховані параметри стану конструкції. Це можуть бути ефективні модулі пружності, локальні коефіцієнти жорсткості, параметри пошкодженості, реальні навантаження або параметри росту тріщини. Четвертий рівень становить цифрове середовище підтримки рішень. Воно об'єднує розрахункові сценарії, архів вимірювань, критерії граничних станів і результати прогнозу.

Динаміку цифрового двійника доцільно описувати як систему стану та спостереження:

$$x_{k+1} = F(x_k, u_k, \theta_k, w_k), \quad y_k = H(x_k, \theta_k) + v_k, \quad (2)$$

де x_k – вектор стану конструкції в момент k ;

u_k – зовнішні навантаження;

θ_k – параметри моделі;

w_k і v_k – невизначеності моделі та вимірювань;

y_k – вектор спостережуваних сигналів.

У такій постановці цифровий двійник працює не як статичний розрахунок, а як адаптивна система. Вона послідовно уточнює стан конструкції за даними її фактичного відгуку.

Для оцінювання міцності базовим ядром двійника є континуальна або скінченно-елементна модель. У загальному вигляді рівняння рівноваги може бути записане так:

$$\nabla \cdot \sigma + b = \rho \ddot{u}, \quad (3)$$

де σ – тензор напружень;

b – масові сили;

ρ – густина матеріалу;

$\ddot{u}$ – вектор прискорень.

Для лінійно-пружної постановки зв'язок напружень і деформацій задається співвідношенням $\sigma = C : \varepsilon$, де C є тензором пружних властивостей. Цей блок забезпечує фізичну інтерпретацію сенсорних даних і дозволяє переходити від локальних вимірювань до поля стану всієї контрольованої ділянки.

Для інженерної перевірки статичної міцності може використовуватися еквівалентне напруження за Мізесом:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2\}}, \quad \sigma_{eq} \leq [\sigma]. \quad (4)$$

Однак для авіаційних конструкцій вирішальним часто є не одноразове перевищення допустимого напруження, а втомне накопичення пошкоджень. Тому до цифрового двійника вводиться змінна пошкодженості D . Вона характеризує поточну втрату працездатності внаслідок циклічного навантаження. У спрощеній дискретній формі можна використати аналог правила Мінера:

$$D = \sum_i n_i / N_i, \quad R_{rem} = \Phi(1 - D, L_{future}). \quad (5)$$

де n_i – фактична кількість циклів на i -му рівні навантаження;

N_i – кількість циклів до руйнування для цього рівня;

R_{rem} – залишковий ресурс;

L_{future} – прогнозована історія подальшого навантаження.

Така форма є достатньо простою для тез, але вона зберігає головний зміст задачі: ресурс повинен оцінюватися не тільки за проектними припущеннями, а й за реальною історією експлуатації.

Ключовою відмінністю запропонованого підходу є наявність контуру оновлення. Нехай y_{kexp} є вектором вимірних сигналів, а $y_{kmod}(\theta)$ – модельним відгуком при параметрах θ . Тоді оновлення цифрового двійника може бути подане як мінімізація функціоналу розбіжності:

$$J(\theta) = \|y_{kexp} - y_{kmod}(\theta)\|^2 + \lambda \|\theta - \theta_0\|^2. \quad (6)$$

Перший доданок у (6) зменшує розбіжність між розрахунком і вимірюванням. Другий доданок обмежує некоректне відхилення параметрів від номінальної моделі. Завдяки цьому оновлення не перетворюється на формальне підлаштування під шумові дані. Воно залишається фізично осмисленим і пов'язаним із конструкційною природою об'єкта.

З практичного погляду послідовність використання цифрового двійника може бути подана так: зовнішнє навантаження формує сенсорні відгуки; за цими відгуками виконується ідентифікація стану; далі уточнюються параметри розрахункової моделі; після цього оцінюються міцність, пошкоджувальність і залишковий ресурс. Якщо модель систематично недооцінює деформації або переміщення, це може свідчити про локальне зниження жорсткості, зміну закріплення, появу тріщини або інше пошкодження.

Наукова новизна запропонованої постановки полягає в тому, що розрахунок міцності та моніторинг розглядаються не як дві незалежні процедури, а як єдина адаптивна модель. Розрахунок визначає фізичну структуру задачі, а моніторинг забезпечує регулярне уточнення стану. У результаті оцінюється не умовна середня конструкція, а конкретний екземпляр з його реальною історією навантаження і фактичною деградацією властивостей.

Практичне значення такого підходу полягає у можливості підвищити достовірність оцінювання технічного стану авіаційних конструкцій. Цифровий двійник може бути використаний для уточнення напружено-деформованого стану в контрольних зонах, виявлення ознак деградації жорсткості, оцінювання накопиченого втомного пошкодження та підтримки рішень щодо діагностики, ремонту або допустимого продовження експлуатації.

Отже, запропонований цифровий двійник авіаційної конструкції доцільно розглядати як інженерний інструмент прогнозу, а не як засіб візуалізації. Його ефективність визначається не складністю графічного подання, а здатністю поєднувати фізичну модель, фактичні вимірювання та критерії ресурсу. Саме це створює основу для переходу від регламентного обслуговування до стану-орієнтованого або ризик-орієнтованого супроводу авіаційних конструкцій.

Список посилань

1. Khalid I., Qureshi Z. A., Oterkus S., Oterkus E. Progress in inverse finite element method for aerospace structural health monitoring applications // Progress in Aerospace Sciences. 2025. Vol. 157. Art. 101132. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2025.101132>.
2. Pavlenko P., Maihin M., Kryshchuk M., Zaharchuk T., Petrov V. Optimization of additive manufacturing of metal parts and structures based on digital twin and reinforcement learning // Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2025» (м. Київ, 22-24 квітня 2025 р.). Державний університет "Київський авіаційний інститут". С. 16.41-16.47.
3. Yuan S., Meng Y., Chen J. et al. Digital twin evolution mechanism for individual aircraft life prognosis enhanced by on-line damage-load hybrid monitoring // Reliability Engineering & System Safety. 2026. Vol. 270. Art. 112181. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.112181>.

УДК 621.941.2.014

Чернишов О.В., ст. викладач
Музичка Д.Г., канд. техн. наук, доцент
Толкунов І.І., бакалавр
Пробачай Б.С., бакалавр

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, avch2006@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЛАСИФІКАЦІЇ СТРУЖКИ

Метою даної роботи є проведення експериментальних досліджень процесів класифікації стружки за розміром, розробка методики розрахунку параметрів барабанного класифікатора, виготовлення лабораторної установки та відпрацювання режимів ефективного поділу стружки, а також видача вихідних даних для створення дослідного зразка класифікатора.

Експериментальні дослідження на лабораторній установці проводились з двома типами барабанів, що обумовлено вимогою двостадійної класифікації стружки. Кожна стадія сепарації досліджувалася окремо. Перша серія експериментів проводилася з метою дослідження залежності чистоти класифікації від подовження барабану $\lambda = L/D$, де L – довжина робочої частини барабану, D – його діаметр.

Для експериментів використовувався барабан діаметром 0,8 м, довжина робочої частини якого змінювалася від 0,6 до 3,6 м. Зміна довжини барабана пов'язана зі збільшенням його об'єму, тому для кожного значення λ необхідно узгодження об'єму стружки, що завантажується, з об'ємом барабана. Для трикомпонентної суміші елементів стружки з розмірами 5...8 мм, 10...20 мм та 30...50 мм, при однакових масах кожної компоненти у суміші, насипна щільність ρ_1 складає 880 кг/м³. Відношення об'єму стружки, що завантажується, до об'єму барабана в усіх експериментах становило $V_c/V_g = 0,123$.

Виходячи з цього, в експериментах з кожним значенням подовження барабану λ визначалася маса m_{c1} стружки, що завантажувалася. Для трикомпонентної суміші (експерименти по дослідженню першої стадії класифікації) маса m_{k1} кожної компоненти становила 1/3 від маси суміші.

Дослідження процесу другої стадії класифікації проводилося з припущенням, що перша компонента з розміром 5...8 мм вже виділена з суміші. Тому відбиралася двокомпонентна суміш з розмірними межами 10...50 мм.

Для визначення оптимальних умов поділу відношення об'ємів стружки, що завантажується, і барабана при різних подовженнях залишилося таким самим, як і при дослідженні процесу класифікації на першій стадії. Насипна щільність матеріалу тепер становила 720 кг/м³. Виходячи з цього, визначалася маса суміші m_{c2} та маса компоненти m_{k2} , яка становила 1/2 маси суміші.

У якості критерію якості класифікації було прийнято величини:

$$\delta_{op} = \frac{m_{op}}{m_k} \quad \text{та} \quad \delta_g = \frac{m_g}{m_k}, \quad (1)$$

де δ_{op} та δ_g – показники класифікації дрібної та великої компоненти відповідно;

m_{op} – маса дрібної фракції, що взята з приймача для дрібної фракції після розділення;

m_g – маса великої фракції, що взята з приймача для великої фракції після розділення.

Ідеальній класифікації відповідають $\delta_{op} = \delta_g = 1$.

На першій стадії експериментів досліджувалася залежність δ_{op} та δ_g від подовження барабана λ на першій стадії класифікації, тобто при відділенні компоненти з розмірами

5...8 мм. У залежності від подовження барабана, до нього завантажувалась відповідна порція стружки, замірявся час розділення, після чого просіювався вміст приймачів дрібної та великої фракцій і визначалася їх маса.

За результатами цих вимірювань обчислювали значення δ_{op} і δ_g та будували графіки залежностей $\delta_{op} = f(\lambda)$ та $\delta_g = f(\lambda)$, що приведені на рисунку 1. Процес класифікації досліджувався спочатку без перегородок усередині барабану, а потім з ними. Також будували графік залежності продуктивності (витрати матеріалу з пристрою) від подовження барабана $Q = f(\lambda)$.

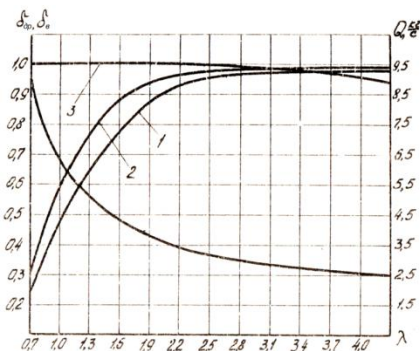


Рис. 1 – Залежність показників класифікації та продуктивності від подовження барабану на першій стадії класифікації: 1 – графік залежності $\delta_{op} = f(\lambda)$ без застосування перегородок у барабані; 2 – графік залежності $\delta_{op} = f(\lambda)$ із застосуванням перегородок; 3 – графік залежності $\delta_g = f(\lambda)$; 4 – графік залежності $Q = f(\lambda)$ при $n = 15 \text{ хв.}^{-1}$ та $\alpha = 5^\circ$

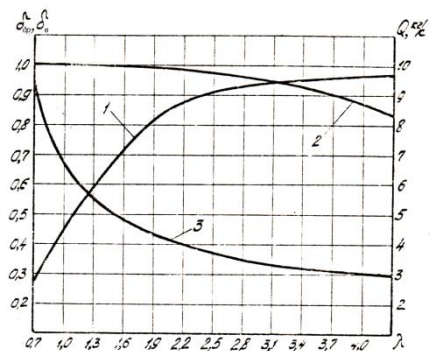


Рис. 2 – Залежність показників класифікації від подовження барабану на другій стадії класифікації: 1 – графік залежності $\delta_{op} = f(\lambda)$; 2 – графік залежності $\delta_g = f(\lambda)$; 3 – графік залежності $Q = f(\lambda)$ при $n = 7,3 \text{ хв.}^{-1}$ та $\alpha = 5^\circ$

Аналіз приведених залежностей показує, що ефективний процес класифікації починається при $\lambda \geq 1,6$ (у цьому випадку показник класифікації дрібної компоненти складає $\delta_{op} \geq 0,8$) Показник класифікації δ_{op} зі збільшенням λ зростає необмежено, наближуючись до 1. Випадок $\delta_{op} = 1$ неможливий внаслідок неминучого винесення дрібної фракції разом з великою. Велика компонента при малих λ повністю вивантажується з торця барабану у свій приймач разом з 50% дрібної компоненти, тому для великої компоненти тут реалізується випадок $\delta_g = 1$. У подальшому, у міру збільшення λ та відсіву дрібної компоненти, створюються умови для проникнення частини елементів великої компоненти у отвори класифікатора, що погіршує якість сепарації. Особливо цей фактор проявляє себе при $\lambda > 3,4$, коли основна маса дрібної фракції вже відсіяна і у барабані перемішується лише велика компонента.

Застосування перегородок дозволяє добитися тих же значень δ_{op} при менших подовженнях барабану та дещо зменшити знос дрібної фракції (рисунки 1 та 2). Це пояснюється тим, що перегородки сприяють кращому перемішуванню матеріалу та інтенсифікують постійне порушення сил зчеплення між елементами стружки. Будь-який суттєвий вплив перегородок на залежність $\delta_g = f(\lambda)$ не спостерігається.

Продуктивність (витрата матеріалу з барабану) зі збільшенням λ зменшується, оскільки збільшується час знаходження матеріалу у барабані. При великих значеннях λ , за рахунок попадання часток великої компоненти в отвори, зменшення продуктивності стає більш плавним.

Проведені дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1) на першій стадії класифікації (відділення фракції 5...8 мм) оптимальне значення подовження барабану становить $\lambda = 2,8...3,2$. При цьому чистота відділення дрібної компоненти становить 96%. Застосування перегородок у порожнині барабану дозволяє зменшити подовження до $\lambda = 2,5...2,8$ та підвищити якість відділення дрібної компоненти до 97...98%;

2) на другій стадії класифікації стружки (відділення фракції 10...20 мм) оптимальне значення подовження барабану становить $\lambda = 2,6...3,0$;

3) оптимальним кутом нахилу осі барабанів до горизонту за умови співвісного послідовного розташування барабанів у класифікаторі є $\alpha = 5^\circ$;

4) частота обертання барабану на першій стадії класифікації повинна бути не нижче 5 хв.⁻¹, а рекомендована – 15 хв.⁻¹. Оптимальна частота обертання барабана на другій стадії класифікації становить $n = 7,3$ хв.⁻¹.

УДК 621.979

Єпішкін О.В., асистент

Національний університет «Запорізька політехніка», yerishkinoleksandr@gmail.com

СЕГМЕНТОВАНИЙ НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ В ПРИВОДАХ ГВИНТОВИХ ПРЕСІВ

Сучасні вимоги до ковальсько-штампувального обладнання зумовлюють необхідність підвищення його енергоефективності. Фірмами Weingarten і Hasenclever розроблено конструкції пресів з одним робочим маховиком, жорстко зв'язаним з гвинтовим шпинделем. Так "Weingarten" для своїх пресів розробив спеціальний привід, у якого робочий маховик одночасно є ротором асинхронного двигуна зі зниженою частотою обертів (преси при номінальних зусиллях до 10 МН) і з одноступеневою зубчастою передачею з двигунами в кількості 2, 4 або 6, розташованими симетрично навколо робочого маховика [1] з частотою обертання 600 об/хв. Привід робочого маховика здійснюється спеціально розробленим електродвигуном потужністю 250 кВт, частотою 600 об/хв та одноступеневою зубчастою передачею від валу двигуна на маховик. Кількість двигунів залежить від потужності преса – можуть застосовуватись 2, 4 або 6 двигунів, розташованих діаметрально протилежно навколо робочого маховика [1]. Як наслідок, виникають пікові пускові струми, що перевищують 1000 А, та значні теплові втрати. Відведення цього тепла від обмоток статора є значною проблемою, що часто призводить до теплових перевантажень електродвигунів. Відповідно до загальної теорії електроприводів, теоретичний ККД у таких перехідних режимах обмежується приблизно 50 % [2].

Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод розділення обертових мас на накопичувач кінетичної енергії, що працює безперервно, та робочий елемент, який підключається циклічно. Замість традиційного жорсткого зв'язку створюється кінетичний накопичувач (система ведучих маховиків), який розганяється електродвигуном до номінальної швидкості та підтримує обертання у сталому режимі з високою ефективністю. Цей накопичувач складається з центрального ведучого маховика та бічних приводних мас, які встановлені безпосередньо на валах високооборотних двигунів із синхронною швидкістю обертання (рис. 1) [3].

Передача енергії до гвинта здійснюється через керовану муфту зчеплення. Головною перевагою такої кінематичної схеми є перехід на вищі оберти акумулюючих мас. Наприклад, при швидкості змикання муфти 300 об/хв (передаточне відношення $i = 5$) та швидкості двигуна 1500 об/хв, момент інерції цих мас зменшується в $i^2 = 25$ разів. Таким чином, маса приводних елементів накопичувача зменшується у 25 разів при збереженні тієї ж кількості кінетичної енергії. Це дозволяє суттєво зменшити загальну металоємність

приводу гвинтового преса та використовувати для його роботи стандартні серійні асинхронні двигуни [4], обслуговування яких не викликає труднощів.

Додатковою перевагою розробленої конструкції є оптимізація зворотного ходу преса. Щоб зменшити рівень кінетичної енергії, яку необхідно розсіяти під час підйому повзуна, сам робочий маховик розділено на дві частини: внутрішній маховик (який жорстко закріплений на гвинтовому шпинделі) та зовнішній маховик (який має здатність вільно обертатися) [4]. Під час зворотного ходу зовнішній маховик гальмується (відключається), і під час підйому повзуна обертаються лише шпиндель та внутрішня частина маховика [5]. Це мінімізує втрати енергії під час розгону та гальмування масивних деталей.

Запропонована кінематична схема з розділенням мас дозволяє уникнути роботи двигуна в несприятливих перехідних режимах з високими пусковими струмами. Вона значно знижує металоємність обладнання, усуває теплові перевантаження двигуна та підвищує загальну енергоефективність процесу точного штампування гвинтових пресів.

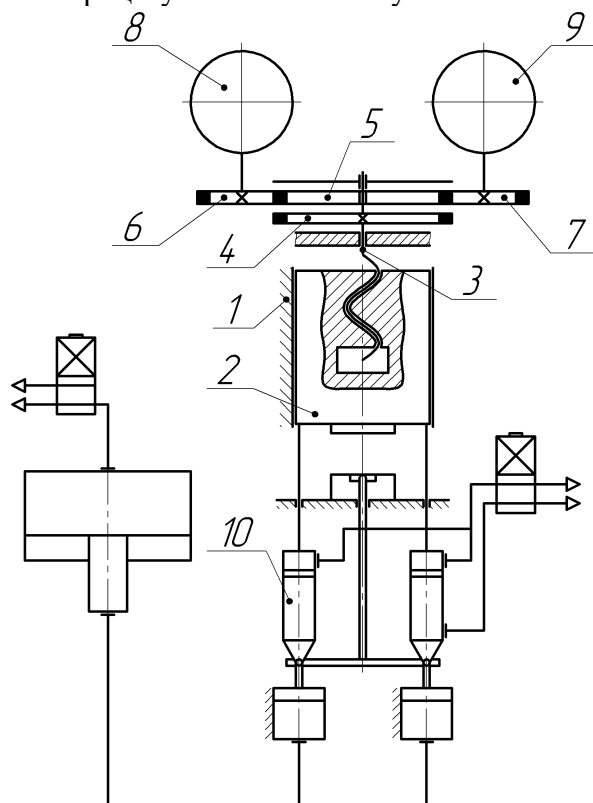


Рис. 1 – Кінематична схема гвинтового преса (1 – станина; 2 – повзун; 3 – гвинтовий шпиндель; 4 – ведений робочий маховик; 5 – ведучий маховик; 6, 7 – бокові ведучі маси; 8, 9 – електродвигуни; 10 – привід зворотного ходу повзуна)

Список посилань

1. Screw press [Електронний ресурс] : patent 4563889 US / SMS Hasenclever Maschinenfabrik GmbH. – Publ. 1986. – Режим доступу: <https://patents.justia.com/patent/4563889>.
2. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков [та ін.]. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.
3. Загірняк М. В. Електричні машини / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ: Знання, 2009. – 399 с.
4. Енергоефективні конструкції гвинтових пресів / В. Обдул, А. Матюхін, А. Ковалек [та ін.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2024. – № 4. – С. 67–71. – DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2024-7-7>.
5. Способи регулювання енергії ударів на гвинтових пресах / В. Д. Обдул, А. Ю. Матюхін, В. В. Широкобоков [та ін.] // Обробка матеріалів тиском. – 2024. – № 1 (53). – С. 152–158. – DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)152](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)152).

УДК 631.316

Зданевич С.В., канд. техн.наук

Погребняк Р.П., канд. техн.наук

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, zdanevych.s.v@dsau.dp.ua

Зданевич С.С., викладач

Комунальний заклад «Ліцей №22», м. Кам'янське, zdanevichss@gmail.com

Гурідова В.О., старша викладачка

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, huridova.v.o@dsau.dp.ua

ДИНАМІЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДА МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЧІПНОГО ШИРОКОЗАХВАТНОГО КУЛЬТИВАТОРА В РЕЖИМАХ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Несучі конструкції (НК) сучасних причіпних широкозахватних культиваторів (ПШК) складаються з окремих секцій, що мають значну масу і габарити, та здатні за допомогою гідравлічного привода трансформуватися з транспортного в робоче положення.

Аналіз літературних джерел [1-4] вказує на недостатність і неповноту інформації про комплексні експериментальні дослідження ПШК з метою визначення навантаження на елементи гідравлічної системи трансформації НК.

Розглянути результати комплексних натурних вимірювань зміни навантаження на елементи гідравлічної системи НК ПШК в режимах трансформації на прикладі культиватора Horsch FG 18.30 (Німеччина).

Для визначення тисків у поршневих та штокових порожнинах гідроциліндрів центральної, середньої та крайньої секцій рами ПШК були встановлені чотири вимірювальних вузла, що склались з датчиків тиску та манометрів.

Дослідженні наступні режими трансформації НК культиватора:

- складання (розкладання) крайньої секції на середню (рис.1);
- складання (розкладання) середньої секції на центральну (рис.2);
- підйом (опускання) культиватора в розкладеному стані;
- підйом (опускання) центральної рами у транспортному положенні.

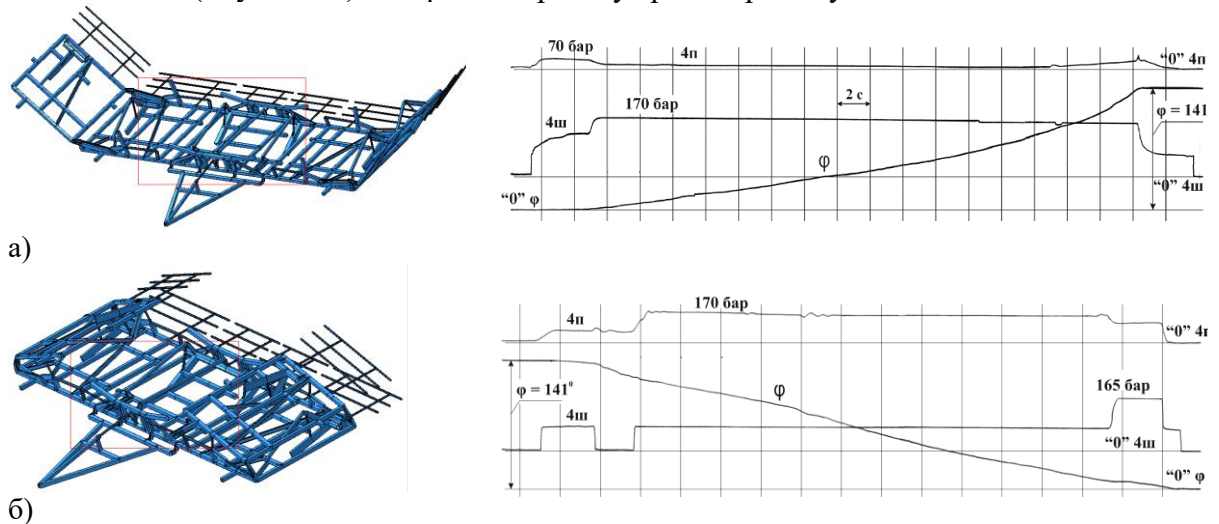


Рис. 1 - Типові осцилограми зміни кута повороту φ і тисків у штоковій (4ш), поршневій (4п) порожнинах гідроциліндрів: при складанні (а) та розкладанні (б) крайньої секції на середню

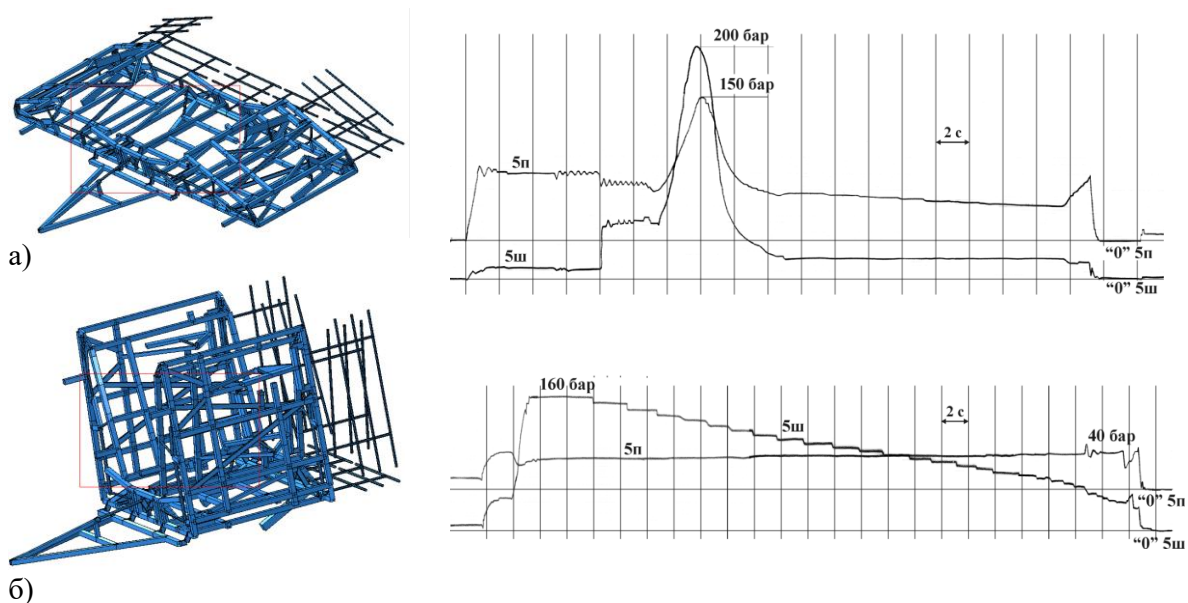


Рис. 2 - Типові осцилограми зміни тисків у штоковій (5ш) та поршневій (5п) порожнинах гідроциліндрів: при розкладанні (а) та складання (б) крайньої та середньої секції на центральну секцію

З метою оцінки повного статичного навантаження на балки осі центральних тандемів в транспортному положенні культиватора проведені натурні вимірювання з установкою опор під балки центральної рами.

Для аналітичного дослідження навантаження НК ПШК FG-18.30 у функціональних положеннях створена параметрична кінцево-елементна модель. Моделюванню піддавалися кілька фіксованих положень при повороті крайніх секцій у діапазоні $0...161^\circ$. Найбільш навантаженим для елементів НК крайньої та середньої рам виявився момент відриву опорних коліс та коліс тандемів крайньої секції від опорної поверхні. При трансформації в транспортне положення моделюванню піддавалися кілька фіксованих положень середньої секції при повороті у діапазоні кута $0...93^\circ$.

При натурних дослідженнях визначені навантаження на елементи гідравлічної і механічної системи при переміщенні НК рам культиватора у режимах трансформації (транспортне/робоче положення) шляхом експериментального комплексного аналізу зміни навантаження на систему гідравлічного привода та напруженого стану елементів металоконструкції.

Список посилань

1. Зданевич С.В., Погребняк Р.П., Зданевич С.С., Гурідова В.О. Натурні вимірювання динамічного навантаження несучої конструкції причіпного широкозахватного культиватора HORSCH FG 18.30 в режимі культивації. Вібрації в техніці та технологіях. 2025. № 1(116). С. 106–111. doi: 10.37128/2306-8744-2025-1-14.
2. Шаргородський С.А., Руткевич В.С., Ящук Є.В. Розробка математичної моделі гідравлічного привода розгортання секцій широкозахватної машини сільськогосподарського призначення. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. № 4 (115). С.148-158. doi: 10.37128/2520-6168-2021-4-17.
3. Шаргородський С.А., Руткевич В.С., Ящук Є.В. Математичне моделювання гідропривода переведення широкозахватного сільськогосподарського агрегату із транспортного положення у робоче. Вібрації в техніці та технологіях. 2022. № 3 (106). С.54-63. doi: 10.37128/2306-8744-2022-3-8.
4. Shargorodskiy S., Sharhorodska V., Kondratuk D. Development of a dynamic model of a hydraulic drive of a positioning mechanism of a wide-scale agricultural unit. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2025. № 1 (128). С.84-96. doi: 10.37128/2520-6168-2025-1-10

УДК 621.822.6

Повстяной О.Ю., докт. техн. наук, професор

Гальчук Т.Н., канд. техн. наук, доцент

Сметюх Б.В., аспірант

Луцький національний технічний університет, povstjanoj@ukr.net

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ

У даному теоретично-практичному дослідженні запропоновано науко-практичний підхід до вирішення актуальної на даний час проблеми забезпечення необхідної якості заготовок для підшипників.

Авторами розглядалася обробка торців зовнішніх кілець конічного роликопідшипника 32017X DIN 720 (ISO 355) зі сталі ШХ15, що має твердість (55-64 HRC), методом торцевого шліфування (рис.1).

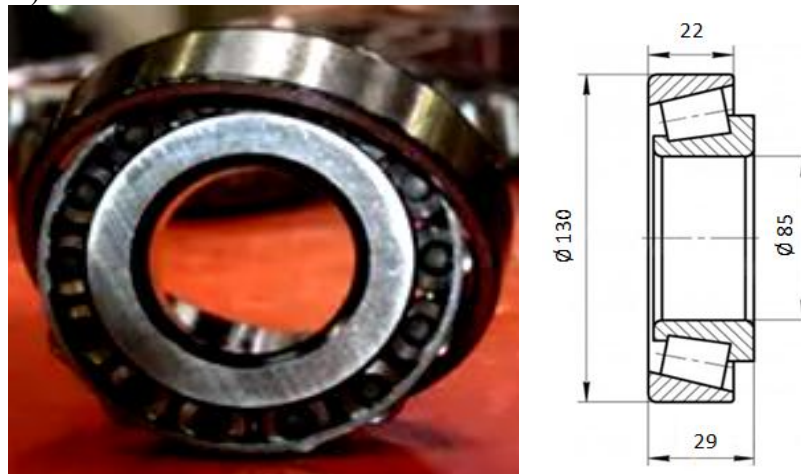


Рис.1 – Роликопідшипник 32017X: а – загальний вигляд; б – схема

Встановлено, що недоліками традиційних методів шліфування під час обробки таких заготовок є складність одержання поверхонь необхідної точності та якості за фізико-механічними характеристиками: непаралельність торцевих поверхонь в межах допуску 8...12 мкм; шорсткість торців до 1,25 мкм; виникнення припиків поверхневих шарів, зниження твердості тощо.

Тому запропоновано використовувати переривчастий шліфувальний інструмент з подачею змащувально-охолоджувальної рідини через канавки круга під тиском, як більш раціональний ніж шліфування суцільним кругом.

Результати експериментальних досліджень виявили технологічні переваги запропонованої обробки: шорсткість торців покращилась на 0,4...0,6 мкм, паралельність на 2...3 мкм, припіки поверхонь торців відсутні. Твердість поверхневого шару після оброблення переривчастим кругом підвищилась з 60 до 64 HRC.

При дослідженні процесу утворення мікропрофілю поверхні під час переривчастого шліфування встановлено, що шорсткість R_a 0,1...0,6 мкм забезпечується для режимів шліфування: $V_d = 4,0...6,0$ м/хв, $t = 0,1...0,3$ мм, $V_{кр} = 28...30$ м/с. Мінімальні значення не паралельності торців кільця досягається при величині припуску 0,2...0,3 мм.

Запропоноване торцеве шліфування кілець підшипника переривчастим кругом зменшує трудомісткість та собівартість обробки у 1,5...2 рази за рахунок поєднання чорнової та чистової обробки; зменшення енерговитрат для обробки на 35...40 %.

УДК 621.941+762.1

Ігнатенко П.Л., канд. техн. наук, доцент

Ігнатенко О.А., ст. викладач

Гаращенко Д.В., аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка»

ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ З ПОРОШКОВИХ СПЕЧЕНИХ МАТЕРІАЛІВ

Встановлена залежність величини деформації яка перевищує допустимі за ДСТУ 3608–78 відхилення від округлості деталей складної геометричної форми та проведено аналіз результатів дослідження при механічній обробці, а також у виробничих умовах при закріпленні, де можлива значна деформація.

Геометричні параметри деталей виготовлених методом порошкової металургії є першочерговим чинником для досягнення якості механічної [1]. Деталі із спечених порошкових матеріалів у процесі їх виготовлення можуть набувати певне відхилення від своєї геометричної форми, яке не є критичним. У процесі роботи ці деталі набувають зміни форми і розмірів.

Якість поверхневого шару обробленої поверхні деталей із порошкових спечених матеріалів залежить від режимів обробки та інструменту, яким здійснюється обробка. Важливим фактором є використання змінних мінералокерамічних пластин.

Округлість деталей визначалась після операції розточування. Після цього була розроблена математична модель для визначення округлості деталі при розточуванні [2].

Деформація і технологічні залишкові напруження мають негативний вплив на точність форми деталі, що викликає вібрацію, і як наслідок швидке спрацювання.

Після цього виконується перевірка адекватності моделі пропонується модель з натуральними змінними.

Як результат маємо скорочення об'єму експериментальної роботи, але обсяг обчислень зростає. Розглянута інформація може застосовуватись як методичні матеріали для створення загального універсального інструментарію моделювання технологічних процесів у дослідженнях процесів механічної обробки деталей.

Список посилань

1. Ігнатенко П.Л., Грищенко М.О. Забезпечення точності форми маложорстких деталей складної геометричної форми при механічній обробці // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – № 3. – С.138 – 141.

2. Ігнатенко П.Л., Грищенко М.О.. Приладова система вимірювання округлості маложорстких кільцевих деталей складної геометричної форми // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – № 3. – С.188 – 193.

СЕКЦІЯ 2. ДЕРЕВООБРОБНІ ТА МЕБЛЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 674.06:674.21

Mayevskyy Volodymyr, Doctor in Technical Sciences, Professor
Ukrainian National Forestry University, Lviv, mayevskyy_v@yahoo.com

Udovytska Mariana, teacher of the highest category
Technological College of the Ukrainian National Forestry University, Lviv,
udovytskam@gmail.com

Vitalii Lan, PhD Student
Ukrainian National Forestry University, Lviv, Lanvitalik@ukr.net

STRENGTH ANALYSIS OF GLUED LAMINATED TIMBER BEAMS WITH FINGER JOINTS

This study examines how wood defects and imperfections in finger joints affect the strength and modulus of elasticity of glued laminated timber (glulam) beams of strength class C24 (KVH).

Wood is one of the oldest yet most modern building materials, widely used in the construction of residential, public, and industrial buildings. Its popularity stems from its eco-friendliness, low specific weight, ease of processing, and high strength-to-weight ratio. However, wood is a natural material characterized by significant anisotropy and structural irregularity [1].

In modern construction, where timber is often used in long-span structures such as bridges and multi-story buildings, ensuring reliability is becoming increasingly important. Therefore, studying the impact of defects and joints on the strength of glued beams is essential. This research helps develop prediction methods, refine calculations, and create engineering solutions for producing glulam beams with enhanced durability.

Recent studies show that the use of engineered wood, specifically glued laminated timber (glulam) and CLT panels, minimizes the negative impact of defects through careful selection and grading of lamellas [2, 3]. Furthermore, the use of digital technologies (such as laser scanning and machine visual grading) allows for real-time strength prediction of structural elements [4].

The further development of quality control technologies for glulam and the improvement of the regulatory framework will ensure more reliable and durable operation of wooden structures.

Given the numerous advantages of glued structural timber elements in modern construction, it is essential to study the efficiency and reliability of finger joints. These joints are widely used in the production of glued wooden beams (Fig. 1) and play a decisive role in determining the overall load-bearing capacity of the structure.



Fig. 1 – Glued structural solid timber beam (KVH) [5]

Special attention should be paid to specimens with poor adhesive bonding in the finger joints (Fig. 2). In these cases, failure began along the glue line, indicating insufficient adhesive strength.

Delamination occurred both due to inadequate glue penetration of the surfaces and the presence of micro-defects or voids within the joint zone. This type of failure significantly reduced the total load-bearing capacity of the glulam beam, as the joint is the most heavily stressed part of the structure.



Fig. 2 – Failure pattern of specimens with imperfect adhesive application in the finger joint zone [6]

The analysis conducted allowed for the identification of the primary factors influencing the strength of finger joints in glued beams [5, 6].

The results of the study indicate that wood defects and imperfect glue lines are significant risk factors for the durability and strength of structural elements. Their presence leads to the formation of stress concentration zones, a reduction in adhesive strength, and the premature failure of glued laminated timber beams.

References

1. M. Udovyt'ska, V. Mayevskyy, O. Udovyt'skyi, Z. Kopynets, A. Manzyuk. Development of Mathematical Model for Predicting the Cupping of Lumber. Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering Vol. 17(66) No. 2 – 2024, pp. 111-126. DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2024.17.66.2.7>.
2. Haida S., Udovyt'skyi O., Rutkovska I., Salabai R., Salabai I. (2025). Pobudova matematychnoi modeli mitsnosti zroshchennykh lat iz vzhvyanoi derevyny dlia dakhovykh konstrukt'sii budynkiv. Visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu pryrodokorystuvannia. Serii Arkhitektura ta budivnyt'stvo, (26), 7–12. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.007>.
3. Buchanan A. H. Structural design for fire safety. 2nd ed. Chichester : Wiley, 2017. 437 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118735844>.
4. Alaei P., Frühwald E. A digital image correlation method for deformation and fracture analysis of structural timber. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 291. Article 123268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123268>.
5. Bukhaneych, I., Maievskiy, V., Udovyt'skyi, O., Manziuk, A., Kopynets, Z. (2025). Doslidzhennia osnovnykh kharakterystyk mitsnosti kleienykh konstrukt'siinykh balok iz tsilnoi derevyny. Visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu pryrodokorystuvannia. Serii Arkhitektura ta budivnyt'stvo, (26), 24–33. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.024>.
6. V. O. Maievskiy, O. M. Udovyt'skyi, Z. P. Kopynets, M. V. Udovyt'ska, A. O. Manziuk. Eksperymentalni doslidzhennia mitsnosti derevianykh kleienykh balok z vadamy derevyny. Suchasni tekhnologii, materialy i konstrukt'sii v budivnyt'stvi: Naukovo-tekhnichnyi zhurnal. – Vinnytsia: VNTU. – 2025. – No 2 (39). 27–37. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-2-27-37>.

УДК 674.028.9:620.16

Валько С.М., аспірант
Кшивецький Б. Я., докт. техн. наук, професор

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, bogdan.kshivetsky@nltu.edu.ua

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЛОГІСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ КЛЕЙОВОГО З'ЄДНАННЯ ДЕРЕВИНИ У МЕБЛЕВОМУ ЩИТІ

Дерев'яні клеєні конструкції виготовляють із заготовок хвойних та листяних порід. Для склеюють деревини використовують термопластичні полівінілацетатні клейові матеріали. Щоб отримати клеєні конструкції різних габаритних розмірів та функціонального призначення, деревину склеюють за довжиною, шириною та товщиною. При виготовленні меблевого щита, заготовки із деревини, склеюють за довжиною та шириною. За довжиною заготовки із деревини склеюють на зубчастий міні-шип, отримуючи ламелі, які за шириною по крайці склеюють на гладку фугу у меблевий щит.

Для меблевого щита важливу роль відіграє клейове з'єднання, яке повинно забезпечити йому відповідну міцність. На міцність клейового з'єднання деревини впливає тип з'єднання та властивості клейових матеріалів. При виготовленні меблевого щита використовують два типи з'єднань, а саме з'єднання деревини на зубчастий міні-шип та гладку фугу. При склеюванні бездефектних заготовок за довжиною на зубчастий міні-шип отримують ламелі. Міцність таких клейових з'єднань деревини має важливе значення, оскільки впливає на експлуатаційні характеристики конструкцій. Необхідно відзначити, що міцність деревини на зубчастий міні-шип при статичному згині на 40 % менша за міцність масивної деревини. Це вказує на важливість такого з'єднання у дерев'яних клеєних конструкціях, оскільки подальше значення міцності клейового з'єднання деревини на зубчастий міні-шип, буде залежати від умов експлуатації, а саме дії вологості, температури, навантажень, ультрафіолету тощо.

Дослідження міцності клейових з'єднань деревини на зубчастий міні-шип у дерев'яних клеєних конструкціях є складним та тривалим, особливо на вплив температурно-вологісних навантажень під час експлуатації. Тому, дослідження зміни міцності клейових з'єднань деревини на зубчастий міні-шип у меблевому щиті за дії температурно-вологісних навантажень є актуальним.

Мета роботи – дослідити вплив температурно-вологісних навантажень на міцність клейового з'єднання букової деревини на зубчастий міні-шип у меблевому щиті, що склеєний термопластичними полівінілацетатними клеями.

Для досліджень використовували меблевий щит із букової деревини. Меблевий щит піддавали тривалій витримці протягом сімдесяти двох місяці у природних умовах. Після чого зразки піддавали випробуванням на статичний згин, за допомогою лабораторної розривної машини марки UIT STM OSO із фіксуванням максимального навантаження до їх руйнування.

На рис. 1 наведено результати дослідження міцності клейових з'єднань букової деревини на зубчастий міні-шип для контрольних зразків та зразків після температурно-вологісних навантажень.

На рис. 2 наведено величину напружень при статичному згині клейового з'єднання на зубчастий міні-шип букової деревини після температурно-вологісних випробувань залежно від навантаження.

Міцність клейових з'єднань букової деревини на зубчастий міні-шип при статичному згині у меблевому щиті для контрольних зразків становила 64,03 МПа, а після температурно-вологісних випробувань зменшилась до 54,19 МПа, тобто на 15,36 %. Зменшення міцності у клейових з'єднань при дії температурно-вологісних навантажень під

час експлуатації супроводжується структурними змінами та пружно-деформаційними процесами у клейовому з'єднанні, що призводить до зменшення його адгезійної міцності.

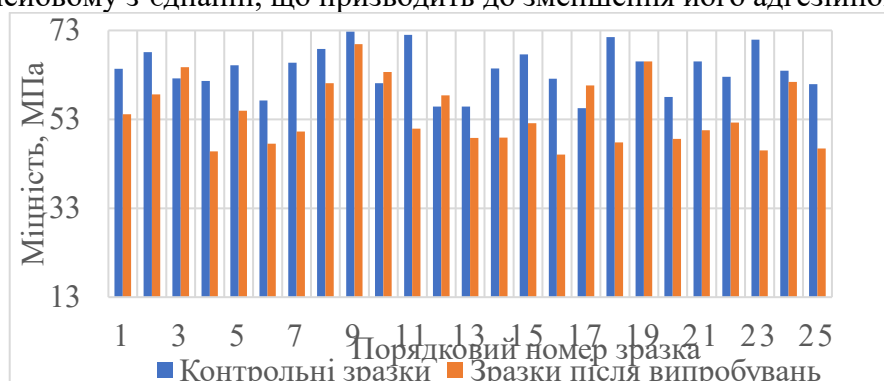


Рис. 1 – Міцність клейових з'єднань на статичний згин зразків букової деревини, склеєних на зубчастий міні-шип, для контрольних зразків та зразків після температурно-вологісних навантажень

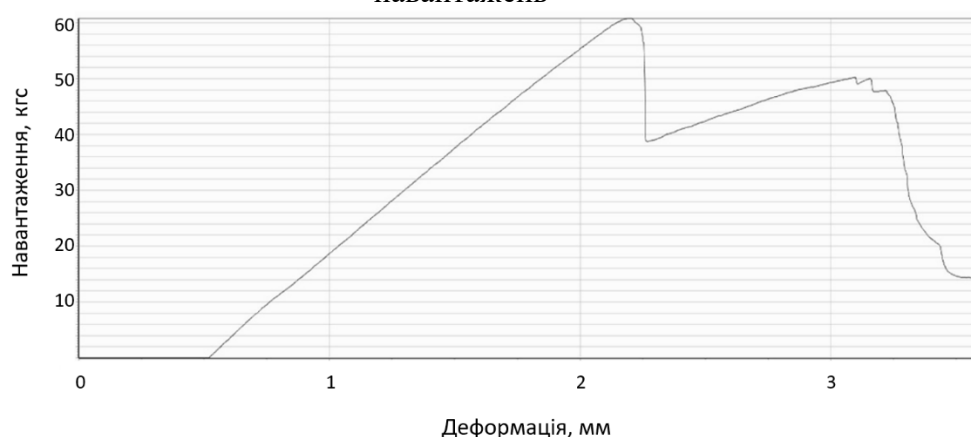


Рис. 2 – Діаграма руйнування клейових з'єднань на зубчастий міні-шип

Підсумовуючи можна відзначити, що дослідження міцності клейових з'єднань букової деревини на зубчастий міні-шип у меблевому щиті є актуальним, оскільки тривала дія температурно-вологісних навантажень під час експлуатації приводить до зміни пружно-деформаційних процесів та зменшення міцності таких клейових з'єднань.

Список посилань

1. Valko, S. M., & Kshyvetsky, B. Y. (2025). Research on the strength of adhesive joints in wooden adhesive structures. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 93–100. <https://doi.org/10.36930/4035041>
2. Kshyvetsky, B., Kindzera, D., Sokolovskyi, I., Storozhuk, V., Mayevska, O., Somar, H., & Kindzera, A. (2024). Features of the formation of cohesive and adhesive strength by non-structured and structured polyvinyl acetate films during wood gluing. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 3, 89–97. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-89-97>
3. Gayda, S. V. (2018). Progressive technologies of longitudinal wood splicing. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 24, 10–19. [In Ukrainian]. URL: <https://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal>
4. Datskiv, H. V., & Kshyvetsky, B. Ya. (2022). Determination of the strength of adhesive joints of thermally modified and ordinary wood using different methods. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(5), 63–68. <https://doi.org/10.36930/40320509>
5. DSTU EN 205:2003. Adhesives – wood adhesives for use other than in the production of structural supporting beams – determination of ultimate strength. ICS 83.180. Replaces document EN 205:1991. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73788
6. Kshyvetsky, B., Kindzera, D., Sokolovsky, Ya., Somar, H., & Sokolovskyi, I. (2023). Prediction of the strength of oakwood adhesive joints bonded with thermoplastic polyvinyl acetate adhesives. *Chemistry, chemical technology*, vol. 17, no. 1, 110–117. <https://doi.org/10.23939/chcht17.01.110>

УДК 674.028.9+674.815:665.93

Зайло Р.І., аспірант

Кшивецький Б. Я., докт. техн. наук, професор

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, bogdan.kshivetskyi@nltu.edu.ua

ВПЛИВ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ КЛЕЙОВОГО З'ЄДНАННЯ НА ФОРМОСТІЙКІСТЬ МЕБЛЕВОГО ЩИТА

Клейові матеріали - це речовин органічної або неорганічної походження, які за певних умов здатні формувати з'єднання різних матеріалів між собою. Меблевий щит це дерев'яна клейова конструкція, яка виготовлена із заготовок деревини, що склеєні між собою за довжиною та шириною за допомогою клейових матеріалів. Для склеювання деревини при виготовленні меблевого щита використовують, в більшості випадків, клейові матеріали на полівінілацетатній основі, які здатні формувати міцне та довговічне з'єднання. Серед полівінілацетатних клеїв найбільш поширеними є клеї із класом довговічності D3 і D4. У більшості випадків, при виготовленні меблевого щита, виходячи із умов експлуатації, використовують клеї із класом довговічності D3. Це однокомпонентні клеї, які характеризуються хорошими адгезійними властивостями до деревини та здатністю формувати міцні, еластичні та довговічні клейові з'єднання.

Важливою характеристикою з'єднань деревини однокомпонентними полівінілацетатними клеями із класом довговічності D3 є здатність поглинати вологу як із деревини так із навколишнього середовища та за допомогою функціональних -ОН груп формувати водневі зв'язки як між компонентами клейової композиції так і між компонентами клейової композиції та деревини, що підвищує їх вологу та водостійкість.

На рис. 1 наведено механізм формування водневих зв'язків між компонентами деревини та клейової композиції.

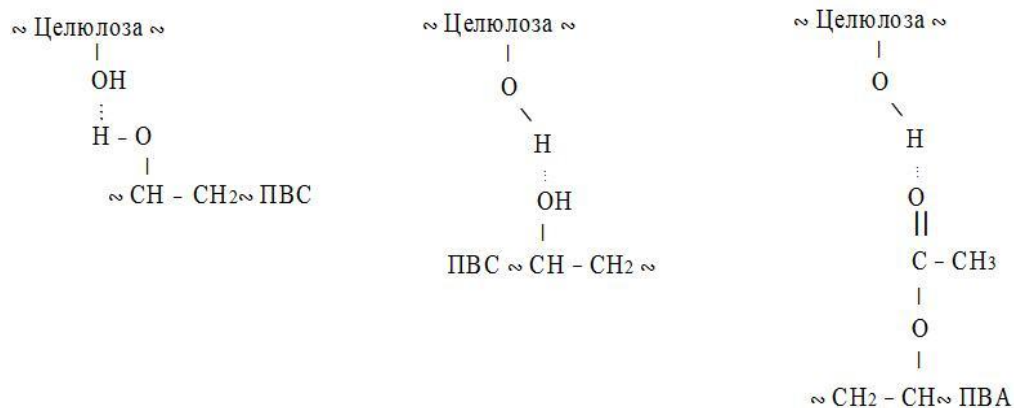


Рис. 1 – Механізм формування водневих зв'язків між компонентами клейової композиції та деревини

Окрім того, полівінілацетатні клеї мають хороші релаксаційні властивості, які роблять клейове з'єднання більш еластичними. Це дозволяє клейовому з'єднанню швидше здійснювати релаксаційні процеси, і тим самим підвищити довговічність меблевого щита. Для дослідження релаксаційних властивостей використовують рівнянням Кольрауша.

$$\sigma(t) = \sigma_{\infty} + \sigma_0 \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^k\right) = \varepsilon E_{\infty} + \varepsilon E_0 \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^k\right)$$

де $\sigma(t)$ – напруження в момент часу t ,

σ_{∞} (або E_{∞}) – рівноважна частина напруження,

σ_0 (або E_0) – напруження, що релаксує,

τ – час релаксації,

ε – відносне подовження.

Час релаксації - це здатність матеріалу розсіювати напруження. Для розрахунку часу релаксації для ПВА клеїв використовують формулу Кольрауша. Типова релаксаційна крива і результат розрахунку показані на рис. 2.

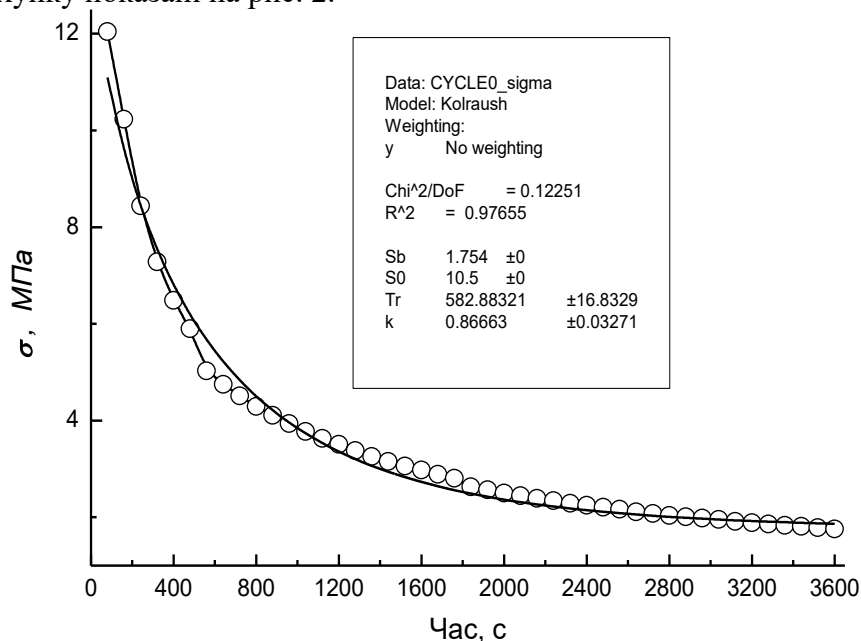


Рис. 2 – Релаксаційна крива для полівінілацетатного клею

Як видно із рис. 2 полівінілацетатні клеї із класом довговічності D3, що формують рідкосітчасту структуру клейового шва, володіють хорошими релаксаційними властивостями, що здатні забезпечити клейову з'єднанні у меблевому щиті належну еластичність під час експлуатації. Еластичність клейового з'єднання забезпечує меблевому щиту підвищену формостійкість під час виготовлення, зберігання та експлуатації.

На формостійкість меблевого щита впливає тип клейового з'єднання, а саме з'єднання на гладку фугу по крайці чи на зубчастий міні-шип в торець, режимні параметри склеювання, умови експлуатації тощо.

Підсумовуючи необхідно відзначити, що дослідження формостійкості меблевого щита має важливе значення, оскільки впливає на його міцність та довговічність. Для забезпечення належної формостійкості меблевому щиту, рекомендовано використовувати клейові матеріали, які формують міцні, еластичні та водостійкі клейові з'єднання з деревини. До таких клейових матеріалів відносять термопластичні полівінілацетатні клеї із класом довговічності D3 і D4.

Список посилань

1. Кшивецький Б. Я. Дослідження релаксаційних властивостей клейової плівки на основі полівінілацетату залежно від кількості циклів волого-температурних навантажень / Б. Я. Кшивецький // Вісник НУ «Львівська політехніка». «Хімія, технологія речовин та їх застосування». – 2007. – С. 60-64.
2. Соколовський Я. І. Взаємозв'язок деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних процесів у капілярно-пористих тілах / Я. І. Соколовський // Доповіді НАН України, сер. Механіка. – 1998. – № 9. – С.76-80.
3. ДСТУ EN 204:2014 Клеї термопластичні несилові для деревини. Класифікація (EN 204:2001, IDT).
4. Podibka, T. I. (2020). A investigation of form of stability of variously designed furniture board made of pine wood of different constructions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 108–120. <https://doi.org/10.36930/42204613>.
5. Valko, S. M., & Kshyvetsky, B. Y. (2025). Research on the strength of adhesive joints in wooden adhesive structures. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 93–100. <https://doi.org/10.36930/4035041>

УДК 674.04:544.7

Пінчевська О.О., докт. техн. наук, професор

Давидов В.М., аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,

olenapinchewska@nubip.edu.ua

ЩОДО ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ОСЛАБЛЕНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА

За останні роки набула широкого розповсюдження проблема масового всихання ясена, обумовлена різними факторами як-то є зміна клімату та антропогенний тиск, що спричиняє спалахи масового розмноження комах і епідемії патогенів. Древа втрачають гілки, з'являється коренева гниль тощо і згідно прийнятої класифікації вони переходять у стан ослаблення. Аналіз стану ясеневих насаджень у Голосіївському районі м. Києва показав, що частка здорових дерев склала лише 7%, до ослаблених і сильно ослаблених було віднесено 18%, найбільшу частку становили дрова, що відмирають та відмерлі. Таким чином створюються умови для подальшого зараження і пошкодження дерев. Для запобігання цьому проводять санітарні рубки і постає питання про можливе використання ослаблених дерев для виготовлення певних виробів. Для цього необхідно провести їх знезараження шляхом стерилізації [1]. Аналіз існуючих способів стерилізації показав, що для повного знезараження матеріалу використовують високі понад 110 °C температури [2], що зумовлює перебіг процесів термічного модифікування деревини.

Проведені експериментальні дослідження властивостей термомодифікованої ослабленої деревини ясена, оброблених за різними температурами – 185°C, 190°C та 195 °C. Визначено вплив температури оброблення на вміст вологості, рівноважної вологості, щільності, величини всихання, міцності на статичний згин, твердості та біологічної стійкості у разі використання просто неба. При цьому були використані відповідні європейські та вітчизняні стандарти. Отримані дані було порівняно з відповідними властивостями неослабленої деревини ясена, висушеної за температури $t \leq 70$ °C.

Деревні вироби характеризуються численними показниками, серед яких одні мають вирішальне значення, а інші - другорядне. При цьому підвищення одного з них не завжди забезпечує переважний вплив на кінцевий результат. Раціональним підходом до розв'язання багатокритеріальних завдань є процедура згортання (узагальнення) параметрів у цільову функцію. Водночас реалізація цього підходу стикається з проблемою несумірності показників. Оскільки кожен параметр має індивідуальну розмірність, виникає потреба у нормуванні - переведенні значень у єдину безрозмірну шкалу для забезпечення їхньої порівняльності. Проблематика полягає у визначенні оптимального алгоритму агрегування вихідних даних. Для цього використано метод узагальненої функції бажаності Е. Харрінгтона [2], який знайшов використання для визначення оптимальних параметрів багатьох процесів.

Функція бажаності дозволяє змодельовати узгоджену взаємодію підсистем та обрати оптимальну альтернативу з урахуванням взаємозв'язків між ними. Її головна перевага - приведення різнорідних параметрів до єдиної безрозмірної шкали, що пов'язує об'єктивні показники з суб'єктивною оцінкою їхньої якості. Функцію бажаності задано рівнянням:

$$d = \exp [-\exp (-y')], \quad (1)$$

де d – значення бажаності;

y' – кодоване, тобто приведене до одного діапазону, значення часткової ознаки.

Оскільки функція (1) при $y' = -2$ $d \approx 0$, а при $y' = 6$ $d \approx 1$, робочий діапазон кодованих значень ознаки лежить в діапазоні $-2 \dots 6$. Вигляд функції бажаності при односторонньому обмеженні ознаки $y \leq y_{\max}$, $y \geq y_{\min}$ показаний на рис. 1.

Класичний підхід до використання функції бажаності полягає в тому, що весь діапазон змін бажаності поділяється на п'ять піддіапазонів: ($<0,8 - 1,0$) – дуже добре, ($<0,63 - 0,8$) – добре, ($<0,37 - 0,63$) – задовільно, ($<0,2 - 0,37$) – погано, ($<0,2$) – дуже погано. Для розрахунку бажаності показника необхідно діапазону зміни у фізичних одиницях виміру поставити у відповідність безрозмірну шкалу. Зазвичай діапазон зміни показника кодують таким чином, що мінімальному значенню відповідає бажаність 0,37, а максимальному – значення 0,8. Ці значення відповідають прямолінійній ділянці функції бажаності та забезпечують однакову чутливість експертних оцінок.

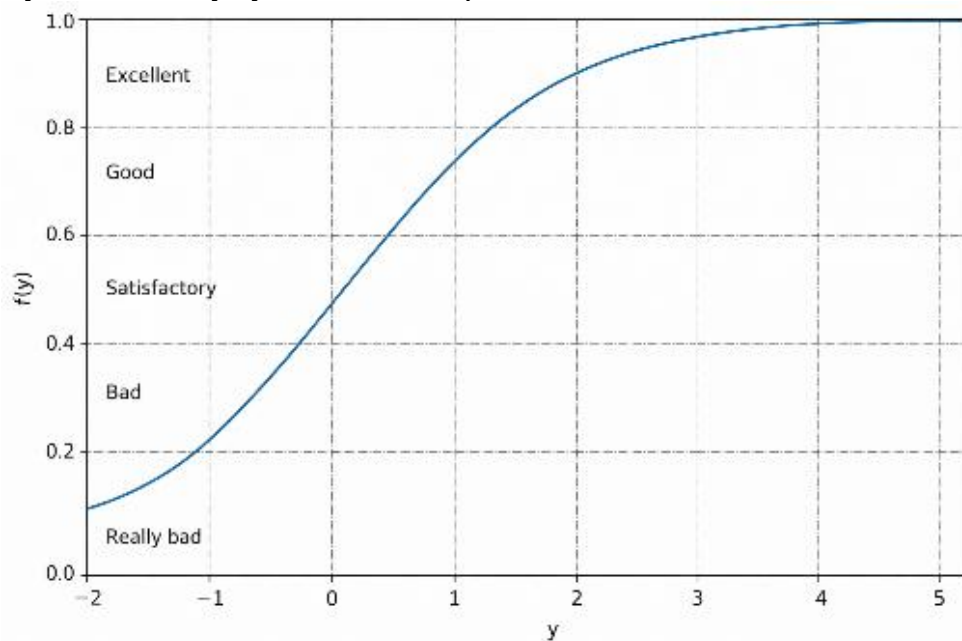


Рис. 1 – Функція бажаності при односторонньому обмеженні ознаки

Для кодування приватних показників використано вираз:

$$y' = a \cdot y + b, \quad (2)$$

де a , b – коефіцієнти лінійної функції.

Після визначення з діапазоном бажаних значень i з врахуванням (2) отримано систему з двох рівнянь, з якої визначено значення a і b :

$$y'_{\max} = a y_{\max} + b; y'_{\min} = a y_{\min} + b. \quad (3)$$

Розрахунок кодованих значень окремих ознак за (2), дозволяє обчислити їх бажаність за формулою (1). Отримані значення $d(i)$ для i -го параметра перераховано разом з іншими в узагальнений коефіцієнт бажаності – D , який обчислено за формулою :

$$D = (\prod_{i=1}^n d_i)^{1/n}, \quad (4)$$

де n – кількість використовуваних показників параметрів порівняння для даної системи.

Аналіз результатів досліджень показав, що при збільшенні температури оброблення спостерігається зменшення фактичної та рівноважної вологості, щільності та усихання. У разі збільшення температури оброблення спостерігалось зменшення міцності зразків деревини ясена, що є характерним також для будь-якої породи деревини, тому вироби з неї не використовують у якості інженерних. Збільшення температури оброблення не призвело до суттєвого погіршення твердості, як в радіальному, так і в тангенціальному напрямках порівняно із контрольними зразками. Щодо стійкості деревини при експлуатації у середовищі, яке має організми, що руйнують її, то оброблення високими температурами показало покращення біологічної стійкості зразків.

Заведеною методикою Харінгтона були порівняні властивості деревини ясеня, обробленої за рівними режимами. Експертні оцінки властивостей деревини за шкалою бажаності були наступні:

- оброблення за температури $t_1 = 185,^{\circ}\text{C}$ коефіцієнт бажаності становив $D = 0,76$;
- оброблення за температури $t_1 = 190,^{\circ}\text{C}$ коефіцієнт бажаності становив $D = 0,77$;
- оброблення за температури $t_1 = 195,^{\circ}\text{C}$ коефіцієнт бажаності становив $D = 0,81$.

Кращий результат отримали властивості деревини обробленої за температури 195°C . Це викликано потраплянням таких показників як щільність, рівноважна вологість, біологічна стійкість в область бажаності «відмінно», що вказує на можливість використання такої деревини у виробі, що експлуатуються просто неба. Слід зазначити, що це не стосується інженерних виробів, оскільки межа міцності на згин знизилась на 20% порівняно із контрольними зразками. Відповідно для виготовлення виробів, що працюють під навантаженням, а саме садові меблі, альтанки тощо слід використовувати режими з оцінкою «добре», оскільки зниження міцності при їх застосуванні становить 6% і 12%.

Список посилань

1. Babych, Y.; Puzrina, N., 2025: Causes and trends in pathological damage to common ash. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 21 (6): 79–92. <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi/6.2025.79>
2. Candelier, K.; Dibdiakova, J., 2020: A review on life cycle assessments of thermally modified wood. Holzforschung, 74(6): 1-26. <https://doi:10.1515/hf-2020-0102>
3. Harrington, E.C., 1965: The desirable function. Industrial Quality Control, 21 (10): 494–498.

УДК 614.842

Касянчук І.О., аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування, м. Київ,
ivankasianhuk@ukr.net

Цапко Ю.В., докт. техн. наук, професор

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ВПЛИВ В'ЯЖУЧОГО МАТЕРІАЛУ НА ПОГЛИНАННЯ ВОДИ ДЕРЕВО ПОЛІМЕРНИМ КОМПОЗИТОМ

Основним матеріалом для виробництва теплової ізоляції з деревини є її відходи, зокрема тирса, що має низьку ціну і екологічність, якій притаманні низька щільність та теплопровідність [1, 2]. Окрім того для деревини притаманні і негативні властивості, такі як здатність до гниття, що може виникнути через зволоження або неефективну вентиляцію.

Застосування в'язучих речовин на основі полімерних смол при виготовленні теплоізоляції з тирси деревини підвищує екологічну безпечність, атмосферостійкість виробів, оскільки такі смоли характеризуються стійкістю до води та перепаду температур, а також знижують процес утворення мікроорганізмів в структурі виробу, оскільки виріб, що утеплює споруду, стає більш міцним і твердим, а також є довговічним з часом.

У зв'язку з цим постає необхідність визначення властивостей виробів з деревної тирси та сухих сумішей синтетичних смол до поглинання води, що і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Для дослідження водопоглинання дерево полімерним композитом з тирси деревини формували зразки, зокрема, на водорозчинних полімерних речовинах шляхом їх змішування з тирсою у різних пропорціях (табл. 1), а також на сухих сумішах поліефірних і епоксидних смол шляхом їх змішування з тирсою у пропорції 1:2.

Таблиця 1 – Компоненти при формуванні зразків дерево полімерних композитів на водорозчинних полімерних речовинах

Тирса + клей ПВА D4+вода, г		
Стружка	Клей	Вода
60,23	107,73	100
60,38	120,95	100
60,72	134,74	100
Тирса + крохмаль + вода, г		
Стружка	Крохмаль	Вода
60,57	144,3	240

З отриманої сумішей формували напівциліндри розмірами 120х40х24 мм та які на водній основі сушили у сухоповітряному середовищі, а на основі сухих сумішах смол спікали за температури 200 °С протягом 20 хв. та розрізали на сегменти (рис. 1).



Рис. 1 – Зразки виробів для досліджень

Визначення кількості поглинання води зразками дерево полімерним композитом проводили за робочою методикою, суть якої полягала у експериментальному визначенні кількості поглинутої води зразком при його експозиції у воді.

Дослідження з визначення стійкості до водопоглинання дерево полімерним композитом наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Водопоглинання зразків дерево полімерних композитів після експозиції води

Номер зразка	Вага до занурення у воду, г	Вага зразка через 2 години, г
Виріб з тирси і крохмалю		
1	53,14	Дослідження не пройшли, зруйнувалися
2	69,48	
3	65,41	
Виріб з тирси і клею ПВА		
1	35,75	60,80
2	34,50	65,50
3	40,48	71,92
Виріб з тирси і поліефірної смоли		
1	60,32	83,79
2	55,40	71,47
3	51,58	79,76
Виріб з тирси і епоксидної смоли		
1	64,76	89,99
2	56,40	84,45
3	53,94	75,73

У результаті визначення величини водопоглинання зразків встановлено, що зразок дерево полімерного композиту сформованого на крохмалі зруйнувався у ході проведення випробувань, зразки дерево полімерного композиту виготовлені на клею ПВА набрали понад 60 % води, а зразки сформовані на сухих сумішах поліефірних і епоксидних смол набрали близько 35 %.

З експериментальних досліджень встановлено, що найбільше вологопоглинання після 50 діб експозиції зафіксовано для дерево полімерного композиту виготовленого на крохмалі, що складає понад 5 г, для дерево полімерного композиту виготовленого на клею ПВА понад 3 г та для дерево полімерного композиту виготовленого на синтетичних смолах менше 2,5 г. При цьому зафіксовано процес збільшення лінійних розмірів та об'єму через поглинання води з навколишнього середовища. Особливо це характерне для дерево полімерних композитів, які виготовлено на основі водорозчинних полімерів, для яких зафіксовано збільшення розмірів понад 8% для крохмалю та 6% для клею ПВА. Натомість для дерево полімерних композитів сформованих на основі синтетичних смол це значення не перевищує 3%. Результати дослідження можуть бути використані при застосуванні екологічно безпечних заходів з теплоізолювання модульних будівель виготовлених із sip-панелей для об'єктів різного призначення.

Список посилань

1. Tsapko Yu., Horbachova O., Mazurchuk S., Bondarenko O. Study of resistance of thermomodified wood to the influence of natural conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1164, 012080. doi:10.1088/1757-899X/1164/1/012080.
2. Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Каверин К.О. Особливості процесу водопоглинання термічномодифікованої деревини. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2025. №47. С. 533-540. <https://budres.org/index.php/budres/article/view/741/739>.

УДК 684.59.674.667.636

Яремчук Л.А. докт. техн. наук, професор
Кропотов А.В., аспірант

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, larysa.yaremchuk@gmail.com

ЗМІНА ШОРСТКОСТІ ЗАБАРВЛЕНОЇ ДЕРЕВИНИ БУКА

Поверхнєве забарвлення знайшло застосування в меблевому виробництві. В результаті поверхнєвого забарвлення підкреслюється текстура, притаманна саме цій деревині, імітуються цінні декоративні породи, підсилюється тон забарвлення. В даний час більшого застосування набули підфарбовані лакофарбові матеріали [1] та барвники, розчинні в органічних розчинниках. Їх застосування дозволяє уникнути підняття ворсу, яке відбувається при використанні водяних розчинів барвників [2]. Для поверхнєвого забарвлення деревини, в більшості, використовують кислотні, лужні, прямі барвники або протрави (водні розчини солей металів). Крім протрав барвники розчиняють у воді, або в органічних розчинниках.

Метою даного дослідження було порівняння зміни шорсткості меблевих заготовок із деревини бука, після забарвлення водорозчинним, спирторозчинним, органорозчинним барвниками, протравою (5% р-н. Fe_2SO_4 у воді) та поронбейц (забарвлена ґрунтівка).

Для дослідження підготували зразки деревини бука 200x100 мм, з початковою шорсткістю $R_z \max \leq 16$, відносною вологістю W_b 12%; 4% розчини барвників у воді та у органічному розчиннику. Для дослідження розчини барвників наносились за допомогою пензлів на підготовлені зразки деревини бука з витратою розчину барвників 40 г/м². Сушіння забарвлених зразків деревини бука проводилось в сушильній шафі при температурі 60 °С. Вимірювання шорсткості визначали за допомогою інструментального мікроскопа МИС-11. Дані досліджень занесені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Зміна шорсткості деревної підкладки бука після забарвлення

Водорозчинний барвник, кислотний	Спирторозчинний барвник, кислотний	Органорозчинний барвник, кислотний	Протрава - 5% р-н Fe ₂ SO ₄ у воді	Забарвлена ґрунтівка - поронбейц					
Шорсткість поверхні зразка деревини бука початкова і після забарвлення, Rz max									
Початк	Кінцев	Почат	Кінцев.	Початк.	Кінцев.	Початк.	Кінцев.	Початк.	Кінцев.
16 мкм	48 мкм	16 мкм	33 мкм	16 мкм	31 мкм	16 мкм	49 мкм	16 мкм	23 мкм

Одержані дані зміни шорсткості поверхні підкладки із деревини бука після фарбування різними видами забарвлюючих речовин показали, що після нанесення водорозчинного барвника і протрави шорсткість поверхні суттєво збільшується, практично втриє. Спирторозчинний та органорозчинний барвники значно менше піднімають шорсткість деревини, а найкращий результат показала кольорова ґрунтівка (поронбейц).

Список посилань

1. Hu, J., Liu, Y., and Wu, Z. (2020). "Structural color for wood coloring: A Review," *Bio resources*, 15(4), 9917-9934.
2. Budak, M., Korkmaz, M., and Karal, I. (2023). "Antifungal effects of staining process on wood: Hardness, gloss, and color change," *Bio Resources* 18(1), 302-316.

УДК 694.621:674.05-529:694.2

Барабаш Р.Г., аспірант

Миськів Є.М., канд. техн. наук, ст.викладач

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, barabash.r@nltu.lviv.ua

ВПРОВАДЖЕННЯ ШПОНКОВИХ ПАЗІВ НА ЕТАПІ РОЗКРОЮ НА НЕСТІНГОВИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПК ДЛЯ З'ЄДНАНЬ ДЕТАЛЕЙ ДВЕРНИХ КАРКАСІВ

Поєднання елементів дверного каркасу на циліндричні шканти на етапі збирання потребує свердління в торець на етапі виготовлення деталей [1]. Це потребує додаткового обладнання, часу на виготовлення в умовах використання технологічного процесу з окремими операціями розкрою плитного матеріалу та свердління. Додаткове обладнання збільшує собівартість дверного полотна в умовах індивідуального виготовлення чи дрібносерійного виробництва. Використання методу поєднання заготовок з допомогою прямокутних шпонок надає можливість ще на етапі розкрою листа на нестінговому верстаті з ЧПК фрезерувати шпонкові пази. Впровадження передових технологій заощаджує ресурси та знижує собівартість продукції [2].

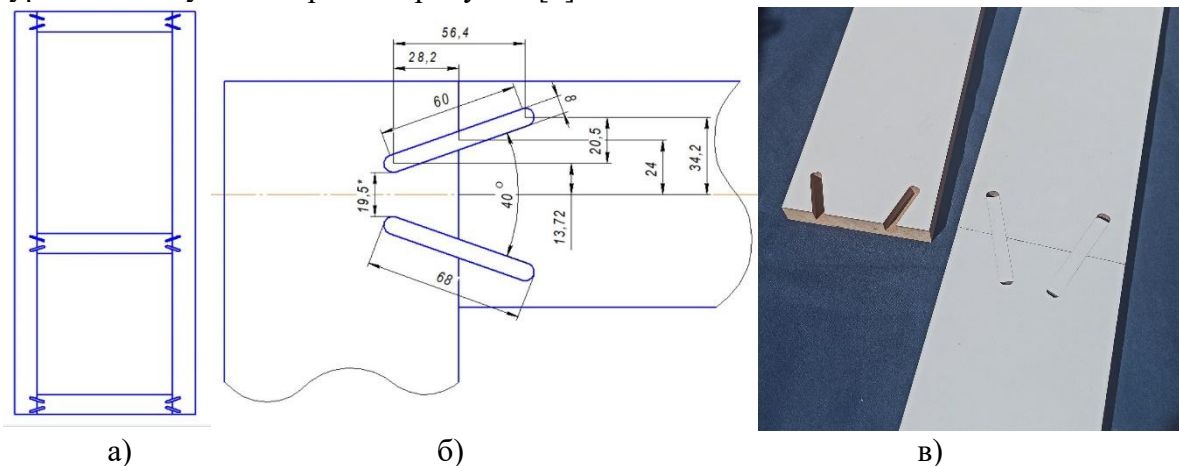


Рис. 1 – Схема використання а) ескіз б) виготовлені деталі в) зі шпонковим з'єднаннями

Перевагами такого з'єднання є збереження високої точності при складанні рамкових конструкцій з МДФ, заощадження часу через відсутність переміщення заготовок між обладнанням, заощадження виробничого часу за рахунок одного базування листа матеріалу на нестінговому верстаті з ЧПК [3]. Розроблений метод шпонкового з'єднання підтвердив ресурсоощадність впровадження технології виготовлення каркасів щитових дверей з використанням нестінгових верстатів з ЧПК.

Список посилань

1. Прокопович Б.В. Основи проектування столярно-меблевих виробництв. Навч. посібник. – К.: ІЗІН Міністерства освіти України, 1993. – 303 с.
2. Azemi, Fatmir, et al. "The use of advanced manufacturing technology to reduce product cost." *Acta Polytechnica Hungarica* 16.7 (2019): 115-131.
3. BASTOS, Felipe. Nesting and Industry 4.0: Algorithmic Optimization and National Impact in US Digital Furniture Manufacturing. *Available at SSRN 6581798*, 2026.

УДК 674.049

Віт В.В., аспірант
Савчак О.В., аспірант

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, vladyslav.vit@nltu.lviv.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОГО МОДИФІКУВАННЯ ДЕРЕВИНИ

На світовому ринку спостерігається тренд на довговічну та екологічно безпечну деревину. Термічне модифікування дозволяє досягти стабільності розмірів матеріалу без використання токсичних хімічних методів. Однак різні методи модифікування мають свої переваги та недоліки які суттєво впливають на енергоємність виробництва та механічні властивості кінцевого продукту

Мета роботи: провести порівняльний аналіз провідних європейських промислових технологій термічного оброблення деревини за параметрами теплоносія, робочого тиску та особливостями впливу на клітинну стінку.

Виклад основного матеріалу. Процес термічного модифікування відбувається у температурному діапазоні 160 – 240 °С. Головним завданням є підведення тепла до деревини за умови обмеження доступу кисню для запобігання займання. Серед європейських промислових розробок виділяються чотири принципово різні концепції [1]:

Технологія ThermoWood - найвідоміший комерційний процес. Здійснюється у камерах конвективного типу за атмосферного тиску. Як захисне середовище та теплоносієм використовується перегріта водяна пара [2]. Пара знижує вміст кисню до рівня <3% і діє як каталізатор хімічних реакцій (гідролізу геміцелюлоз) [2]. Недоліком є високі енергозатрати на постійну генерацію пари [1].

Технологія PLATO - Двостадійний процес, що базується на гідротермолізі. Спочатку волога деревина нагрівається у закритих автоклавах під підвищеним тиском (водне середовище). На другому етапі відбувається сухе затвердіння (поліконденсація лігніну). Технологія дозволяє мінімізувати втрату міцності матеріалу [2].

Технологія Retification - обробка деревини (вологість ~12%) здійснюється в герметичних камерах в атмосфері азоту. Вміст кисню знижується до рівня менше 2% [2]. Відсутність водяної пари робить процес безпечним і дозволяє отримати матеріал рівномірних темних відтінків, проте вартість чистого азоту та нагрівання підвищують ціну продукції [1].

Технологія Termovuoto - використовує вакуумні камери. Повітря і кисень відкачуються помпами, що створює захисне середовище. Вакуум забезпечує надзвичайно швидке видалення летких речовин (оцтової кислоти та фурфуролу) і підвищує загальну

енергоефективність процесу [1, 2].

Порівняння методів модифікації деревини подано в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика промислових процесів ТМД

Технологія	Середовище	Робочий тиск	Основна перевага	Основний недолік
ThermoWood	Перегріта пара	Атмосферний	Масове поширення, стандартизація	Високі енергозатрати на генерацію пари
PLATO	Вода / Повітря	Підвищений / Атмосферний	Найменша втрата міцності	Складність процесу, дороге обладнання
Retification	Азот	Атмосферний	Висока рівномірність кольору	Висока вартість чистого азоту
Termovuoto	Вакуум	Знижений	Висока енергоефективність	Складність герметизації камер

Навіть при використанні різних агентів обробки (пара, азот, вакуум), загальним наслідком впливу високих температур є деструкція аморфних ділянок целюлози, розпад геміцелюлоз та зшивання лігніну [2]. Це призводить до підвищення стійкості до базидіоміцетів, але водночас робить деревину більш крихкою [1, 2].

Висновки. Аналіз існуючих промислових процесів показує, що кожна з технологій є компромісом між капітальними витратами, енергоємністю та механічними властивостями продукту. Подальший розвиток галузі, згідно з концепціями сталого розвитку, вимагає пошуку нових, дешевших та більш екологічних теплоносіїв, які зможуть забезпечити високу якість ТМД при зниженні енерговитрат.

Список посилань

1. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. Wood modification technologies – a review. *iForest- Biogeosciences and Forestry*. 2017. Vol. 10. P. 895-908.
2. Андрашек Й.В. Аналіз зміни механічних властивостей термічно модифікованої деревини клена (*Acer pseudoplatanus* L.) та ялини звичайної (*Picea abies* K.) шляхом дослідження її пористої структури / Андрашек Й.В., Щупаківський Р.Б. // Науковий вісник НЛТУ: зб. наук. - техн. праць. – Львів : НЛТУ. – 2012. – Вип. 22.01. – С. 97-100.
3. Sandberg D., Kutnar A. *Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation*. CRC Press, 2021. 442 p.
4. Губер Ю.М. Експериментальні дослідження зміни фізико-механічних властивостей деревини в процесі вакуумно-кондуктивного термічного оброблення / Губер Ю.М., Гуменюк Ж.Я. // Науковий вісник НЛТУ: зб. наук. - техн. праць. – Львів : НЛТУ. – 2010. – Вип. 20.2. – С. 92-99.
5. Bekhta P. Effect of temperature on color and strength of spruce wood / Bekhta P., Niemz P. // *Holzforschung* 57, 2003. – P. 539–546.
6. Hill CAS Wood modification. Chemical, thermal and other processes. Wiley, New York, 2006.
7. Maksymiv V.M. Thermally modified wood: technologies, trends and prospects / Maksymiv V.M., Andrashek J. V., Shchupakivsky R.B. // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. Collection of scientific and technical works*. – Lviv: NUFWT of Ukraine. – 2010, pub. 36. – P. 45-48.

УДК 674.049

Віт В.В., аспірант

Щупаківський Я.Б., аспірант

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, vladyslav.vit@nltu.lviv.ua

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ТЕПЛОНОСІЯ В УСТАНОВКАХ ТЕРМОМОДИФІКАЦІЇ

Термічне модифікування деревини набуває все більшого поширення як спосіб підвищення довговічності та біологічної стійкості деревини без застосування хімічних реагентів. Основна проблема існуючих промислових установок – висока енергоємність процесу, яка значно збільшує собівартість продукції. Тому пошук альтернативних, більш економічних джерел тепlopостачання є актуальним завданням сьогодення.

Мета роботи: порівняти існуючі технології для термомодифікації деревини та оцінити доцільність використання теплоти димових газів від спалювання деревних відходів як джерела нагріву термокамери.

Виклад основного матеріалу. Найпоширенішими середовищами для термомодифікації є перегріта водяна пара та азот. Обидва методи потребують значних витрат енергії. Це робить готову продукцію дорогою. Також до мінусів цих технологій слід віднести вартісне та технічно складне обладнання. Багато малих підприємств не можуть собі дозволити значні капіталовкладення на обладнання, що змушує їх здійснювати пошук більш рентабельних та технологічно простих способів модифікування.

Як альтернативною може бути технологія, що використовує димові гази для термічного модифікування деревини. Ідея цього підходу полягає у використанні теплоти димових газів, що утворюються при спалюванні деревних відходів в спалювачі. Димові гази не потрапляють всередину камери, лише нагрівають повітря в середині, яке і є безпосереднім середовищем термообробки. Після цього гази відводяться назовні. Таким чином, тепло, яке інакше просто розсіювалось би в атмосферу, використовується з практичною користю.

Одним із головних аргументів на користь запропонованого підходу є його економічна доцільність. Деревообробні підприємства в процесі роботи утворюють значну кількість відходів таких як тирса, кора, кускові відходи тощо. Вони найчастіше просто спалюються або викидаються. Використання цього палива для нагріву термокамери дозволяє значно скоротити витрати порівняно з установками на електричному нагріванні чи з використанням термомасляних котлів. Таким чином, підприємство одночасно вирішує два завдання: утилізує відходи та знижує собівартість термодеревини.

Разом з тим, такий підхід має свої технічні обмеження. Так як камера наповнена звичайним атмосферним повітрям, а не безкисневим середовищем - необхідно контролювати температурний режим. Температура всередині камери має бути не вище ніж допустимо тобто така за якої розкладається геміцелюлоза та розм'якшується лігнін. При перегріві понад допустиму межу існує ризик займання матеріалу.

Висновки. Використання теплоти димових газів від спалювання деревних відходів є перспективним рішенням для зниження енергетичних витрат при термомодифікації деревини. Такий підхід відповідає принципам раціонального використання ресурсів і може бути особливо корисним для малих та середніх підприємств.

Список посилань

1. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. Wood modification technologies – a review. iForest- Biogeosciences and Forestry. 2017. Vol. 10. P. 895-908.
2. Militz H. Thermal treatment of wood: European processes and their background. International Research Group on Wood Preservation, Doc. No. IRG/WP 2002, 02 – 40241.

3. Sandberg D., Kutnar A. Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation. CRC Press, 2021. 442 p.
4. Esteves, B., & Pereira, H. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, 4(1), 370–404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.
5. Pfriem A. Alteration of the pore structure of spruce (*Picea abies* (L) Karst) and maple (*Acer pseudoplatanus* L) due to thermal treatment as determined by helium pycnometry and mercury intrusion porosimetr / Pfriem A., Zauer M., Wagenführ A. // *Holzforschung*. 63, 2009. – P. 94–98.
6. Shchupakivskyy R. – NUFWT of Ukraine. Features of thermally modified wood in the environment of carbon dioxide // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. Collection of scientific and technical works. – Lviv: NUFWT of Ukraine. – 2011, pub. 37.1 – P. 175-178
7. Shchupakivskyy R. Anwendung der Hochfrequenz-Dichtemessung zur Erfassung der lokalen Dichteänderung von Eichenholz infolge einer thermischen Modifikation / Pfriem A., Shchupakivskyy R., Clauder L., Linke N., // *Holztechnologie* 54(3), 2013. – P. 11-14.
8. Viikari Ala-Jukka, Mayes Duncan. New generation ThermoWood® - How to take Thermowood to the next level. (In: European Conference on Wood Modification 2009).

УДК 674.07

Буйських Н.В., канд. техн. наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, nataby@meta.ua

ДО ПИТАННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОЛІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ДЕРЕВИНІ

Деревина є одним із найбільш поширених конструкційних та оздоблювальних матеріалів, який широко використовують у меблевому виробництві, будівництві та виготовленні елементів інтер'єру. Проте вона є органічним матеріалом, чутливим до впливу навколишнього середовища. Для захисту деревини застосовують різноманітні лакофарбові матеріали, серед яких важливе місце займають олії на натуральній основі. На відміну від традиційних плівкоутворювальних покриттів, олії забезпечують «дихання» деревини, не виділяють шкідливих летких речовин та зберігають природний вигляд поверхні. Дослідження проводили на зразках деревини ялини та ясена. Для стабілізації властивостей деревину витримували протягом трьох місяців під навісом у природних умовах, після чого висушували до вологості 8–9 %. Як захисний склад використовували олію на основі лляної олії відомої торговельної марки. Олію на зразки наносили в один та два шари за різних температур: 20, 40 та 60 °C. Після нанесення покриття зразки сушили в атмосферних умовах протягом 12 годин. Метою дослідження було встановлення впливу породи деревини та параметрів нанесення олійного покриття на глибину проникнення захисного складу, а також на водостійкість і твердість сформованого покриття. Глибину проникнення визначали методом розколювання, водостійкість покриття визначали шляхом витримання зразків на меніску дистильованої води протягом 24 годин із подальшим зважуванням та візуальним оглядом поверхні. Зважування проводили на електронних вагах AXIS 500. Твердість покриття визначали за Shore HD із використанням твердоміра Novotest ТШ-Ц відповідно до вимог стандартів DIN 53505 та ISO R868. Вимірювання проводили у ранній та пізній зонах річного кільця не менше 30 разів для кожного зразка. Результати досліджень показали, що глибина проникнення олії суттєво залежить від породи деревини, температури олії та кількості нанесених шарів. Для деревини ялини показники проникнення були вищими, ніж для ясена, що пояснюється меншою щільністю та більшою пористістю ялини. Встановлено, що при підвищенні температури олії до 60 °C проникнення захисного складу збільшувалося майже вдвічі порівняно з нанесенням олії кімнатної температури. При дворазовому нанесенні формувався більш товстий захисний шар, а також збільшувалася глибина просочення деревини. Максимальна глибина проникнення була

отримана для ялини при нанесенні олії температурою 60 °С у два шари. Результати випробувань на водостійкість показали високу ефективність олійного покриття. Після 24-годинного контакту з водою зміна маси зразків була незначною та становила від 0 до 0,30 %. Візуальний огляд не виявив розтріскування, відшарування чи інших дефектів покриття. Найкращі показники водостійкості були отримані при дворазовому нанесенні олії. Дослідження твердості показали, що нанесення олійного покриття лише незначною мірою впливає на твердість поверхні. Підвищення твердості становило близько 2 %. При цьому спостерігався значний коефіцієнт варіації результатів, що пояснюється неоднорідною будовою деревини та різницею між ранньою і пізньою деревиною річних шарів. У результаті проведених досліджень встановлено, що технологічні параметри нанесення олії суттєво впливають на захисні властивості покриття. Підвищення температури олії до 60 °С та дворазове нанесення забезпечують найбільшу глибину проникнення у структуру деревини. Олія краще проникає у деревину ялини порівняно з ясенем. Покриття характеризувалися високою водостійкістю, а після дворазового нанесення практично не пропускали вологу. Вплив олійного покриття на твердість поверхні є незначним, однак нанесення олії сприяє формуванню стабільного захисного шару та підвищує довговічність деревини в умовах атмосферної експлуатації.

УДК 674.815:621.979

Ортинська Г.Є., канд. техн. наук, доцент
Лютий П.В., канд. техн. наук
Петлюк І.Г., магістр

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, ortynska_g@nltu.edu.ua

ТЕКСТИЛЬНІ ВІДХОДИ У ВИГОТОВЛЕННІ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ПЛОСКОГО СПОСОБУ ПРЕСУВАННЯ

Розвиток ринку технологій і послуг у сфері управління текстильними відходами зумовлений зростанням уваги суспільства до питань екологічної стійкості. У наукових дослідженнях дедалі більше уваги приділяється проблемі утворення текстильних відходів та їх негативного впливу на навколишнє середовище [1]. Саме це сприяє розробці нових екологічно чистих методів управління текстильними відходами, зокрема у залученні відходів текстильного виробництва у виробництві деревинних композиційних матеріалів [2]. Аналіз результатів попередніх досліджень свідчить про можливість ефективного використання текстильних відходів як компонента для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ) плоским способом пресування.

Метою роботи було дослідження можливості застосування текстильних відходів у ДПМ плоского способу пресування.

Матеріали дослідження: подрібнені відходи термозбіжної поліетиленової плівки (ВПЕ); подрібнені обгортки з-під цукерок; деревинна стружка; відходи текстильного виробництва. Параметри пресування ДПМ: температура – 180 °С; тиск – 3,5 МПа; тривалість – 1,0 хв/мм. Було розроблено 6 рецептур із варіюванням вмісту деревинних частинок (ДЧ) від 50% до 30% та текстильних відходів (ТВ) від 10% до 30%. Вміст ВПЕ або обгортки з-під цукерок складав 40% по масі.

Дослідження впливу складу деревинно-полімерної композиції на межу міцності та модуль пружності під час статичного згинання виявило зі збільшенням частки ТВ та зменшенням ДЧ міцність суттєво зменшується (рис. 1,а) та рис. 1,б)). Для ДПМ на основі ВПЕ зниження склало 34,3%, а для ДПМ на основі обгортки – 66,9% (при переході від 10% до 30% ТВ). Жорсткість ДПМ критично знижується при збільшенні вмісту ТВ. Найнижчий модуль пружності під час статичного згинання зафіксовано у ДПМ на основі обгортки за 30% вмісту ТВ.

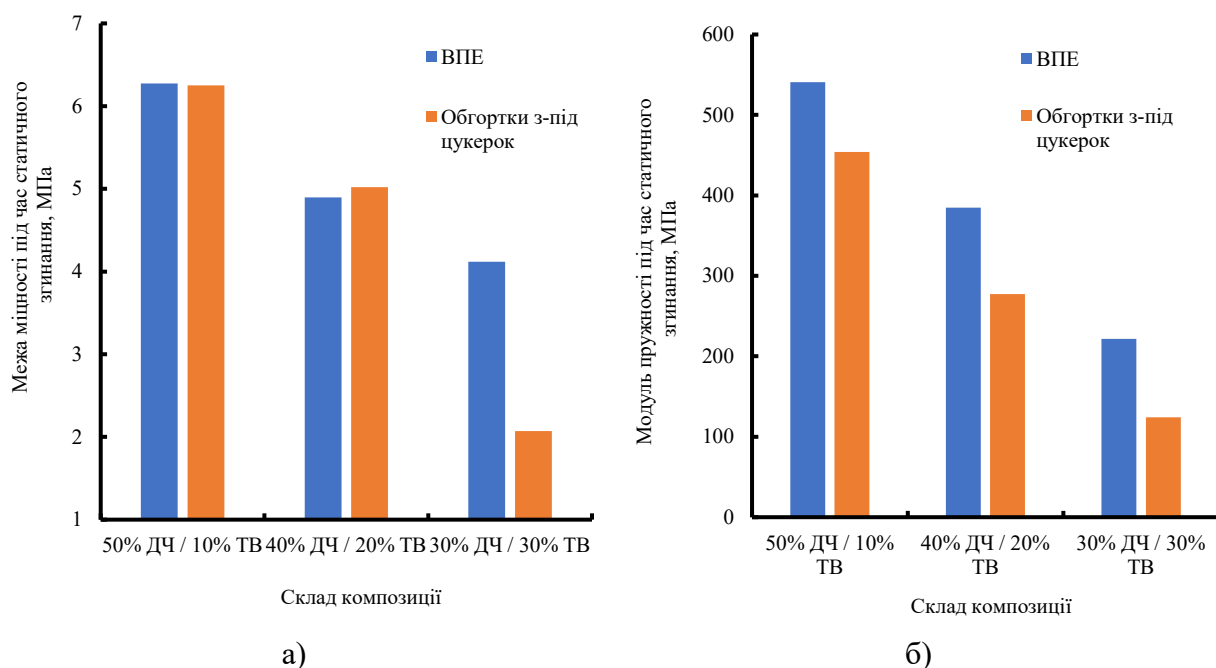


Рис. 1 – Вплив складу деревинно-полімерної композиції на механічні властивості ДПМ

Збільшення частки ТВ у деревинно-полімерній композиції призводить до зростання набрякання ДПМ за товщиною (рис. 2,а)). Для ДПМ на основі ВПЕ показник зростає на 28%, а на основі обгортки – на 86%. Окрім того, зменшення частки ДЧ і збільшення частки ТВ призводить до зниження щільності ДПМ незалежно від типу полімерної основи (рис. 2, б).

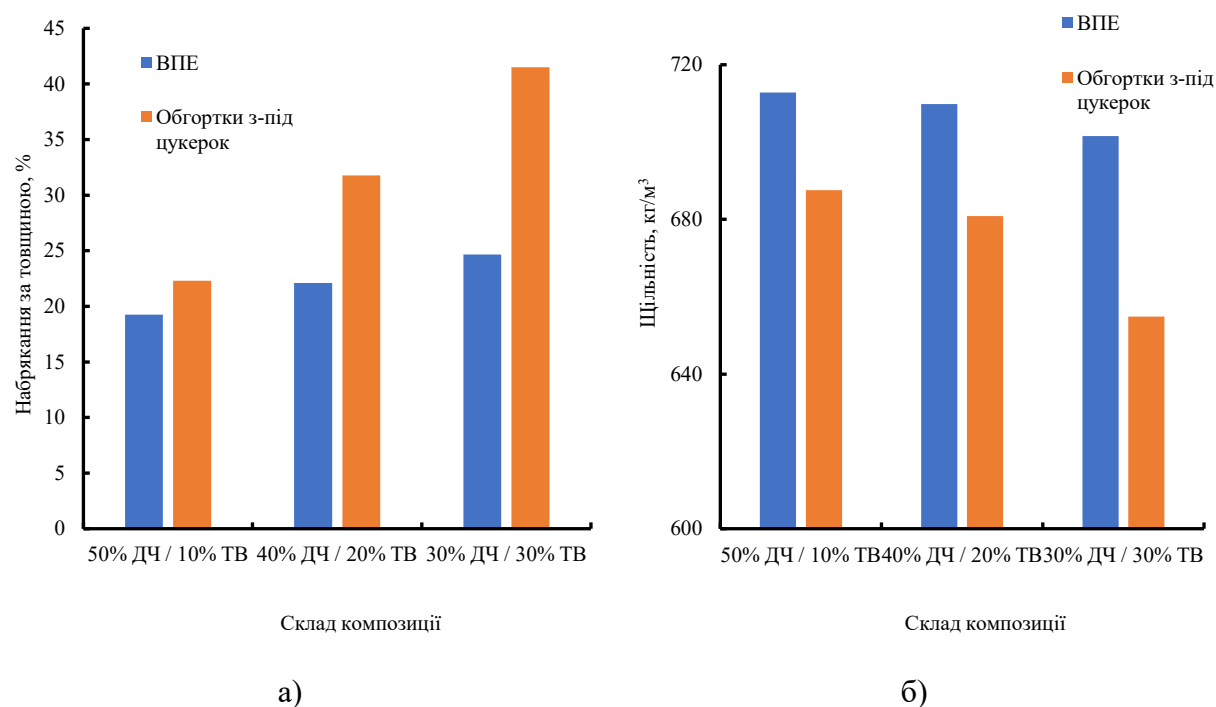


Рис. 2 – Вплив складу деревинно-полімерної композиції на фізичні властивості ДПМ

Висновок. Отже, використання відходів текстильного виробництва у складі деревинно-полімерних матеріалів, виготовлених методом плоского пресування, є перспективним напрямом їх утилізації та комплексного використання вторинних ресурсів. Подальші дослідження доцільно зосередити на встановленні раціонального співвідношення між

деревинними частинками, текстильними волокнами та полімерною матрицею з метою забезпечення оптимального поєднання фізико-механічних властивостей деревинно-полімерних матеріалів плоского способу пресування.

Список посилань

1. Awan A. R. Environmental Life Cycle Assessment of Recycled Coarse Aggregate and Textile Waste Fibers / A.R. Awan, M.H. Saif, F. Javed // Fusion Journal of Engineering and Sciences. 2026. DOI: doi.org/10.64615/fjes...2026.145
2. Бринь О. І. Можливість застосування відходів текстильних волокон у виробництві деревинних композиційних матеріалів / О. І. Бринь // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість. 2020. Вип. 46. С. 26–35. DOI: doi.org/10.36930/42204603

УДК 674.04

Мазурчук С.М., канд. техн. наук
Семенов І.К., здобувач

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,
mazurchuk@nubip.edu.ua

МЕХАНІЧНА ПОВЕДІНКА ГІБРИДНИХ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ М'ЯКИХ ТА ТВЕРДИХ ПОРІД ДЕРЕВИНИ

Сучасне меблеве виробництво та будівництво активно використовують клеєні конструкції з масиву деревини, що зумовлює підвищені вимоги до надійності та довговічності адгезійних з'єднань. Особливої актуальності набувають гібридні конструкції, у яких поєднуються хвойні (м'які) та твердолистяні породи деревини. Такий підхід дає змогу зменшити матеріалоемність виробів і раціонально розподіляти навантаження між шарами з різною щільністю. Разом із тим комбінування різних порід формує складний напружено-деформований стан у зоні клейового шару внаслідок відмінностей у щільності, анізотропії та деформаційних характеристиках деревини. Важливим чинником є також тип адгезиву. Полівінілацетатні клеї забезпечують високу жорсткість з'єднання, тоді як поліуретанові системи характеризуються підвищеною еластичністю та здатністю до дисипації енергії [1].

Для проведення досліджень виготовлено чотири групи комбінованих зразків із сосни звичайної (*Pinus sylvestris*), дуба звичайного (*Quercus robur*) та клена гостролистого (*Acer platanoides*). Склеювання здійснювали клеями класів PUR D4 та ПВА D3. Зразки виготовляли відповідно до вимог ISO 13061-3:2014 [2].

У роботі досліджено механічну поведінку гібридних клейових з'єднань. Проведено серію випробувань на статичний триточковий згин для чотирьох груп комбінованих зразків (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристика дослідних зразків

Група зразків	Порода деревини		Вид клею
	1-ий шар	2-ий шар	
1	Сосна звичайна	Дуб звичайний	PUR, D4
2	Сосна звичайна	Клен гостролистий	PUR, D4
3	Сосна звичайна	Клен гостролистий	ПВА, D3
4	Дуб звичайний	Клен гостролистий	ПВА, D3

Визначено межу міцності при згині, модуль пружності, питому міцність та характер руйнування залежно від напрямку прикладення навантаження відносно клейового шва (рис. 1).

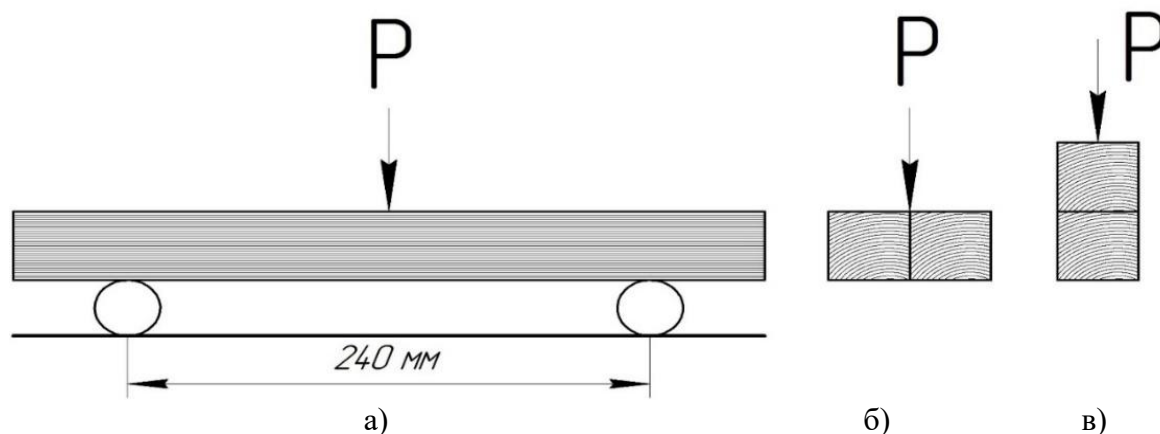


Рис. 1 – Схема випробування на статичний триточковий згин: а) загальна схема; б) навантаження паралельно клейовому шву ($\parallel$); в) навантаження перпендикулярно до клейового шва ($\perp$)

Відповідно до результатів дослідження (табл. 2), найвищу межу міцності при статичному триточковому згині отримано для зразків групи 4 на основі ПВА-клею – 10,6 МПа при перпендикулярному навантаженні. Водночас ця система виявилася найбільш чутливою до зміни напрямку навантаження: при паралельному прикладанні сили міцність знизилася до 5,92 МПа.

Таблиця 2 – Результати визначення межі міцності при статичному згині

Спосіб навантаження	Група зразків	Максимальне навантаження $P_{\max}$, Н	Межа міцності σ_{zg} , МПа	Переміщення f , мм	Модуль пружності E , МПа	Питома міцність, Н·м/кг
$\perp$	1	6370	7,96	11,8	1448	0,013
	2	6202	7,75	10,2	1634	0,012
	3	5372	6,72	13,2	1099	0,011
	4	8500	10,6	11,5	1996	0,015
$\parallel$	1	5898	7,37	12,2	5222	0,012
	2	6246	7,81	13,4	5016	0,012
	3	4840	6,62	12,1	4311	0,010
	4	4737	5,92	10,1	5053	0,008

Зразки на основі PUR-клею продемонстрували значно стабільніші результати. Для групи 2 різниця між показниками міцності при перпендикулярному та паралельному навантаженні становила близько 0,75 %. Це свідчить про здатність еластичного поліуретанового шва компенсувати різницю у модулях пружності між м'якою та твердою породами деревини. Крім того, встановлено, що PUR-з'єднання характеризуються підвищеною енергоємністю руйнування. Максимальне значення роботи руйнування досягло 93,3 Дж, що майже у 2,7 раза перевищує показники групи з мінімальним значенням цього параметра. Діаграми деформування PUR-систем мали виражений в'язко-пластичний характер із поступовим зниженням навантаження після досягнення максимального значення.

ПВА-з'єднання, навпаки, демонстрували крихкий характер руйнування: після досягнення максимальної сили відбувалося різке падіння навантаження практично до нуля, що свідчить про низьку здатність клеєвого шару до релаксації напружень. Візуальний аналіз зон руйнування показав, що у більшості випадків сосна виконувала роль найменш жорсткого компонента системи, зазнаючи поперечного зминання річних шарів. Це

підтверджує можливість її використання як демпфувального шару у комбінованих конструкціях.

Результати досліджень підтвердили визначальний вплив типу адгезиву та напрямку навантаження на механічну поведінку гібридних клейових з'єднань деревини. ПВА-клеї забезпечують високу статичну міцність і жорсткість, однак характеризуються крихким руйнуванням і значною анізотропією показників при зміні напрямку навантаження. PUR-клеї демонструють стабільність механічних характеристик, високу роботу руйнування та здатність конструкції зберігати залишкову несучу здатність після утворення тріщин, що робить їх перспективними для елементів, які працюють в умовах змінних або динамічних навантажень. Крім того, встановлено доцільність використання сосни у зонах знижених напружень як демпфувального елемента, що дозволяє зменшити масу виробів без істотного зниження їхньої несучої здатності. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні меблевих і конструкційних елементів із комбінованої деревини.

Список посилань

1. O. Horbachova, S. Mazurchuk, N. Buislykh, V. Lomaha and A. Matviichuk. Effect of the operating environment conditions of wood composites on the adhesive joint strength. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science* 4 (2024): 57–69.

2. ISO 13061-3:2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens Part 3: Determination of ultimate strength in static bending.

УДК 674.047:519.876.5:681.5

Курка Р.Р., аспірант

Поберейко Б.П., докт. техн. наук, професор

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, roman.kurka@nltu.edu.ua

РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ ПОЛІВ НАПРУЖЕНЬ У ВИСУШУВАНИХ ПИЛОМАТЕРІАЛАХ НА БАЗІ ПРОМИСЛОВОГО ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА

Розвиток напружень у висушуваних пиломатеріалах є складним нестационарним процесом, зумовленим нерівномірним вологоперенесенням, температурним впливом, анізотропією деревини, усадкою та релаксацією внутрішніх напружень [1,2]. У стандартних системах автоматичного керування сушінням основними контрольованими параметрами залишаються температура, відносна вологість, швидкість циркуляції агента сушіння, температура та вологість деревини. Такі параметри характеризують зовнішні умови процесу, однак не дають прямої інформації про поточний напружений стан пиломатеріалів, який зумовлює утворення тріщин, внутрішніх розривів і залишкових деформацій. Тому актуальним є включення математичної моделі розвитку напружень до структури промислової автоматизованої системи керування сушильною камерою.

Реалізацію моделі [3] виконано на базі промислової платформи Unitronics UniStream USP-104-B10 із відповідним процесорним модулем. Особливість цієї платформи полягає в поєднанні функцій програмованого логічного контролера, людино-машинного інтерфейсу, засобів промислового обміну даними та програмного середовища UniLogic. Це дає змогу не тільки виконувати стандартні функції керування виконавчими механізмами, а й інтегрувати в програму контролера розрахункові процедури оцінювання внутрішнього стану матеріалу.

Математичною основою цифрової моделі є апарат гіллястих ланцюгових дробів [4], який використовується для апроксимації залежностей, що описують зміну напруженого стану в характерних зонах перерізу пиломатеріалу. Це дає змогу подати складну нелінійну поведінку системи у вигляді рекурентної обчислювальної структури. Модель враховує, що під час сушіння поверхневі шари деревини швидше втрачають вологу, раніше переходять у

зону усадки та формують напруження, тоді як внутрішні шари зберігають вищу вологість і деформуються із запізненням. Унаслідок цього в перерізі пиломатеріалу формується нерівномірне поле напружень, розвиток якого доцільно описувати не лише абсолютними значеннями, а й безрозмірними співвідношеннями між напруженнями в окремих контрольних зонах.

Обчислення моделі, побудованої на основі гіллястих ланцюгових дробів, потребує достатньо потужної ЕОМ, особливо на етапі числового експерименту, ідентифікації параметрів та перевірки збіжності апроксимацій. У промисловій системі керування алгоритм повинен бути адаптований до циклічної роботи ПЛК, обмеженого часу сканування програми та необхідності стабільної взаємодії з давачами, виконавчими механізмами й операторським інтерфейсом. Тому пряме перенесення дослідницької програми в контролер є недоцільним; ефективнішим є виділення обчислювального ядра моделі та його реалізація у вигляді окремих функціональних блоків користувача.

Платформа UniStream дає змогу перетворювати програмний код мовою С у користувацькі функціональні блоки UDFB, які надалі застосовуються в програмі контролера як звичайні елементи Ladder-коду. Це є важливою перевагою для реалізації цифрової моделі, оскільки складні математичні процедури можуть бути оформлені у вигляді окремих блоків із чітко визначеними входами та виходами та можливістю багаторівневого вкладення одного блока в інший.

У такій структурі С-код виконує роль математичного ядра, а Ladder-програма забезпечує технологічну логіку керування. Вона обробляє стани сушильної камери, сигнали давачів, аварійні умови, команди оператора та сигнали на виконавчі механізми. Якщо розрахунковий показник свідчить про інтенсивне зростання нерівномірності напружень, автоматичний алгоритм може зменшити жорсткість режиму сушіння, змінити температурне завдання, підвищити вологість агента сушіння або сформулювати попереджувальне повідомлення на НМІ. Цифрова модель не замінює базові контури регулювання температури й вологості, а доповнює їх розрахунковою оцінкою внутрішнього стану деревини.

Практична цінність запропонованого підходу полягає в тому, що складна модель, попередньо розроблена й перевірена на ЕОМ, може бути введена до промислового ПЛК без повного переписування алгоритму у вигляді дискретних ladder-стрічок. UDFB-блоки спрощують використання моделі, її налагодження, масштабування та включення до типових програм керування сушильними камерами. Для оператора така система може відображати не тільки стандартні параметри сушіння, а й розрахунковий розвиток напруженого стану, що підвищує інформативність керування та створює передумови для переходу від режимного керування до керування з урахуванням прогнозованого стану матеріалу.

Список посилань

1. Yin Q., Liu H.-H. Drying Stress and Strain of Wood: A Review. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 11. Article 5023. DOI: 10.3390/app11115023.
2. Tomad J., Leelatanon S., Jantawee S., Matan N. Internal Stress Development within Wood during Drying: Regime and Kinetics. *Drying Technology*. 2023. Vol. 41, No. 1. P. 77–88. DOI: 10.1080/07373937.2022.2084750.
3. Курка, Р. Р. (2025). Математичне моделювання розвитку полів напружень у висушуваних пиломатеріалах. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(6), 33–40. <https://doi.org/10.36930/40350604>
4. Antonova, T., Dmytryshyn, R., & Kurka, R. (2022). Approximation for the Ratios of the Confluent Hypergeometric Function $\Phi_D^{(N)}$ By the Branched Continued Fractions. *Axioms*, 11(9), 426. <https://doi.org/10.3390/axioms11090426>

УДК 674.02/.04

Горбачова О.Ю., канд. техн. наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,

gorbachova@nubip.edu.ua

КІНЕТИКА ЗМОЧУВАННЯ ТЕРМОМОДИФІКОВАНОГО ШПОНУ ДУБА: ПЕРВИННІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Хімічні трансформації деревини внаслідок термічного модифікування кардинально змінюють термодинамічні властивості й капілярну активність поверхні, тому виникає гостра потреба у вивченні кінетики її змочування для оптимізації процесів склеювання та оздоблення. Зокрема, дослідження умов експлуатації таких матеріалів та закономірностей зниження рівня їх біодеструкції після нанесення захисних покриттів детально розглянуто у працях [1] та [2]. У цьому контексті порівняльний аналіз контактних кутів і швидкості поглинання рідин різної полярності та в'язкості (води, олії, лаку й клею) дозволяє експертно оцінити ступінь гідрофобізації деревини (табл. 1) та науково обґрунтувати параметри її подальшого технологічного оброблення.

Таблиця – Кінетичні характеристики змочуваності поверхні

Поверхня	Рідина	Кут на 1-й сек, $\Theta 1''$, град	Кут на 30-й сек, $\Theta 30''$, град	Зміна кута $\Delta\Theta$	Коефіцієнт стабільності	Швидкість поглинання, град/с
Дуб необроблений	Вода	80	55	25	0,69	0,86
	Олія	35	30	5	0,88	0,17
	Лак	50	30	20	0,60	0,69
	Клей	105	100	5	0,95	0,17
Дуб термічно модифікований	Вода	110	105	5	0,96	0,17
	Олія	20	20	0	1,00	-
	Лак	60	40	20	0,67	0,69
	Клей	100	100	0	1,00	-

Встановлено, що при взаємодії з водою у необроблених зразків спостерігається активне поглинання (0,86 град/с), тоді як у модифікованих початковий контактний кут зростає до 110° , а швидкість поглинання падає до 0,17 град/с внаслідок деструкції геміцелюлоз. Навпаки, контакт з олією через підвищену ліпофільність поверхні стає миттєвим і стабільним (коефіцієнт стабільності 1,00), тоді як кінетика поглинання лаку для обох типів зразків залишається ідентичною. При випробуванні клею високі значення кутів (близько 100°) свідчать про його в'язкість, проте на модифікованому шпоні крапля абсолютно стабільна, що вказує на обмежене проникнення водних сумішей. З огляду на це, для забезпечення якісного склеювання та оздоблення технологічний процес має обов'язково передбачати попереднє шліфування шпону, використання поліуретанових (PUR) клейових систем замість водних, а також застосування лакофарбових матеріалів із додаванням змочувачів.

Список посилань

1. Horbachova O., Tsapko Y., Tsarenko Y., Mazurchuk S., Kasiyanchuk I. Justification of the wood polymer material application conditions / Journal of Engineering Sciences (Ukraine). – 2023. – Vol. 10(2). – pp. 49 – 55. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).c6
2. Tsapko Y., Horbachova O., Mazurchuk S., Tsapko A., Sokolenko K., Matviichuk A. Determining patterns in reducing the level of bio-destruction of thermally modified timber after applying protective coatings / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 5(10 (113)). – pp. 48 – 55. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242899

УДК 674.04:684

Ільків М.М., асистент

Губер Ю.М., канд. техн. наук

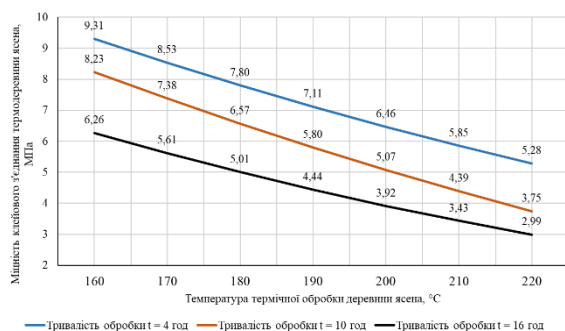
Національний лісотехнічний університет України, м.Львів, mykhailo.ilkev@nltu.edu.ua

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОГО МОДИФІКУВАННЯ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА НА МІЦНІСТЬ КЛЕЙОВОГО З'ЄДНАННЯ ТА ФОРМОСТІЙКІСТЬ МЕБЛЕВИХ ЩИТІВ

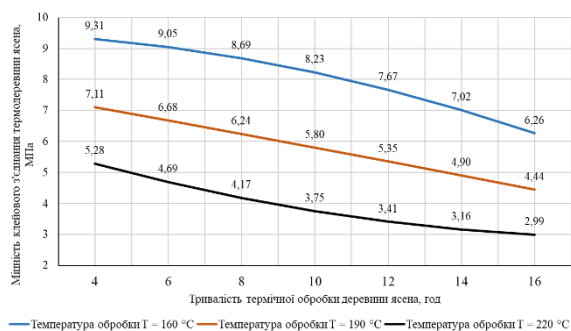
Термічне модифікування деревини – це сталий та ефективний метод покращення її властивостей завдяки зміні хімічної будови клітинних стінок. Зазвичай термічну обробку виконують у діапазоні температур 160...240°C. Під дією температури першочергово деградують геміцелюлози з виділенням летких продуктів, змінюється структура целюлози та відбуваються конденсаційні перетворення лігніну. Усе це зменшує вміст гідроксильних груп і призводить до зниження гігроскопічності й поліпшення розмірної стабільності [1,2,3,4]. Водночас, це призводить до значного зменшення міцності та довговічності клейових з'єднань термодеревини [5,6,7].

Переважаюча більшість досліджень зосереджена на визначенні міцності клейового з'єднання між термічно модифікованою та немодифікованою деревиною, при цьому майже всі вони стосуються зарубіжних порід деревини. Аналогічна ситуація спостерігається і у питанні дослідження формостійкості меблевих щитів, виготовлених із термодеревини. У науковій літературі відсутні відомості про формостійкість меблевих щитів повністю виготовлених із термодеревини ясеня, а також про міцність клейового з'єднання у цих щитах, що й зумовило проведення наших досліджень.

Термічне модифікування деревини ясеня проводили за вакуумно-кондуктивною технологією термічної обробки деревини [8]. Підготовку експериментальних взірців клейових з'єднань термодеревини ясеня та дослідження міцності клейового з'єднання внапусток під час поздовжнього розтягування на зсув проводили у відповідності до вимог стандарту ДСТУ EN 205:2014 [9]. Оцінку формостійкості (площинності поверхні) меблевих щитів, виготовлених із термодеревини ясеня, здійснювали шляхом вимірювання величини відхилення товщини експериментальних зразків від номінального значення (18 мм). Величину відхилення поверхні щитів від площинності визначали як різницю між максимальним і мінімальним значеннями відхилення товщини від номінального значення [10].



а)



б)

Рис. 1 – Залежність міцності клейового з'єднання термодеревини ясеня внапусток під час поздовжнього розтягування на зсув від а) температури обробки, б) тривалості обробки

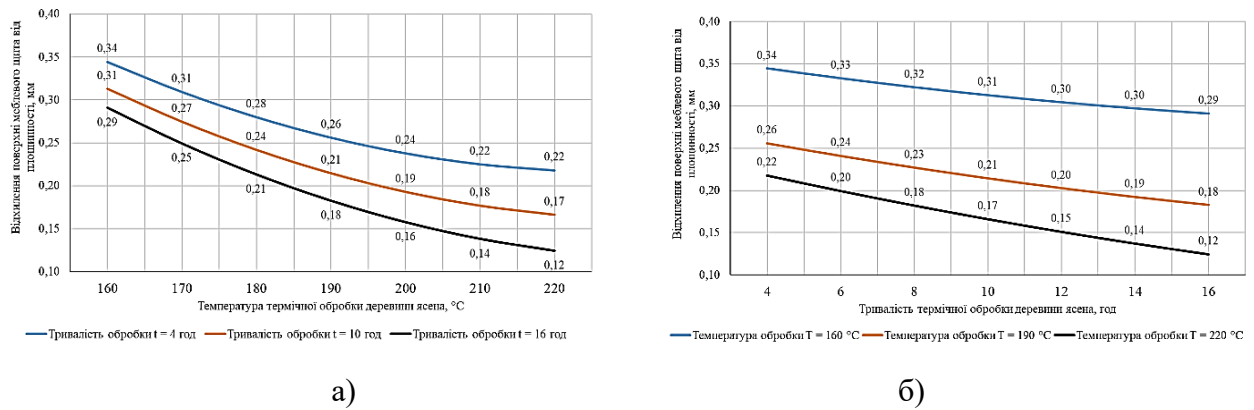


Рис. 2 – Залежність величини відхилення поверхні меблевого щита від площинності від:
а) температури обробки, б) тривалості обробки

Результати експериментальних досліджень показали, що міцність клейового з'єднання термодеревини ясена внапусток під час поздовжнього розтягування на зсув зменшується зі зростанням температури та тривалості термообробки. При максимальних параметрах ($T = 220^{\circ}\text{C}$, $t = 16$ год) зусилля руйнування було мінімальним та становило 2,99 МПа. Результати експериментальних досліджень формостійкості меблевих щитів показали, що величина відхилення поверхні від площинності зменшується зі зростанням температури та тривалості термообробки. При максимальних параметрах обробки ($t = 220^{\circ}\text{C}$, $\tau = 16$ год) відхилення від площинності становило 0,13 мм.

Список посилань

- Hill C. Thermal modification of wood – A review: Chemical changes and hygroscopicity / C. Hill, M. Altgen, L. Rautkari // *Journal of Materials Science*. — 2021. — Vol. 56. — P. 6581–6614. — DOI: 10.1007/s10853-020-05722-z.
- Kubovský I. Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification / I. Kubovský, D. Kačíková, F. Kačík // *Polymers*. — 2020. — Vol. 12. — P. 485. — DOI: 10.3390/polym12020485.
- Lin B.-J. Thermal degradation and compositional changes of wood treated in a semi-industrial scale reactor in vacuum / B.-J. Lin, B. Colin, W.-H. Chen [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. — 2018. — Vol. 130. — P. 8–18. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.005>.
- He Z. Gaseous decomposition products from wood degradation via thermogravimetric and fourier transform infrared analysis during thermal modification of beech and pine woods / Z. He, Z. Wang, L. Qu [et al.] // *BioResources*. — 2019. — Vol. 14, № 3. — P. 6883–6894. — DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.6883-6894>.
- Král P. Bonding Strength of Thermally Treated Spruce (*Picea abies*) and Oak Wood / P. Král, P. Klímek, P. K. Mishra // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. — 2014. — Vol. 62, no. 3. — P. 539–542. — DOI: <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201462030539>.
- Masoumi A. Adhesive bonding performance of thermally modified yellow poplar / A. Masoumi, F. X. Z. Balma, B. H. Bond // *BioResources*. — 2023. — Vol. 18, no. 4. — P. 8151–8162. — DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.8151-8162>.
- Kshyvetsky B. Strength of adhesive joints of thermally modified ash wood glued with polyvinyl acetate-based adhesives / B. Kshyvetsky, H. Datskiv // *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*. — 2023. — Vol. 66, No. 211. — Article 00003. — DOI: <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.426.03>.
- Губер Ю. М. Експериментальні дослідження зміни фізико-механічних властивостей деревини в процесі вакуумно-кондуктивного термічного оброблення / Ю. М. Губер, Ж. Я. Гуменюк, М. М. Ільків // *Науковий вісник НЛТУ України*. — 2010. — Т. 20, № 2. — С. 92–99.
- ДСТУ EN 205:2014. Клеї несиллові для деревини. Метод визначання міцності з'єднання внапусток під час поздовжнього розтягування на зсув. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. — 12 с.
- Ільків М. М. Дослідження впливу режимних параметрів процесу термічної обробки деревини ясена на формостійкість комбінованих меблевих щитів / М. М. Ільків, В. Р. Солонинка, С. А. Грицак, Я. М. Білий // *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість : міжвід. наук.-техн. зб.* — Львів : НЛТУ України, 2019. — Вип. 45. — С. 47–55. — DOI: <https://doi.org/10.36930/42194507>.

УДК 674.815:004.94:519.85

Максимів Р, аспірант

Кушпін А.С., канд. техн. наук, доцент

Національний лісотехнічний університет України, м.Львів, andriy.kushpit@nltu.edu.ua

АДАПТИВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИБОРУ СТРАТЕГІЙ РОЗКРОЮ В ІНТЕГРОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ «ПРОЕКТУВАННЯ — РОЗКРІЙ»

Ефективність сучасних інтегрованих виробничих систем безпосередньо залежить від здатності швидко й безпомилково обробляти просторові дані. Проблема моделювання карт розкрою (задача вкладеності) належить до класу NP-повних задач, що потребує застосування потужних математичних і геометричних інструментів для аналізу складних нерегулярних форм. Центральна закономірність адаптивного інтегрованого середовища полягає в тому, що система не використовує один універсальний алгоритм обчислення геометрії, а динамічно перемикається між різними математичними моделями залежно від складності контурів і вимог до швидкодії.

Багаторівневий геометричний інструментарій. Фундаментом адаптивного розміщення деталей є здатність системи швидко визначати, чи перетинаються дві деталі, чи вони лише дотикаються. Для цього адаптивне середовище використовує чотири базові геометричні підходи, вибір яких залежить від умов конкретного замовлення.

1. Растрові (піксельні) методи. Лист матеріалу подається як дискретна сітка (матриця), де кожна комірка має визначений стан. Цей підхід є універсальним для довільних, зокрема криволінійних, форм. Водночас адаптивна система враховує його обмеження: підвищення точності через зменшення розміру комірки різко збільшує використання пам'яті та час виконання перевірок. Тому растрові моделі доцільно застосовувати переважно для швидкого попереднього аналізу.

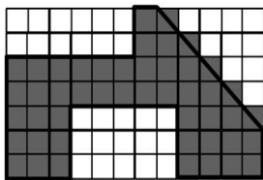


Рис. 1 – Растрове подання деталі на дискретній сітці.

2. Пряма тригонометрія та D-функції. Замість матриці система аналізує деталі як замкнені послідовності вершин і ребер, обсяг опису яких не залежить від абсолютного розміру деталі. Для оптимізації обчислень система спочатку застосовує тести обмежувальних рамок (bounding boxes): якщо прямокутники, що оточують деталі, не перетинаються, подальший аналіз не виконується. Для точного позиціонування використовується D-функція, яка аналітично визначає відносне положення точки щодо орієнтованого ребра іншого багатокутника (ліворуч, праворуч або на лінії).

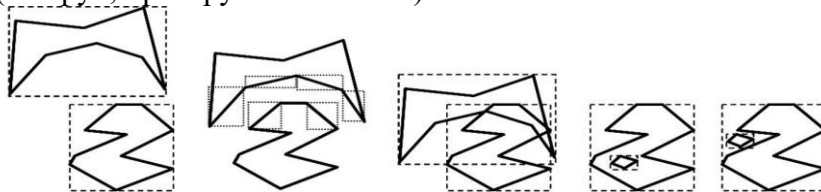


Рис. 2 – Перевірка взаємного розташування багатокутників за обмежувальними рамками та D-функціями.

3. No-Fit Polygon (NFP). Це один із найефективніших інструментів для щільного пакування. NFP — полігон, отриманий у результаті віртуального обведення (ковзання) однієї деталі навколо іншої. Якщо опорна точка рухомої деталі знаходиться на межі NFP, деталі дотикаються без перекриття. Адаптивна закономірність полягає в тому, що

генерування NFP, зокрема через обчислення сум Мінковського, виконується на етапі попередньої обробки. Для складних нерегулярних форм із багатьма увігнутостями система застосовує декомпозицію: складна деталь розбивається на прості опуклі підполігони, для яких NFP обчислюється швидше, після чого результати об'єднуються.

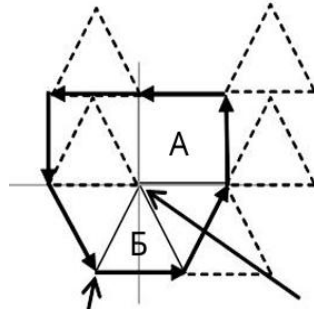


Рис. 3 – Побудова No-Fit Polygon шляхом ковзання однієї деталі навколо іншої.

4.Ф-функції (Phi-functions). Це аналітичний інструмент, що математично описує можливі взаємні положення об'єктів. Ф-функція набуває додатного значення, якщо деталі розділені, дорівнює нулю в разі дотику та є від'ємною при перекритті об'єктів. Застосування Ф-функцій дає змогу розглядати розкрій як задачу неперервної математичної оптимізації.

Адаптивне перемикання геометричних моделей. Встановлено, що ключовою закономірністю середовища «Проектування — розкрій» є керування обчислювальною складністю. Для прямих тригонометричних тестів час перевірки істотно залежить від кількості ребер деталей. Тому система автоматично регулює глибину геометричного аналізу:

- для випадків у яких домінують прості багатокутники (наприклад, елементи корпусних меблів), система спирається на D-функції та розрахунок NFP через злиття діаграм нахилу;
- коли карта розкрою насичується складноконтурними деталями, система ідентифікує взаємодію увігнутостей і переходить до розкладання форм на прості опуклі багатокутники, щоб уникнути надмірного зростання кількості перевірок.

Висновки. Інтеграція потужного геометричного апарату в систему «Проектування — розкрій» є основою її адаптивності. Відмова від єдиного методу на користь динамічної гібридизації растрового аналізу, D-функцій, NFP та математичних Ф-функцій дає змогу ефективно розв'язувати NP-повні задачі пакування нерегулярних форм. Це забезпечує баланс між високою щільністю укладання матеріалу та прийнятним часом генерації керуючих програм для обладнання з ЧПК.

Список посилань

1. Беннелл Дж. А., Олівейра Дж. Ф. The geometry of nesting problems: A tutorial. European Journal of Operational Research. 2008. Vol. 184, No. 2. P. 397–415. URL: https://gent.cs.kuleuven.be/vakgroeppit/sites/gent.cs.kuleuven.be/files/nesting_problems_tutorialEJOR-184-2008.pdf
2. Руснак В. М., Стадник Н. Б. Методи та засоби оптимізації розкрою листових матеріалів у комп'ютерних системах меблевого виробництва з використанням адаптивних евристик: магістерська кваліфікаційна робота. Тернопіль: ТНТУ, 2025. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50641>
3. Стоян Ю. Г., Терно Дж., Шайтауер Г., Гіл Н., Романова Т. Phi-functions for primary 2D-objects. Studia Informatica Universalis. 2001. Vol. 2, No. 1. P. 1–32. URL: https://www.researchgate.net/publication/220284088_PH-functions_for_primary_2D-objects
4. Грицюк Ю. І. Проблема моделювання карт і оптимізації плану розкрою плитних деревних матеріалів на меблевій заготовці. Науковий вісник НЛТУ України. 2006. Вип. 16.7. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2006/16_7/102_Gryciuk_16_7.pdf

UDC 674.001

Gayda S.V., Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Ukrainian National Forestry University, Lviv, serhiy.hayda@nltu.edu.ua

ANALYSIS OF THE PRINCIPLES OF CIRCULAR ECONOMY IN THE FOREST SECTOR

Introduction. The transition to a circular economy has become one of the key priorities of sustainable development policy in the European Union and globally. In the forest sector, circular economy principles are particularly important because forests represent renewable yet limited natural resources that require balanced and responsible management. The traditional linear model based on extraction, production, consumption, and disposal leads to inefficient use of wood resources, accumulation of waste, and increased environmental pressure. The forest sector has significant potential for implementing circular approaches due to the possibility of repeated use of wood materials, recycling of wood residues, recovery of biomass energy, and extension of the life cycle of wood products. In modern conditions, the implementation of circular economy principles contributes not only to environmental protection but also to strengthening economic resilience, technological modernization, and development of innovative production systems. At the same time, the implementation of circular economy principles in the forest sector is associated with several challenges. These include insufficient infrastructure for recycling wood waste, technological limitations in processing post-consumer wood, lack of effective regulatory mechanisms, and insufficient awareness among businesses and consumers regarding circular practices.

The purpose of the study is to analyze the principles of circular economy in the forest sector and determine the main directions for increasing the circularity of forest resource utilization. The object of the study is the forest sector within the framework of sustainable resource management.

The subject of the study is the principles, strategies, and approaches of circular economy implementation in forestry, wood processing, and recycling of post-consumer wood products.

Research Hypothesis. The implementation of circular economy principles and 10R strategies in the forest sector will increase resource efficiency, reduce waste generation, improve environmental sustainability, and contribute to the long-term preservation of forest resources.

Methodology and Research Approach. The research is based on the principles of systems analysis, comparative assessment, and circular economy theory. The methodological approach includes analysis of scientific literature, evaluation of circular economy strategies in the forest sector, and assessment of practical approaches to sustainable use of wood resources.

The study applies the hierarchy of 10R circular economy strategies, including Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Repurpose, Remanufacture, Refurbish, Recycle, and Recover. These strategies were analyzed according to their significance for increasing circularity and minimizing environmental impact in forestry and wood-processing activities.

Results. The study confirms that the implementation of circular economy principles in the forest sector significantly increases the efficiency of wood resource utilization and reduces environmental pressure. The hierarchy of 10R strategies demonstrates that the highest level of circularity is achieved through preventive approaches such as Refuse, Rethink, and Reduce, while recycling and energy recovery represent lower levels of circularity. The analysis shows that sustainable forest management, optimization of wood-processing technologies, and recycling of post-consumer wood are the main directions for improving circularity in the forest sector. Special attention should be given to extending the life cycle of wood products through repair, refurbishment, reuse, and remanufacturing. The study identifies several practical directions for improving circularity in the forest sector: minimization of wood residues during harvesting and processing; development of infrastructure for recycling post-consumer wood; implementation of innovative technologies for wood waste utilization; expansion of biomass energy production;

promotion of eco-design and circular business models; certification of sustainable forest management systems. The research also demonstrates that the development of circular economy in the forest sector contributes to reducing greenhouse gas emissions, preserving biodiversity, and strengthening regional economic development through efficient resource management.

The **scientific novelty** of the study lies in the systematization of circular economy principles and 10R strategies for application in the forest sector. The research substantiates the importance of integrating circular approaches into forestry, wood processing, and recycling systems.

The **practical significance** of the study consists in the possibility of applying the obtained results for improving sustainable forest management policies, developing circular business models, increasing resource efficiency, and reducing wood waste generation in the forest sector.

Conclusions and Recommendations. The study confirms that the circular economy represents an effective model for sustainable development of the forest sector. The implementation of circular principles contributes to rational use of forest resources, reduction of waste generation, extension of product life cycles, and preservation of natural ecosystems.

The most important directions for increasing circularity in the forest sector include: implementation of sustainable forestry practices; optimization of wood-processing technologies; development of systems for reuse and recycling of post-consumer wood; support for eco-design and circular production models; strengthening of legislative and economic incentives for circular practices; increasing public and industrial awareness regarding circular economy principles.

Further development of circular economy in the forest sector requires cooperation between government institutions, scientific organizations, industry, and society in order to achieve long-term environmental, economic, and social sustainability.

References

1. Gayda, S.V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4-16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
2. Gayda, S.V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 55-63. <https://doi.org/10.36930/42073312>
3. Gayda, S.V. (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402>
4. Gayda, S.V. (2018). MDF-facade technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
5. Gayda, S.V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908>
6. Gayda, S.V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 4-15. <https://doi.org/10.36930/42245001>
7. Gayda, S.V., Kiyko, O.A., & Guz, M.M. (2022). Comparative studies of the macro- and microstructures of stump-root wood and stemwood. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 64(3), 131-142. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0013>
8. Gayda, S.V., & Kiyko O.A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>
9. Gayda, S.V., & Lesiv, L.E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
10. Medvid, L.V. (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706>

UDC 674.419

Lesiv L.E., Post-graduate student
Gayda S.V., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Ukrainian National Forestry University, Lviv, serhiy.hayda@nltu.edu.ua

DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS OF COMBINED BLOCKBOARDS MADE OF POST-CONSUMER WOOD

Introduction. The rational utilization of wood resources has become one of the major challenges of modern woodworking and furniture industries. Significant amounts of post-consumer wood are generated annually from dismantled buildings, furniture products, doors, windows, and construction elements. In many cases, these materials are disposed of or incinerated instead of being reused in manufacturing processes. Such practices increase environmental pollution and intensify the depletion of primary forest resources. At the same time, post-consumer wood represents a valuable secondary raw material resource that can be effectively utilized for manufacturing structural panel materials. The development of technologies for recycling reclaimed wood into combined blockboards corresponds to the principles of sustainable production and circular economy. The scientific problem consists in the insufficient development of technological approaches and recommendations regarding the use of post-consumer wood for manufacturing normative structural wood-based panels with stable mechanical properties.

Purpose, Object, Subject of the Research. The purpose of the study was to determine the mechanical characteristics of combined blockboards manufactured from post-consumer wood and to evaluate the influence of rail width on static bending strength. The object of the research was combined blockboards made of reclaimed wood resources. The subject of the research was the regularities of the influence of structural parameters and rail dimensions on the static bending strength of combined blockboards. The research hypothesis assumed that rational selection of rail width and combined arrangement of reclaimed solid wood and particleboard rails would ensure sufficient mechanical strength and compliance with DIN 68705-2:2014-10 requirements.

Methodology and Research Approach. Experimental combined blockboards were manufactured using reclaimed wooden elements obtained from dismantled doors, windows, furniture structures, plywood, and particleboards. The boards were faced with 4 mm plywood and bonded using polyvinyl acetate adhesive of D3 class. The technological process included sorting, cleaning, removal of fittings, machining, gluing, pressing, plywood facing, and final sanding operations. Experimental panels measuring 440×440 mm were produced.

A second-order B-plan experimental design was implemented. Variable factors included: width of reclaimed solid wood rails; width of reclaimed particleboard rails.

The investigated rail widths were 30 mm, 50 mm, and 70 mm. Static bending strength tests were performed using a universal testing machine according to DIN 68705-2:2014-10 methodology. Statistical processing of experimental results and regression analysis were carried out to determine the influence of variable factors on mechanical properties.

Main Results. The experimental studies demonstrated that the mechanical properties of all manufactured combined blockboards complied with DIN 68705-2:2014-10 requirements.

The developed regression equation confirmed that rail width significantly influences static bending strength. Increasing the width of both reclaimed wood and particleboard rails resulted in a reduction of bending strength values. The maximum static bending strength of 32.252 MPa was obtained for combined blockboards with the following structural parameters: reclaimed wood rail width – 30 mm; reclaimed particleboard rail width – 30 mm. Plywood-faced blockboards manufactured from reclaimed solid wood demonstrated average bending strength values of 27.88 MPa, while combined reclaimed wood and particleboard structures achieved 25.211 MPa. The comparative analysis also confirmed that combined structures partially compensate for the

disadvantages of particleboard through the reinforcing effect of reclaimed solid wood rails. Economic calculations established that the production cost of blockboards manufactured from post-consumer wood was approximately 17–23% lower than that of traditional blockboards produced from primary wood resources.

Scientific Novelty and Practical Significance. The scientific novelty of the research consists in the development and experimental validation of combined blockboard structures manufactured from post-consumer wood resources with regulated mechanical characteristics. For the first time, regression dependencies between rail width parameters and static bending strength of combined reclaimed wood blockboards were established. The practical significance of the study lies in the possibility of implementing resource-saving technologies for manufacturing structural wood-based panels using reclaimed wood materials. The obtained results may be applied in furniture manufacturing, woodworking enterprises, and recycling industries.

Conclusions and Recommendations. Post-consumer wood is an effective additional raw material resource for manufacturing combined blockboards. The developed combined structures satisfy normative requirements for static bending strength according to DIN 68705-2:2014-10. The width of structural rails significantly affects the mechanical properties of combined blockboards. The optimal rail width for achieving maximum bending strength is 30 mm for both reclaimed solid wood and reclaimed particleboard components. Combined plywood-faced blockboards made from reclaimed wood demonstrate high mechanical performance and reduced production costs. The implementation of technologies based on post-consumer wood contributes to resource conservation, reduction of environmental pollution, and increased sustainability of woodworking industries. It is recommended to use combined reclaimed wood blockboards in furniture production and structural panel manufacturing where high strength and economic efficiency are required.

References

1. Lesiv, L.E. (2025). Theoretical substitution of the patterns of the influence of components from post-consumer wood on the physical and mechanical characteristics of combined blockboards. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 80-93. <https://doi.org/10.36930/42255106>
2. Gayda, S.V. (2025). Analysis of trends in the production volumes of construction materials in Ukraine and Europe. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 34-48. <https://doi.org/10.36930/42255103>
3. Gayda, S.V., & Lesiv, L.E. (2025). The influence of the properties of structural elements made of post-consumer wood on the strength characteristics of combined blockboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 29, 211-220. doi: <https://doi.org/10.15421/412517>
4. Gayda, S.V. (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402>
5. Gayda, S.V. (2018). MDF-facade technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
6. Gayda, S.V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908>
7. Gayda, S.V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4-16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
8. Gayda, S.V., & Lesiv, L.E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
9. Gayda, S.V., Kiyko, O.A., & Guz, M.M. (2022). Comparative studies of the macro- and microstructures of stump-root wood and stemwood. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 64(3), 131-142. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0013>

UDC 674.8

Kozak Yu.O., Post-graduate student

Ukrainian National Forestry University, Lviv, kozak.iurii@nltu.lviv.ua

ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF THE STRENGTH OF WOODEN STRUCTURES ON MATERIAL CHARACTERISTICS

Introduction. The study investigates the influence of the physical and mechanical properties of structural wood materials on the strength characteristics of wooden structures. Modern timber engineering increasingly requires reliable prediction of load-bearing capacity and deformation behavior under variable operating conditions. The relevance of the research is determined by the growing use of solid and engineered wood products in energy-efficient and sustainable construction systems. At the same time, discrepancies between calculated and actual strength indicators are still observed due to insufficient consideration of moisture content, density, and elastic properties during the design stage.

Aim, Object, Subject and Research Hypothesis. The purpose of the research was to determine and substantiate the relationships between the physical and mechanical properties of structural wood materials and the strength characteristics of wooden constructions in order to improve reliability, durability, and design efficiency. The object of the study was wooden structures manufactured from the main structural wood materials, while the subject of the study concerned the influence of density, moisture content, and modulus of elasticity on compressive and bending strength. The research hypothesis assumed that the establishment of quantitative relationships between these parameters would enable optimization of material selection and improvement of structural performance.

Methodology and Research Approach. The methodological approach included laboratory testing of solid pine, solid oak, glued laminated timber (GLT), laminated veneer lumber (LVL), and cross-laminated timber (CLT). Experimental samples were prepared according to the requirements of EN 408 and ISO 13061 standards. Density was determined by the gravimetric method, moisture content by the oven-drying method, and modulus of elasticity by static bending tests. Compression strength parallel to grain and bending strength were determined using a universal testing machine with deformation registration. Statistical processing included correlation analysis and multifactor regression modeling.

Results. The obtained results confirmed a strong relationship between density and compressive strength ($r = 0.82$), as well as between modulus of elasticity and bending strength ($r = 0.88$). Moisture content demonstrated a significant negative influence on mechanical performance ($r = -0.76$). An increase in wood moisture content from 10% to 20% reduced compressive strength by 18–25%, depending on the material type. The greatest reduction was observed for CLT and solid pine, whereas LVL demonstrated the highest resistance to moisture influence.

Experimental analysis showed that oak possessed the highest density (690 kg/m³) and demonstrated the greatest compressive strength (61.3 MPa) and bending strength (98.6 MPa). LVL exhibited the best strength-to-density ratio due to its homogeneous layered structure and lower variability of properties. Engineered wood products such as LVL and GLT demonstrated more stable behavior compared with solid wood, especially under changing humidity conditions.

A multifactor regression model for predicting bending strength was developed on the basis of density, modulus of elasticity, and moisture content: $\sigma_b = 0.052\rho + 0.0041E - 0.73W + 12.6$

The model demonstrated a high coefficient of determination ($R^2 = 0.91$), which confirms its applicability for engineering calculations and practical design tasks.

Scientific Novelty. The scientific novelty of the study lies in the establishment of integrated quantitative relationships between the main physical and mechanical properties of wood materials and the strength indicators of wooden structures. Unlike conventional approaches based on one or

two parameters, the proposed model simultaneously considers density, elasticity, and moisture content, which significantly improves prediction accuracy.

Practical Significance. The practical significance of the research consists in the possibility of optimizing material selection during the design stage, reducing material consumption, and increasing structural durability. The developed recommendations may be applied in construction practice, woodworking enterprises, and engineering design organizations. The obtained relationships can also be integrated into structural calculation software for more accurate prediction of timber structure performance.

Conclusions and Recommendations. In conclusion, the study confirmed that density and modulus of elasticity are the determining factors influencing the strength of wooden structures, whereas moisture content acts as the primary destabilizing parameter. Modern engineered wood materials, particularly LVL and GLT, demonstrated improved stability and efficiency under variable climatic conditions. The proposed regression model provides an effective engineering tool for predicting bending strength and optimizing the selection of structural timber materials. Further investigations should focus on full-scale structural elements subjected to combined loading and variable environmental conditions.

References

1. Medvid, L.V. (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706>
2. Gayda, S.V., & Kiyko O.A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>.
3. Gayda, S.V., & Lesiv, L.E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
4. Gayda, S.V., Kiyko, O.A., & Guz, M.M. (2022). Comparative studies of the macro- and microstructures of stump-root wood and stemwood. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 64(3), 131-142. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0013>
5. Gayda, S.V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 55-63. <https://doi.org/10.36930/42073312>
6. Gayda, S.V. (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402>
7. Gayda, S.V. (2018). MDF-facade technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
8. Gayda, S.V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908>
9. Gayda, S.V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 4-15. <https://doi.org/10.36930/42245001>
10. Gayda, S.V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4-16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
11. Kozak, Yu.O. (2025). Building a regression model for predicting the strength of wooden structures based on the influence of density, moisture content and elastic modulus. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 94-108. <https://doi.org/10.36930/42255107>
12. Gayda, S. (2025). Analysis of trends in the production volumes of construction materials in Ukraine and Europe. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 34-48. <https://doi.org/10.36930/42255103>

UDC 674.8:658.567

Kyyanka V.V., Post-graduate student,
Gayda S.V., Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Ukrainian National Forestry University, Lviv, serhiy.hayda@nltu.edu.ua

DEVELOPMENT OF EFFECTIVE APPROACHES FOR THE UTILIZATION OF WOOD RESIDUES IN FURNITURE MANUFACTURING

Introduction. Modern furniture manufacturing is characterized by intensive consumption of wood and composite structural materials, which inevitably leads to the formation of significant amounts of production residues and waste. In many enterprises, wood residues may account for 30–40% of the total raw material volume used in production. Inefficient utilization of these materials increases production costs, landfill expenses, and environmental pressure.

The relevance of the study is determined by the necessity to implement resource-saving technologies and develop effective approaches for recycling wood residues in accordance with the principles of circular economy. Modern industrial strategies require minimization of waste generation and maximum reintegration of materials into repeated production cycles.

The problem is that many furniture enterprises still lack integrated waste-management systems. Wood residues are often disposed of or burned without obtaining additional economic value. Therefore, there is a need for scientifically substantiated technological and organizational solutions aimed at efficient reuse and recycling of wood waste streams.

Aim, Object, Subject and Research Hypothesis. The aim of the research is to develop effective approaches for the utilization and recycling of wood residues generated during furniture manufacturing processes. The object of the study is wood and composite waste generated during furniture production. The subject of the study is technological and organizational approaches for recycling and repeated utilization of wood residues in furniture manufacturing. The research hypothesis assumes that rational cascade utilization of wood residues and composite waste can significantly reduce production and disposal costs, improve environmental safety, and create additional value-added products.

Methodology and Research Approach. The methodology included accounting and classification of wood residues generated during 2022–2024 at LLC “Fortuna-Mebli”. Waste streams were divided into three main categories: solid offcuts; sawdust; shavings. A material-balance model with allocation matrices was developed for determining the most efficient recycling routes. Volume-to-mass conversion was performed considering density and moisture content of materials. Economic calculations included revenues, operational costs, and avoided landfill expenses. Environmental assessment covered energy potential and avoided CO₂ emissions from biofuel substitution. The proposed utilization scheme prioritized: mechanical reuse of solid offcuts for structural components and pallets; processing of fine fractions into particleboard and MDF feedstock; conversion of sawdust and shavings into biofuel pellets and briquettes.

Results. The study established a stable reduction in waste generation from 54.80 m³ in 2022 to 30.48 m³ in 2024, representing a 44% decrease. The largest reduction occurred in solid offcuts, which decreased from 35.23 m³ to 19.58 m³ due to optimization of cutting technologies and improved material utilization. The developed recycling system enabled approximately 95% landfill diversion. The distribution of residues in 2024 included: 11.75 m³ for structural elements and auxiliary products; 6.78 m³ for biofuel production; 4.90 m³ for particleboard feedstock; 1.33 m³ for MDF production. The calculated annual economic effect reached approximately UAH 253 thousand due to: additional revenues from secondary products; reduced landfill costs; lower consumption of primary raw materials. The energy potential of produced biofuel reached approximately 11.35 MWh/year. The estimated avoided CO₂ emissions amounted to: approximately 2.3 t/year when substituting natural gas; approximately 3.9 t/year when substituting coal.

Scientific Novelty and Practical Significance. The scientific novelty of the research consists in the integration of cascade wood utilization principles with a comprehensive enterprise-level material-balance model combining technological, economic, and ecological indicators.

The practical significance lies in the development of reproducible recommendations for furniture enterprises regarding: waste sorting and classification; optimization of recycling flows; implementation of resource-efficiency KPIs; reduction of environmental impact; improvement of production profitability. The proposed approaches can also be adapted for other woodworking and construction-material industries.

Conclusions and Recommendations. The conducted research confirmed the effectiveness of integrated recycling strategies for wood residues generated in furniture manufacturing. The implementation of cascade utilization approaches enables substantial reduction of landfill disposal volumes while simultaneously increasing economic efficiency and environmental sustainability. The most effective utilization route is mechanical reuse of solid offcuts for secondary structural products, while fine fractions should be directed toward biofuel production and panel-material manufacturing. For further improvement of resource efficiency, furniture enterprises should: strengthen source-level sorting systems; introduce continuous moisture and fraction control; increase the share of mechanical reuse; develop pelletizing and briquetting capacities; implement environmental performance indicators. The obtained results confirm that rational utilization of wood residues is an effective mechanism for sustainable development of modern furniture manufacturing enterprises.

References

1. Kyryanka, V., & Gayda, S. (2024). Determination of the dynamics of the formation of wood residues and waste from production activities at LLC "Fortuna-Mebli". *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 103-116. <https://doi.org/10.36930/42245009>
2. Gayda, S.V., & Kiyko O.A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>.
3. Gayda, S.V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908>
4. Gayda, S.V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 4-15. <https://doi.org/10.36930/42245001>
5. Gayda, S.V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 55-63. <https://doi.org/10.36930/42073312>
6. Gayda, S.V. (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402>
7. Gayda, S.V. (2018). MDF-facade technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
8. Gayda, S.V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4-16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
9. Gayda, S.V., & Lesiv, L.E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
10. Kyryanka, V., & Gayda, S. (2025). Development of approaches for the utilization of wood residues and waste from the processing of wood and composite structural materials in furniture manufacturing at LLC «Fortuna-Mebli». *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 109-123. <https://doi.org/10.36930/42255108>

UDC 674.8:658.567

Grytsak S.S., Post-graduate student
Grytsak S.A., PhD, Assoc. Professor,
Ukrainian National Forestry University, Lviv, Hrytsak.Stepan@nltu.lviv.ua

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL FEATURES OF ASH WOOD BENDING

Introduction. The production of bent wooden elements remains one of the most important technological directions in modern woodworking and furniture manufacturing. Bent structures provide improved ergonomic, aesthetic, and strength characteristics compared with straight wooden elements. Ash wood is widely used for such purposes due to its high elasticity, strength, and favorable anatomical structure. However, the bending process is accompanied by a number of technological difficulties, including cracking, delamination, instability of geometric shape, and material losses. These defects are especially significant when processing thick workpieces with small bending radii. Therefore, the optimization of technological parameters for ash wood bending is an important scientific and practical task. Particular attention is currently paid to wood plasticization methods. Among them, ammonia vapor treatment is considered promising because it significantly reduces wood stiffness and improves deformability without severe structural damage. Nevertheless, the process remains insufficiently investigated, especially regarding the interaction between material thickness, bending radius, and plasticization duration.

Purpose, Object and Subject of Research. The purpose of the research was to determine the influence of technological parameters on the quality of bent ash wood workpieces. The object of the study was the technological process of ash wood bending. The subject of the research was bent ash wood workpieces manufactured under different plasticization conditions. It was hypothesized that the quality of bent ash wood elements depends primarily on the interaction between material thickness, bending radius, and duration of ammonia plasticization, and that optimization of these parameters can significantly increase the percentage of defect-free products.

Methodology and Research Approach. Experimental studies were conducted using ash wood specimens plasticized in a 35% ammonia solution. Three technological factors were selected: material thickness: 6, 13, 20 mm; bending radius: 30, 60, 90 mm; plasticization duration: 12, 36, 60 h. The experiments were carried out according to a full factorial design. The quality indicator was defined as the percentage of high-quality bent workpieces without visible cracks or structural failures. Statistical processing included: regression analysis; variance analysis; adequacy verification using Fisher's criterion. A mathematical regression model was developed to describe the dependence of bending quality on technological parameters.

Main Results. The research confirmed that the thickness of ash wood significantly affects bending quality. Increasing thickness led to a considerable reduction in the percentage of defect-free workpieces. For specimens with a thickness of 6 mm, the influence of bending radius and plasticization duration was insignificant, and the quality level approached 100%. In contrast, specimens with a thickness of 20 mm showed substantial quality reduction under small bending radii. The experimental analysis demonstrated the following results: at $h = 20$ mm and $R = 30$ mm, the percentage of quality workpieces was only 2.32%; at $h = 20$ mm and $R = 90$ mm, the percentage increased to 45.47%; increasing plasticization duration improved bending quality by approximately 9–10%. The regression model adequately described the relationship between technological parameters and bending quality. Fisher's criterion confirmed the adequacy of the mathematical model. The optimal technological conditions were determined as: thickness $h = 6$ mm; bending radius $R = 30$ mm; plasticization duration $T = 12$ h. Under these conditions, the maximum percentage of quality bent elements reached 99.44%.

Scientific Novelty and Practical Significance. The scientific novelty of the work consists in establishing quantitative relationships between the technological parameters of ammonia plasticization and the quality indicators of bent ash wood elements.

The practical significance of the research lies in: optimization of industrial wood bending technologies; reduction of material waste; improvement of product quality; increased efficiency of furniture manufacturing processes. The obtained results can be applied in the production of furniture components, curved structural elements, and decorative interior products.

Conclusions and Recommendations. The main technological factors influencing ash wood bending quality were identified: material thickness, bending radius, and plasticization duration. Ammonia plasticization was confirmed as an effective method for improving wood deformability during bending. Material thickness was found to have the strongest influence on bending quality. Increasing bending radius and plasticization duration positively affected the percentage of quality workpieces. The developed regression model adequately describes the bending process and can be used for technological optimization. The optimal technological parameters for ash wood bending were determined as: thickness – 6 mm; bending radius – 30 mm; plasticization duration – 12 h. The proposed technological recommendations make it possible to reduce production defects and improve the efficiency of bent furniture element manufacturing.

References

1. Grytsak, S. (2024). Study of the technological process of bending ash wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 52-64. <https://doi.org/10.36930/42245005>
2. Grytsak, S., & Grytsak, S. (2023). Determination of the influence of pressing parameters on the bending process of beech furniture blankets. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 48-60. <https://doi.org/10.36930/42234904>
3. Gayda, S.V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 55-63. <https://doi.org/10.36930/42073312>
4. Gayda, S.V. (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402>
5. Gayda, S.V. (2018). MDF-facade technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
6. Gayda, S.V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908>
7. Gayda, S.V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 4-15. <https://doi.org/10.36930/42245001>
8. Gayda, S.V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4-16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
9. Gayda, S.V., & Kiyko O.A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>
10. Gayda, S.V., & Lesiv, L.E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
11. Gayda, S.V., Kiyko, O.A., & Guz, M.M. (2022). Comparative studies of the macro- and microstructures of stump-root wood and stemwood. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 64(3), 131-142. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0013>
12. Voronovich, V., & Gayda, S. (2011). Comparative analysis of bending particularities for various post-consumer wood species and age categories. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 37(1), 84-88. <https://doi.org/10.36930/421137121>

UDC 674.041

Podibka T.I., PhD, Assist.
Gayda S.V., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Ukrainian National Forestry University, Lviv, t.podibka@nltu.edu.ua

ANALYSIS AND STRENGTH ASSURANCE OF BEECH FURNITURE PANELS

Introduction. The production of furniture panels from hardwood species is one of the priority directions in modern woodworking due to the high mechanical properties, durability, and aesthetic appearance of hardwood materials. Beech wood is widely used in furniture manufacturing because of its density, hardness, and dimensional stability. However, ensuring the strength characteristics of glued furniture panels remains an important technological problem, especially under variable humidity and loading conditions.

The quality and operational reliability of furniture panels are significantly influenced by technological parameters such as adhesive consumption, slat dimensions, moisture content, pressing режимs, and temperature conditions during gluing. In industrial production, irrational adhesive consumption increases manufacturing costs, whereas improper slat dimensions may reduce structural strength and dimensional stability. Therefore, optimization of these parameters is necessary to ensure both economic efficiency and high product quality.

Aim, Object and Subject of Research. The aim of the research is to analyze and ensure the strength of beech furniture panels by determining the influence of technological factors on static bending strength and developing a mathematical regression model. The object of the study is furniture panels manufactured from glued beech slats. The subject of the study is the influence of adhesive consumption and slat width on the strength characteristics of furniture panels during static bending. The research hypothesis assumes that optimization of adhesive consumption and slat width makes it possible to increase the strength characteristics and dimensional stability of beech furniture panels while reducing technological losses and material consumption.

Methodology and Research Approach. Experimental furniture panels were manufactured from common beech (*Fagus sylvatica* L.) according to a developed experimental matrix. Slats with cross-sections of 24×24 mm, 24×44 mm, and 24×64 mm were processed and glued using polyvinyl acetate adhesive. The varying factors of the experiment included: adhesive consumption during gluing: 140, 210, and 280 g/m²; slat width: 24, 44, and 64 mm. The output parameter was the ultimate strength during static bending. Experimental samples were tested using a laboratory testing machine. Statistical processing of results included regression analysis, variance analysis, Fisher criterion verification, and optimization using the gradient method.

Main Results. The obtained experimental results demonstrated that the developed regression model adequately describes the relationship between technological factors and the static bending strength of beech furniture panels. The mathematical model in normalized variables was determined as: $y=21.254+0.227x_1-0.503x_2+0.009x_1x_2-0.750x_2^2+0.154x_1x_2$.

The study established that increasing adhesive consumption causes only a minor increase in bending strength, ranging from 0.69% to 3.75%. At the same time, increasing slat width leads to a more significant reduction in strength characteristics, from 3.41% to 6.69%.

The maximum static bending strength was achieved at adhesive consumption of 280 g/m² and slat width of 38.43 mm, where the bending strength reached 21.53 MPa. All experimental samples satisfied the requirements of DSTU EN 13353:2009 for wooden panels.

Scientific Novelty and Practical Significance. The scientific novelty of the research consists in developing an adequate regression model for predicting the static bending strength of beech furniture panels depending on adhesive consumption and slat width.

The practical significance of the work lies in the development of technological recommendations for manufacturing durable and dimensionally stable furniture panels. The

obtained results can be implemented in industrial woodworking enterprises to optimize adhesive consumption, reduce production costs, and improve the quality of furniture products.

Conclusions and Recommendations. The conducted studies confirmed the feasibility of using beech wood slats for manufacturing strong and dimensionally stable furniture panels. The developed regression model adequately describes the influence of adhesive consumption and slat width on the static bending strength of furniture panels. Adhesive consumption has a relatively small influence on bending strength, whereas slat width significantly affects the reduction of strength characteristics. The optimal technological parameters ensuring the maximum bending strength were determined as adhesive consumption of 280 g/m² and slat width of 38.43 mm. To ensure stable quality indicators, the following technological parameters are recommended: wood moisture content 8±2%, pressing pressure 80–110 bar, pressing time 5–6 min, temperature 88–92 °C, and adhesive consumption 170–190 g/m². The obtained strength characteristics comply with the requirements of DSTU EN 13353:2009, which confirms the suitability of the developed technology for industrial implementation.

References

1. Podibka, T. (2024). Construction of the mathematical model of the strength of furniture panels made of glaminated beech laws. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 65-76. <https://doi.org/10.36930/42245006>
2. Podibka, T. (2022). Mathematical model for calculating the economic efficiency of the process of manufacturing defect-free sections for shape-resistant furniture panels. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 57-68. <https://doi.org/10.36930/42214805>
3. Podibka, T. (2020). A investigation of form of stability of variously designed furniture board made of pine wood of different constructions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 108-120. <https://doi.org/10.36930/42204613>
4. Gayda, S.V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 55-63. <https://doi.org/10.36930/42073312>
5. Gayda, S.V. (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402>
6. Gayda, S.V. (2018). MDF-facade technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
7. Gayda, S.V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908>
8. Gayda, S.V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 4-15. <https://doi.org/10.36930/42245001>
9. Gayda, S.V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4-16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
10. Gayda, S.V., & Kiyko O.A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>
11. Gayda, S.V., & Lesiv, L.E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
12. Gayda, S.V., Kiyko, O.A., & Guz, M.M. (2022). Comparative studies of the macro- and microstructures of stump-root wood and stemwood. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 64(3), 131-142. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0013>

UDC 674.02

Lutsenko A.O., Post-graduate student
Gayda S.V., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Ukrainian National Forestry University, Lviv , Lutsenko.a@nltu.edu.ua

ANALYSIS OF FURNITURE DESIGN FEATURES IN THE IMOS ENVIRONMENT

Introduction. The modern furniture industry is characterized by increasing requirements for production flexibility, customization, and rapid adaptation to customer demands. Traditional design approaches based on static CAD libraries often fail to provide sufficient adaptability for individualized furniture production. Under conditions of mass customization, enterprises require digital systems capable of dynamically modifying furniture parameters while maintaining technological accuracy and manufacturing compatibility.

Among contemporary CAD/CAM solutions used in furniture manufacturing, the IMOS environment occupies a leading position due to its integration with CNC equipment, ERP systems, and automated production planning tools. However, despite its advanced functionality, IMOS still demonstrates limitations related to rigid parametric dependencies and insufficient adaptability during iterative product modifications.

Purpose of the Research. The purpose of the research is to analyze the features of furniture design within the IMOS environment and determine the possibilities for improving adaptability and efficiency of the parametric modelling process.

Object of research: the process of furniture design in the IMOS CAD/CAM environment.

Subject of research: methods and technological features of adaptive parametric modelling of furniture products in IMOS.

Research Hypothesis. It is assumed that the implementation of adaptive parametric approaches and user-oriented design principles in IMOS can reduce furniture design time by at least 25–30 %, improve modelling flexibility, and decrease the number of logical specification errors.

Methodology and Research Approach. The methodological basis of the research combines engineering principles of parametric modelling with adaptive design approaches. The following methods were applied: analytical review of IMOS architecture and CAD/CAM technologies; comparative analysis of classical and adaptive modelling approaches; experimental modelling of furniture products in IMOS; evaluation of usability indicators and design efficiency; statistical analysis of modelling results. The experimental object was a modular cabinet system designed in IMOS iX CAD 12.0 using adaptive parametric variables and automated logical dependencies.

Main Results. The conducted analysis demonstrated that the IMOS environment provides extensive opportunities for digital furniture engineering, including: automated generation of production documentation; parametric control of furniture geometry; integration with CAM and CNC systems; rapid modification of dimensions and materials; visualization and specification automation. At the same time, several limitations were identified: rigidity of standard parametric libraries; complexity of editing Rule Editor dependencies; insufficient user-oriented interaction mechanisms. Experimental implementation of adaptive design templates showed significant improvements in the efficiency of the design process. According to the obtained results: the average design time decreased by 32.3 %; the number of logical specification errors decreased by 27.4 %; usability indicators increased from 68 to 84 SUS points.

The integration of adaptive variables and iterative modelling principles enabled more stable and flexible project development in comparison with traditional static templates.

Scientific Novelty. The scientific novelty of the research lies in: identifying the technological limitations of traditional parametric modelling in IMOS; substantiating the feasibility of adaptive CAD design approaches for furniture engineering; proposing an adaptive modelling structure based on user-defined variables and iterative feedback mechanisms; confirming the effectiveness of combining parametric modelling with human-centered design principles.

Practical Significance. The practical significance of the research consists in: reducing furniture development time; minimizing specification and modelling errors; improving interaction between designers and production engineers; increasing flexibility of furniture customization processes; creating prerequisites for implementing Industry 5.0 principles in furniture manufacturing enterprises. The proposed approach can be implemented without modifying the IMOS software core, using only adaptive templates and logical libraries.

Conclusions and Recommendations. The IMOS environment is an effective CAD/CAM platform for integrated furniture design and manufacturing preparation. Traditional parametric modelling approaches demonstrate limited adaptability under conditions of individualized furniture production. Adaptive modelling methods significantly improve the efficiency and flexibility of furniture design processes. Experimental implementation confirmed reductions in design time and logical specification errors. The integration of adaptive and human-centered approaches corresponds to modern Industry 5.0 concepts and flexible manufacturing systems. Further research should focus on the integration of artificial intelligence tools, machine learning algorithms, and automated UX feedback systems into furniture CAD/CAM environments.

References

1. Gayda, S.V. (2003). Flexible automated production – the future of woodworking. *Equipment and tools for professionals*, 1, 53-60.
2. Gayda, S.V. (2003). Analysis of the characteristics of flexible automated production. *Equipment and tools for professionals*, 5, 52-59.
3. Gayda, S.V. (2004). Software foundations of production flexibility. *Furniture technologies*, 2, 49-61.
4. Gayda, S.V. (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 73-79. <https://doi.org/10.36930/42073314>
5. Gayda, S.V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 55-63. <https://doi.org/10.36930/42073312>
6. Gayda, S.V. (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402>
7. Gayda, S.V. (2018). MDF-facade technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
8. Lutsenko, A.O. (2025). Formulation of a mathematical model of adaptive furniture design within the IMOS CAD Environment. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 135-150. <https://doi.org/10.36930/42255110>
9. Lutsenko, A.O. (2024). Ensuring effective symbiosis of the Imos program with flexible automated furniture production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 77-93. <https://doi.org/10.36930/42245007>
10. Orikhovskyy, R.Ya., & Gayda, S.V. (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 41-51. <https://doi.org/10.36930/42245004>
11. Orikhovskyy, R.Ya, Gayda, S.V., Grytsak, S.A., Salapak, L.V. (2025). Choice of the sequence of productivity of machinery in automated production systems of the woodworking manufacturing. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 17-33. <https://doi.org/10.36930/42255102>
12. Gayda, S. (2025). Analysis of trends in the production volumes of construction materials in Ukraine and Europe. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 34-48. <https://doi.org/10.36930/42255103>

УДК 684.4

Калина А.А., аспірант

Миськів Є.М., канд. техн. наук, ст. викладач

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, kalyna.a@nltu.lviv.ua

ОСОБЛИВОСТІ СВЕРДЛІННЯ НАСКРІЗНИХ ОТВОРІВ В МЕБЛЕВИХ ЗАГОТОВКАХ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

У меблевому виробництві, як і в інших галузях промисловості, ефективність на кожному з етапів виробництва є одним із ключових факторів впливу на результативність та ресурсоощадність роботи підприємства [1]. Важливим є етап механічного оброблення меблевих заготовок з різних плитних матеріалів, що зазвичай включає операції пиляння, фрезерування, свердління та крайколичкування. Точність та якість виконання цих операцій мають безпосередній вплив на продуктивність етапу збирання заготовок у виріб, а також на експлуатаційні та естетичні характеристики меблевого виробу загалом.

Використання широкого спектру різноманітної меблевої фурнітури передбачає свердління в меблевих заготовках значної кількості отворів, як глухих так і наскрізних. Для реалізації цієї задачі широко застосовуються різні ріжучі інструменти.

Так, для отримання наскрізних отворів в плитних матеріалах переважно використовують спіральні свердла з конічним заточуванням ріжучих крайок твердосплавної напайки (рис. 1, а). Перевагами їх застосування є відносна простота конструкції та форми заточування ріжучих крайок, конічне вістря свердла забезпечує плавне врізання в матеріал з невеликими осьовими зусиллями, гарне центрування свердла в отворі забезпечується наявними боковими напрямними вздовж спіралі, а також ефективне відведення стружки та відносно якісне прорізання фінішного покриття на площині виходу свердла з матеріалу. Важливими факторами, що впливають на якість виконаного отвору і відповідно на розмір зони розшарування фінішного покриття, є кут заточування ріжучих крайок свердла, а також розрахунок оптимальних технологічних параметрів швидкості різання та подачі [2].

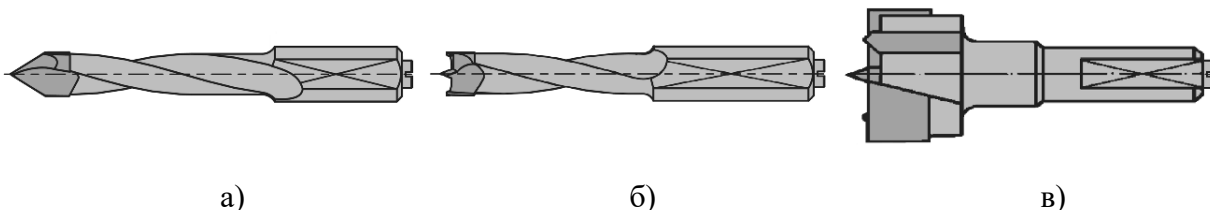


Рис. 1 – Ескіз свердла: а) з конічним заточуванням; б) з центральним та підрізаючими вістрями; в) свердло Форстнера

У свою чергу для вирізання глухих отворів невеликого діаметру в плитних матеріалах застосовують спіральні свердла з твердосплавними напайками, що мають центральне та підрізаючі вістря (рис. 1, б). Така форма свердла дозволяє отримати кращу якість отвору за рахунок прорізання його контуру ще до вибирання основного об'єму матеріалу. На етапі врізання свердла в матеріал центральне вістря забезпечує стабільність положення інструменту відносно оброблюваної поверхні та запобігає ковзанню, а бокові вістря прорізають зовнішній периметр отвору в поверхні матеріалу з мінімальними зусиллями завдяки незначній площі контакту. Це дає можливість отримати мінімальні пошкодження поверхні матеріалу на наступному етапі, коли свердло відокремлює та видаляє основний об'єм матеріалу, формуючи циліндричний отвір. Окрім цього, за рахунок форми свердла вдається отримати отвір з невеликими показниками шорсткості внутрішньої поверхні та дна. Недоліками використання такого ріжучого інструменту є його вища вартість, складність заточування поверхонь ріжучих крайок, а також значні осьові зусилля на етапі

врізання основних ріжучих крайок в матеріал. Для виконання глухих отворів великого діаметру застосовують свердла з подібною конструкцією ріжучих крайок (так зване свердло Форстнера, рис. 1, в), але без спіральної частини.

У випадку використання в технологічному процесі меблевого виробництва свердлильно-присадних верстатів часто існує необхідність використання наборів сверدل однакових діаметрів, але з різною формою ріжучих крайок для отримання глухих та наскрізних отворів в меблевих заготовках.

Необхідність автоматизації та збільшення продуктивності операції свердління в деревообробному та меблевому виробництві призвели до появи та широкого застосування свердлильно-присадних верстатів з ЧПК як окремої групи високопродуктивного обладнання [3]. У свою чергу реалізація задачі виконання свердління меблевих заготовок із плитних матеріалів, що зазвичай мають форму прямокутного паралелепіпеда, в усі шість площин за одну операцію підштовхнула виробників обладнання до створення моделей, оснащених декількома свердлильними групами. Тобто меблева заготовка знаходиться між свердлильними групами в процесі оброблення на верстаті. Тож, враховуючи точність, швидкість та повторюваність переміщень вузлів та агрегатів на верстатах з ЧПК, з'явилась можливість виконання наскрізних отворів за рахунок співвісного суміщення двох глухих отворів, що виконані з протилежних напрямків різними свердлильними групами.

Перевагою цього способу є можливість відмови від використання сверدل для наскрізного свердління, що у свою чергу дозволяє одночасно встановити ширший спектр діаметрів сверدل для глухих отворів. Це розширює технологічні можливості обладнання за рахунок спроможності виконання отворів різних діаметрів і, як наслідок, забезпечує можливість використання більшої кількості різноманітної меблевої фурнітури. До переваг також відноситься підвищення якості виконання отворів та зменшення розшарування фінішного покриття плитних матеріалів за рахунок використання спіральних сверدل з центральним та підрізаючими вістрями. Водночас до недоліків цього способу можна віднести підвищення складності операції свердління через виконання кожного наскрізного отвору двома різними свердлильними групами, що передбачає підвищені вимоги до налаштування координат їх переміщення та позиціонування, а також збільшення часу оброблення через необхідність виконання двох послідовних рухів двома свердлильними групами, замість одного. Окрім цього, даний спосіб передбачає використання сверدل зі складною формою заточування ріжучих крайок.

Дослідження якісних характеристик та аспектів, пов'язаних із продуктивністю застосування описаного способу отримання наскрізних отворів в плитних матеріалах, є перспективним напрямком на шляху до підвищення факторів ресурсоощадності меблевого та деревообробного виробництв.

Список посилань

1. Агрес, О., Садура, О., Попадинець, Н. (2024). Формування організаційно-економічного механізму розвитку підприємств деревообробної промисловості. Журнал Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 11(4), 37–50. <https://doi.org/10.15330/jpnu.11.4.37-50>
2. Trzepieciński, T., Sz wajka, K., Zielińska-Sz wajka, J., & Szewczyk, M. (2025). Current Trends in Monitoring and Analysis of Tool Wear and Delamination in Wood-Based Panels Drilling. Machines, 13(3), 249. <https://doi.org/10.3390/machines13030249>
3. Ymeri, M., Bajraktari, A., Hoxha, S. H., Cukaj, K., Thoma, H., & Peri, L. (2014). Comparison of technical and economic parameters of drilling of wood based panels with CNC and traditional woodworking machines. Eurasian Journal of Forest Science, 2(1), 15-24.

УДК 674.028.9: 624.078.43 + 678.664

Басараб А.І., аспірант

Кшивецький Б.Я., докт. техн. наук, професор

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, 25basarab.a@nltu.lviv.ua

ЩОДО МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ДЕРЕВИНИ НА ОСНОВІ ПОЛІУРЕТАНОВИХ КЛЕЇВ

Поліуретанові клеї останніми роками привертають значну увагу дослідників і виробників завдяки поєднанню високих адгезійних властивостей, еластичності та стійкості до вологи. У порівнянні з традиційними полівінілацетатними (ПВА) дисперсіями вони характеризуються вищою механічною міцністю, підвищеною водостійкістю та здатністю забезпечувати надійне склеювання навіть за складних умов – при змінній вологості, температурних коливаннях і навантаженнях. Попри дещо вищу вартість, застосування поліуретанових клеїв є технічно та економічно виправданим, оскільки воно відповідає сучасним вимогам до якості клеєних виробів і сприяє підвищенню їх експлуатаційної надійності.

Адгезійна і когезійна міцність клейових з'єднань деревини з використанням термо-реактивних поліуретанових клеїв формується, в основному, завдяки хімічній взаємодії між компонентами клейової композиції та деревини, а довговічність залежить від процесів деструкції та старіння клеїв. Міцність клейових з'єднань деревини з використанням термопластичних клеїв формується, переважно, завдяки міжмолекулярній взаємодії, а довговічність пов'язана з напружено-деформаційним станом клейових з'єднань.

Пористість деревини та її вплив на міцність і довговічність клейових з'єднань визначають співвідношення площ стінок клітин і порожнин на поверхні склеювання:

$$П = 1 - \frac{m}{d},$$

де $П$ - пористість деревини; m - товщина стінок клітин деревини; d - загальний розмір клітини (разом із порожниною). Відношення $\frac{m}{d}$ показує, яку частку займає тверда деревинна речовина; $1 - \frac{m}{d}$ - показує частку порожнин (пор), тобто пористість.

Міцність склеювання деревини повинна бути пропорційна кількості деревинної речовини, яка припадає на одиницю площі клейового шва. Відповідно, чим товстіші стінки клітин деревини, тим більше полярних груп в одиниці площі клейового шва, що взаємодіє з полярними групами клею. Пряма залежність між границею міцності на сколювання по клейовому шву.

$$\sigma = a - b \cdot П,$$

де σ – границя міцності склеювання;

a – емпіричний коефіцієнт (максимальна теоретична міцність при нульовій пористості);

b – коефіцієнт, що показує, наскільки пористість знижує міцність;

$П$ – пористість деревини.

Зі збільшенням пористості ($П$) міцність склеювання (σ) зменшується лінійно. Це логічно, бо при більшій кількості пор на поверхні менше «суцільної» деревинної речовини для взаємодії клею з клітинними стінками.

Список посилань

1. Міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань деревини [Текст]: монографія/ Богдан Кшивецький, Іван Тивунька; Нац. лісотехн. ун-т України. - Львів: Галицька видавнича спілка, 2018.

2. Б. Я. Кшивецький, Г. М. Дацків, Андрашек Й.В. Загальні відомості про клеї, склеювання та термічно модифіковану деревину Й. В. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук-техн. праць. Львів: РВВ НЛТУ України. 2019. Т. 29, №3 С. 81-85. <https://doi.org/10.15421/40290317>

3. Тлумачний словник з деревооброблення / уклад.: Б. Прокопович, І. Войтович, С. Гайда, Б. Кшивецький. – Львів.: Ромус-Поліграф, 2002. – 280 с.

УДК 684:674.059

Чорнобай Л. В., аспірантка

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, chornobai_liubov@nltnu.edu.ua

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТВЕРДІННЯ ОЛІЙНИХ ПОКРИТТІВ ДЕРЕВИНИ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ UV-LED ТЕХНОЛОГІЙ

Використання натуральних рослинних олій для захисту деревини відповідає принципам сталого розвитку та екологічної безпеки. Проте традиційна технологія формування олійних покриттів базується на тривалій окислювальній полімеризації. Процес окислювальної полімеризації триває від 24 до 72 годин, що зумовлює виникнення виробничих «вузьких місць»: вимагає значних площ для проміжного зберігання виробів, призводить до заморожування обігового капіталу в незавершеному виробництві та унеможлиблює реалізацію концепції «Just-in-Time» (якраз вчасно). Окрім цього, тривале витримування деталей у виробничих приміщеннях підвищує ризики забруднення плівки пилом та механічного пошкодження поверхні [1]. Інтенсифікація цього процесу можлива завдяки поєднанню хімічної модифікації олійного середовища та застосуванню енергоефективних джерел ультрафіолетового випромінювання на основі світлодіодів (UV-LED). Важливим є встановлення синергічної залежності між ступенем акрилювання тригліцеридів рослинних олій та кінетикою фотополімеризації при монохроматичному випромінюванні, а також доведенні термозберігаючого впливу UV-LED випромінювання на лігноцелюлозну матрицю (температура поверхні не перевищує 29°C), що виключає деструкцію екстрактивних речовин і зміну природного кольору деревини [2,3].

Для забезпечення високої швидкості структуроутворення під дією УФ-випромінювання, ляна олія піддається функціоналізації шляхом введення реакційноздатних акрилатних груп (процес отримання ALO – Acrylated Linseed Oil). Це дає змогу змінити механізм твердіння з повільного окисного на швидкий радикальний, де швидкість реакції вимірюється секундами. Математичне представлення ступеня конверсії подвійних зв'язків ($DCC = C$) описується через зміну інтенсивності абсорбційної смуги акрилатних груп (S. Briede, T. Viemans та ін.) [4]. Дослідження свідчать, що при використанні ALO конверсія досягає 80–98% протягом 3–5 секунд опромінення [4,5]. Оскільки UV-LED лампи мають вузький спектр випромінювання (піки 365, 385 або 395 нм), необхідно використовувати спеціалізовані фотоініціатори [2,3]. Найбільшу ефективність демонструють похідні ацилфосфіноксидів, які забезпечують глибоке твердіння навіть у пігментованих системах.

Впровадження світлодіодних технологій у процеси фінішного оброблення деревини забезпечує зниження енергоспоживання на 50–70% порівняно з ртутними лампами завдяки відсутності фази розігріву та можливості миттєвого ввімкнення. Відсутність потужного інфрачервоного випромінювання запобігає деформації деталей та виділенню смол, що особливо важливо для оздоблення виробів із хвойних порід деревини та тонкого шпону. Окрім того, LED-модулі не містять ртуті та не генерують озон, що суттєво підвищує екологічну безпеку виробництва.

Попередні дослідження свідчать, що при потужності UV-LED 8–12 Вт/см² повне твердіння покриття на основі модифікованої олії досягається при швидкості конвеєра з деталями 5–10 м/хв [6]. Це забезпечує необхідний час експозиції для повного структуровання олійного шару та досягнення високої адгезії до деревини. Отримані покриття характеризуються високою адгезією до підкладки, покращеною твердістю за маятниковим приладом [7,8] та високою стійкістю до побутових рідин.

Висновки. Застосування енергоефективних УФ-LED технологій у поєднанні з модифікованими рослинними оліями дозволяє скоротити виробничий цикл фінішного оброблення деревини в десятки разів. Це забезпечує високу якість захисно-декоративного

шару при суттєвому зниженні собівартості продукції та мінімізації техногенного впливу на довкілля.

Список посилань

1. Prieto J. Wood Coatings: Chemistry and Practice / J. Prieto, J. Kiene. – Hanover : Vincentz Network GmbH & Co. KG, 2018. – 396 p.
2. Kiyoi E. Wood Coating with UV-LED Curing: A Focus on Heat / E. Kiyoi // RadTech Report. – 2014. – Vol. 28, No. 2. – P. 34 – 41.
3. Landry V. UV-LED curing efficiency of wood coatings / V. Landry, P. Blanchet, P. Mouras // Coatings. – 2015. – Vol. 5, Is. 4. – P. 1019–1033. – DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings5041019>.
4. Briede S. Tailored UV-curable Acrylated Linseed Oil-Based Alkyds: Optimizing Crosslinking and Coating Performance through Functionalization and Reactive Diluent Design / S. Briede, T. Biemans, O. Platnieks, S. Gaidukovs // Polymer. – 2025. – Vol. 323. – Art. 128227. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128227>.
5. Wang W. Research Progress on Vegetable Oil-Based UV-Curing Resins / W. Wang, Z. Hu, W. Lei // Polymers. – 2025. – Vol. 17, Is. 14. – Art. 1890. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17141890>.
6. Henke M. Mechanical and Chemical Resistance of UV Coating Systems Prepared under Industrial Conditions Using LED Radiation / M. Henke, B. Lis, T. Krystofiak // Polymers. – 2023. – Vol. 15, Is. 23. – Art. 4550. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15234550>.
7. Яремчук Л. А. Дослідження фізико-механічних властивостей захисно-декоративних покриттів на основі модифікованих олій / Л. А. Яремчук, Л. В. Хмарик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2013. – Вип. 143. – С. 119 – 125.
8. ДСТУ ISO 1522:2015. Фарби та лаки. Визначення твердості за маятниковим приладом (ISO 1522:2006, IDT). – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 12 с. (Національний стандарт України).

УДК 674.047

Губер Ю.М., канд. техн. наук, доцент
Копинець З.П., канд. техн. наук, доцент
Гуменюк Ж.Я., асистент
Рокунь Р.О., канд. техн. наук, асистент

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, tlsdbv@nltu.edu.ua

ЩОДО ТРИВАЛОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗАГОТОВОК З ДЕРЕВИНИ ДУБА

З точки зору планування роботи деревообробного підприємства важливим є прогнозування тривалості сушіння, а відтак продуктивності сушильних камер. На виробництві для сушіння заготовок в основному застосовують конвективні сушильні камери [1-3], також зустрічається застосування і вакуумно-конвективних камер [3,4].

На тривалість процесу сушіння заготовок мають вплив низка чинників, зокрема спосіб сушіння, порода деревини, їхні розміри, початкова і кінцева вологість, параметри режиму сушіння (температура і відносна вологість повітря), швидкість руху агента сушіння [2,3,5]. Враховуючи це виникає потреба в дослідженні різних процесів сушіння для їхнього подальшого вдосконалення. Метою цього дослідження є встановлення тривалості процесу конвективного і вакуумно-конвективного сушіння заготовок з деревини дуба звичайного.

Експериментальні дослідження проводили у виробничих умовах висушуючи заготовки пиляні з деревини дуба розміром 50×50×1000 мм. Початкову абсолютну вологість деревини визначали за допомогою кондуктометричного вологоміра Logica LG-43, яка в середньому становила $W_p=65-75\%$. Дослідні висушування проводили у сушильних камерах місткістю приблизно 50 м³ сортиментів у конвективній фірми Katres типу KAD-1×6S та вакуумно-конвективній фірми Hildebrand-Brunner. Штабелі формували розміром 1200×1200×1000 мм з використанням прокладок завтовшки 22 мм. У ці камери було завантажено по 72 шт. штабелів. Задана кінцева вологість становила $W_k=8\%$.

Для сушіння заготовок застосовували багатоступеневі режими, які містили операції початкового прогрівання, сушіння, кінцевої тепловологообробки (кондиціювання) та охолодження. За конвективного способу температура агента сушіння на першому ступені режиму становила $t_c=33\text{ }^{\circ}\text{C}$, рівноважна вологість – $W_p=16\%$; на останньому ступені режиму сушіння температура агента сушіння становила $t_c=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, а градієнт сушіння – $TG=2,4$. За вакуумно-конвективного способу температура агента сушіння на першому ступені режиму становила $t_c=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, рівноважна вологість – $W_p=14\%$; на останньому ступені режиму температура агента сушіння становила $t_c=63\text{ }^{\circ}\text{C}$, а рівноважна вологість – $W_p=5,4\%$.

У результаті обробки експериментальних даних встановлено, що тривалість операції сушіння у конвективній сушильній камері становила $t_{o.c.}=1742$ год (рис. 1), а у вакуумно-конвективній – $t_{o.c.}=834$ год (рис. 2).

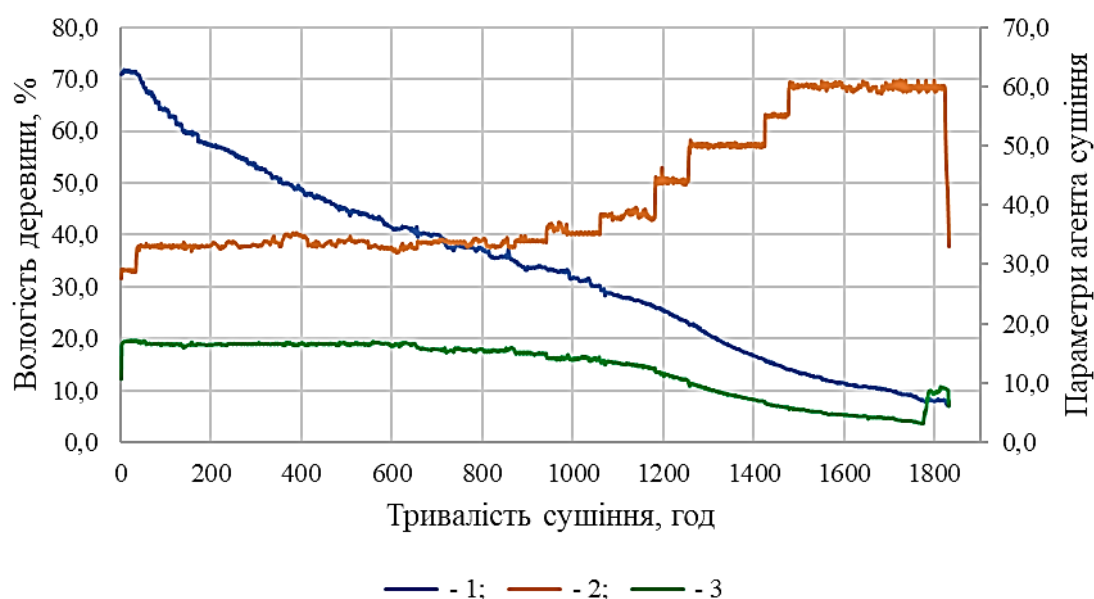


Рис. 1 – Процес сушіння заготовок з деревини дуба у конвективній сушильній камері: 1 – крива сушіння; 2 – температура агента сушіння; 3 – відносна вологість агента сушіння

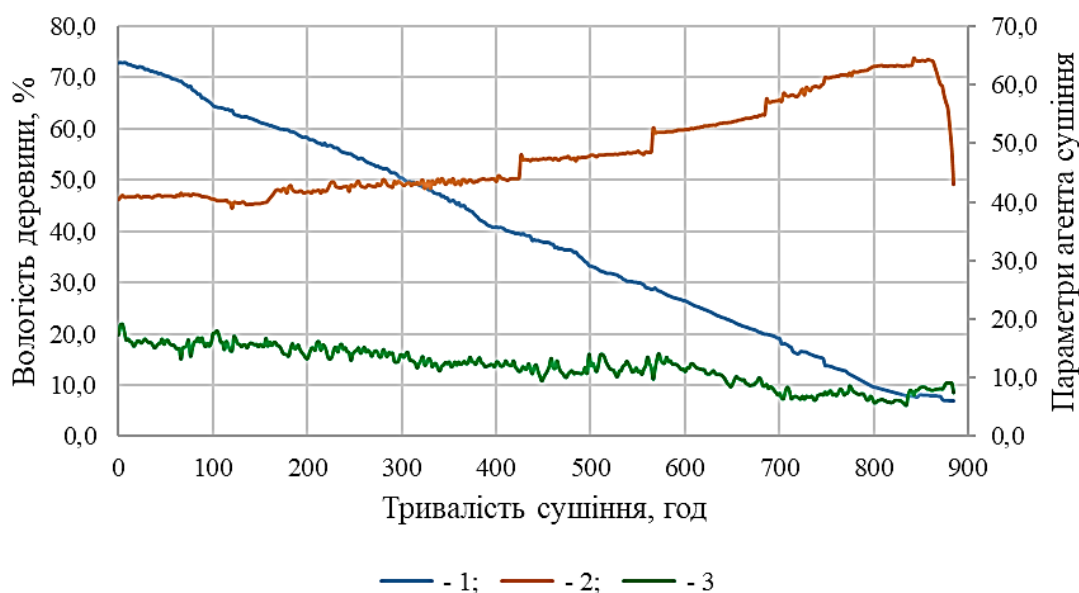


Рис. 2 – Процес сушіння заготовок з деревини дуба у вакуумно-конвективній сушильній камері: 1 – крива сушіння; 2 – температура агента сушіння; 3 – відносна вологість агента сушіння

Для кожного ступеню режиму сушіння встановлено коефіцієнт сушіння за формулою:

$$K = \frac{\ln((W_{\Pi} - W_p)/(W_k - W_p))}{\tau_{c.c.}}, 1/c,$$

де W_{Π} – початкова вологість деревини на відповідному ступені режиму сушіння, %;
 W_k – кінцева вологість деревини на відповідному ступені режиму сушіння, %;
 W_p – рівноважна вологість деревини на відповідному ступені режиму сушіння, %;
 $\tau_{c.c.}$ – тривалість сушіння на відповідному ступені режиму сушіння, с.

Середній коефіцієнт сушіння у конвективній сушильній камері становив $K=0,595 \cdot 10^{-6}$ 1/с, а у вакуумно-конвективній – $K=1,409 \cdot 10^{-6}$ 1/с.

Як видно з рис. 1 і 2, у вакуумно-конвективній сушильній камері температура агента сушіння підтримувалась трохи вищою, ніж у конвективній камері. Рівноважна вологість деревини утримувалася на дещо нижчому рівні у вакуумно-конвективній порівняно з конвективною камерою. Відомо, що зі зменшенням тиску середовища температура кипіння води знижується [2]. Тому, за малої різниці в температурах застосовуваних режимів у досліджуваних камерах у вакуумно-конвективній камері процес відбувається значно інтенсивніше і його тривалість була майже у два рази меншою. З точки зору продуктивності сушильних камер, це позитивний момент, однак якість висушування у вакуумно-конвективній сушильній камері є нижчою ніж у конвективній [4].

Висновок. Отримані результати сприятимуть удосконаленню технології сушіння заготовок з деревини дуба для дотримання високих стандартів якості готової продукції.

Список посилань

1. Білей П.В. Дослідження тривалості процесу сушіння пиломатеріалів понижених товщин багатоступеневими режимами у виробничих умовах / П.В. Білей, Ю.М. Губер, З.П. Копинець // Науковий вісник. Львів, НЛТУ України. – 2011. – Вип.21.1. – С. 99-103. Режим доступу: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_1/99_Bil.pdf
2. Білей П. Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини (Монографія) / П. Білей. – Коломия: Вік, 2005. – 364 с.
3. Brunner-Hildebrand. Die schnittholz Trocknung. 5 AUFLAGE. Buchdruckwerkstätten Hannover GmbH, 1987. – 322 s.
4. Губер Ю.М. Дослідження якісних характеристик дубових заготовок висушених в різного типу сушильних камерах / Ю.М. Губер, З.П. Копинець, О.І. Олійчук, Ж.Я. Гуменюк, Ю.В. Рубінський // Наукові праці Лісівничої академії наук України : збірник наукових праць. – Львів: Видавництво «Компанія “Манускрипт”». – 2025. – Вип. 28. – С. 229-240. DOI: <https://doi.org/10.15421/412517>
5. Губер Ю.М. Аналіз методів визначення тривалості сушіння соснових необрізних пиломатеріалів / Ю.М. Губер, З.П. Копинець, Ю.Р. Дадак, Ж.Я. Гуменюк // Наукові праці Лісівничої академії наук України : збірник наукових праць. – Львів: Видавництво «Компанія “Манускрипт”». – 2020. – Вип. 20. – С. 214-221. DOI: <https://doi.org/10.15421/412020>

УДК 674.21

Ференц А.О., аспірант
 Лань В.М., аспірант
 Деркач Д.В., аспірант

Рокунь Р.О., канд. техн. наук, асистент

Національний лісотехнічний університет України, м.Львів, tlsdbv@nltu.edu.ua

НОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИТРАТ ДЕРЕВИНИ У СТОЛЯРНО-БУДІВЕЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Столярно-будівельні вироби за функціональними особливостями поділяють на віконні блоки, дверні блоки, покриття підлоги та вироби для облаштування інтер'єру [1].

Розмежування столярно-будівельних виробів за їх функціональними характеристиками сприяє кращому розумінню особливостей визначення норм витрати деревини для їхнього виробництва. Це зумовлено тим, що столярно-будівельні вироби мають свої конструкційні особливості, які необхідно враховувати, оскільки вони впливають на витрати сировини і матеріалів, а також те, що для виготовлення цих виробів застосовують різний перелік деревообробного обладнання. У процесі розроблення методики встановлення норм витрат деревини необхідно враховувати увесь виробничий процес: від розпилювання пиловної сировини на пиломатеріали до отримання готової продукції. Це дасть змогу оцінити використання деревини комплексно, охоплюючи всі етапи технологічного циклу створення столярно-будівельних виробів (рис. 1).



Рис. 1. – Загальна схема встановлення норм витрати деревини у столярному виробництві

Нормування витрат деревини у столярному виробництві полягає у визначенні діапазону допустимої кількості сировини для виготовлення одиниці продукції. Ускладнення встановлення норм відбувається через значну варіабельність поширення вад (ознак) деревини. Звичайно, що чим нижчий клас якості пиловної сировини, тим вищим буде коефіцієнт витрат і нижча якість пилопродукції. Збільшення кількості вад (сучків, тріщин, пожолобленість, несправжнє ядро, гнилизна тощо) призводить до зростання обсягу відходів у процесі розкрою пиломатеріалів, а відповідно – збільшує коефіцієнт витрат деревини. На коефіцієнт витрат деревини впливає багато чинників, зокрема: метод розкрою пиломатеріалів (груповий, індивідуальний); точність роботи обладнання, особливо в умовах запровадження верстатів з ЧПУ [2] та ін. Розмірно-якісна характеристика заготовок для столярно-будівельних виробів також має вплив на коефіцієнт витрат деревини, оскільки чим нижчі вимоги до них і чим відносно невеликі розміри, тим вищий коефіцієнт їхнього виходу, оскільки заготовки невеликих розмірів легше випилити між вадами деревини [3].

На етапі обліку пиловної сировини важливо встановити клас її якості, переважно це відбувається за візуальними ознаками, а також встановити сорт отриманих пиломатеріалів [4, 5].

Коефіцієнт витрати вхідного матеріалу (матеріал до його обробки) на вихідний матеріал (матеріал після його обробки) визначають за формулою:

$$K_p = \frac{100}{P_o}, (1)$$

де P_o – об’ємний вихід матеріалу (дошок з колод, заготовок з дошок, струганих заготовок з пиляних) %.

На підприємствах послідовність технологічних операцій на етапі виготовлення пиляних заготовок є різною. Це зумовлено доступністю того чи іншого виду сировини – заготовки, обрізні чи необрізні дошки та спроможностей сушильного господарства підприємства. Важливим чинником впливу на норму витрати деревини є місце процесу сушіння у технологічному процесі – сушіння пиломатеріалів перед їхнім розкромом на заготовки або сушіння заготовок після розкрою сирих пиломатеріалів. Ефективність того чи іншого технологічного процесу з точки зору використання сировини та енергетичних ресурсів на цей час не обґрунтована. Тому потрібно розглядати різні варіанти технологічних процесів, які використовують на деревообробних підприємствах.

Для прикладу, розглянемо розпилювання соснових колод діаметром 30-46 см довжиною 5 м на пилорамі на необрізні дошки товщиною 25 мм і 40 мм у співвідношенні 21,2 % дошок товщиною 25 мм та 78,8 % дошок товщиною 40 мм. Норма витрати колод класу якості А становила 1,376 м³/м³, при розпилюванні колод класу якості В – 1,403 м³/м³, при розпилюванні колод класу якості С – 1,467 м³/м³, при розпилюванні колод класу якості D – 1,572 м³/м³.

Встановлені науково обґрунтовані коефіцієнти витрат деревини дадуть змогу забезпечити раціональне планування виготовлення пилопродукції для виробництва столярно-будівельних виробів.

Список посилань

1. Ференц А.О. Щодо нормування витрати деревини у виробництві столярно-будівельних виробів / А.О. Ференц, З.П. Копинець // Матеріали тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (м. Чернігів, 22–23 травня 2025 р.) : у 2 т. – Чернігів: ЧНТУ, 2025. – Т. 1. – С. 180. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
2. Барабаш Р.Г. Перспективи розвитку столярно-будівельних виробництв в сучасних умовах України / Р.Г. Барабаш, А.А. Калина, Є.М. Миськів // Матеріали тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (м. Чернігів, 22–23 травня 2025 р.) : у 2 т. – Чернігів: ЧНТУ, 2025. – Т. 1. – С. 209-210. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
3. Маєвський В.О. Дослідження витрати дубових сирих необрізних пиломатеріалів на вихід чорнових заготовок для клеєних щитів / В.О. Маєвський, С.В. Копинець, Р.О. Мороз // Лісотехнічна освіта і наука: виклики сьогодення та перспективи розвитку. Міжнародна науково-практична конференція, 23-25 жовтня 2024 року, м. Львів, Україна. – 3 с. DOI: <https://doi.org/10.36930/conf150.3.6>
4. Маєвський В.О. Оцінювання витрати букової пиловної сировини на виготовлення чорнових заготовок із заданими розмірно-якісними характеристиками / В.О. Маєвський, З.П. Копинець, О.Б. Ференц, Є.М. Миськів, М.М. Федик // Наукові праці Лісівничої академії наук України : збірник наукових праць. – Львів: Видавництво «Компанія “Манускрипт”». – 2021. – Вип. 22. – С. 227-234. DOI <https://doi.org/10.15421/412121>
5. Маєвський В.О. Аналіз об’ємного виходу пиломатеріалів з урахуванням класів якості пиловної сировини В.О. Маєвський, О.Б. Ференц, З.П. Копинець, Й.В. Андрашек, О.М. Маєвська // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість : міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів: НЛТУ України. – 2019. – Вип. 45. – С. 104-110. DOI: <https://doi.org/10.36930/42194513>

УДК 674.06

Удовицька М.В., аспірантка

Копинець С.В., аспірант

Маєвський В.О., докт. техн. наук, професор

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, tlsdbv@nltu.edu.ua**ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ КЛЕЄНИХ ЩИТІВ**

В основі будь-якого виробництва лежить економічна доцільність. Проте сучасні реалії, зокрема стан довкілля, вимагають зважати і на екологічність продукції [1]. Попри те, що деревина є екологічно чистою сировиною, ці вимоги поширюються і на готові вироби з неї. Тобто до виготовлення деревообробної продукції варто підходити як з економічного, так і з екологічного поглядів. Проте ці критерії часто суперечать один одному: екологічні рішення не завжди є рентабельними, а економічно вигідні – не завжди екологічно безпечними. Розглянемо еколого-економічні аспекти виробництва клеєних щитів – напівфабрикатів, що використовуються для виготовлення меблевих та столярних виробів.

Організація виробничого процесу на підприємствах із виготовлення виробів з деревини може базуватися як на переробленні лісоматеріалів, так і на використанні пиломатеріалів [2, 3]. Для цілісного розуміння процесу варто враховувати повний цикл, починаючи з первинного перероблення лісоматеріалів (колод). Оскільки пиломатеріали, що надходять на підприємство, виготовляють із колод, етап їхнього випилювання також супроводжується споживанням ресурсів, хоча на самому підприємстві пиломатеріали використовують вже як напівфабрикат.

Виробничий процес складається з таких основних технологічних етапів: розпилювання колод на пиломатеріали, сушіння пиломатеріалів (заготовок) та їх розкрій (ці два етапи можуть змінювати послідовність залежно від організації виробництва), стругання заготовок, зрощення за довжиною (у разі виготовлення зрощеного щита), технологічна витримка, стругання зрощених заготовок, набір і склеювання щита, а також кінцева обробка (шліфування-калібрування й обробка по периметру). На кожному етапі використовують як енергетичні, так і трудові ресурси, що безпосередньо впливає на економічну ефективність підприємства. Окрім цього, виробництво клеєних щитів чинить певний негативний вплив на навколишнє середовище (рис. 1).

Економічну модель виробництва клеєних щитів представимо у вигляді:

$$B_C + B_M + B_{з.п} + B_{ел.ен} + B_{н.в.} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де B_C – вартість сировини;

B_M – вартість матеріалів;

$B_{з.п.}$ – заробітна плата;

$B_{ел.ен}$ – вартість електроенергії;

$B_{н.в.}$ – накладні витрати.

Екологічну модель виробництва клеєних щитів представимо у вигляді:

$$Вп_{з.с} + Вп_{в.м} + Вп_{д.л} + Вп_{в.ел.ен} + Вп_{н.в.} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $Вп_{з.с.}$ – вплив заготівлі сировини на навколишнє середовище;

$Вп_{в.м.}$ – вплив виготовлення матеріалів;

$Вп_{д.л.}$ – вплив діяльності людей;

$Вп_{в.ел.ен}$ – вплив виготовлення електричної енергії;

$Вп_{н.в.}$ – вплив інших чинників.

Впровадження екологічних стандартів, безпечних клеїв, матеріалоощадних та енергоощадних технологій значно знижує негативний вплив на довкілля будь-якого виробництва.

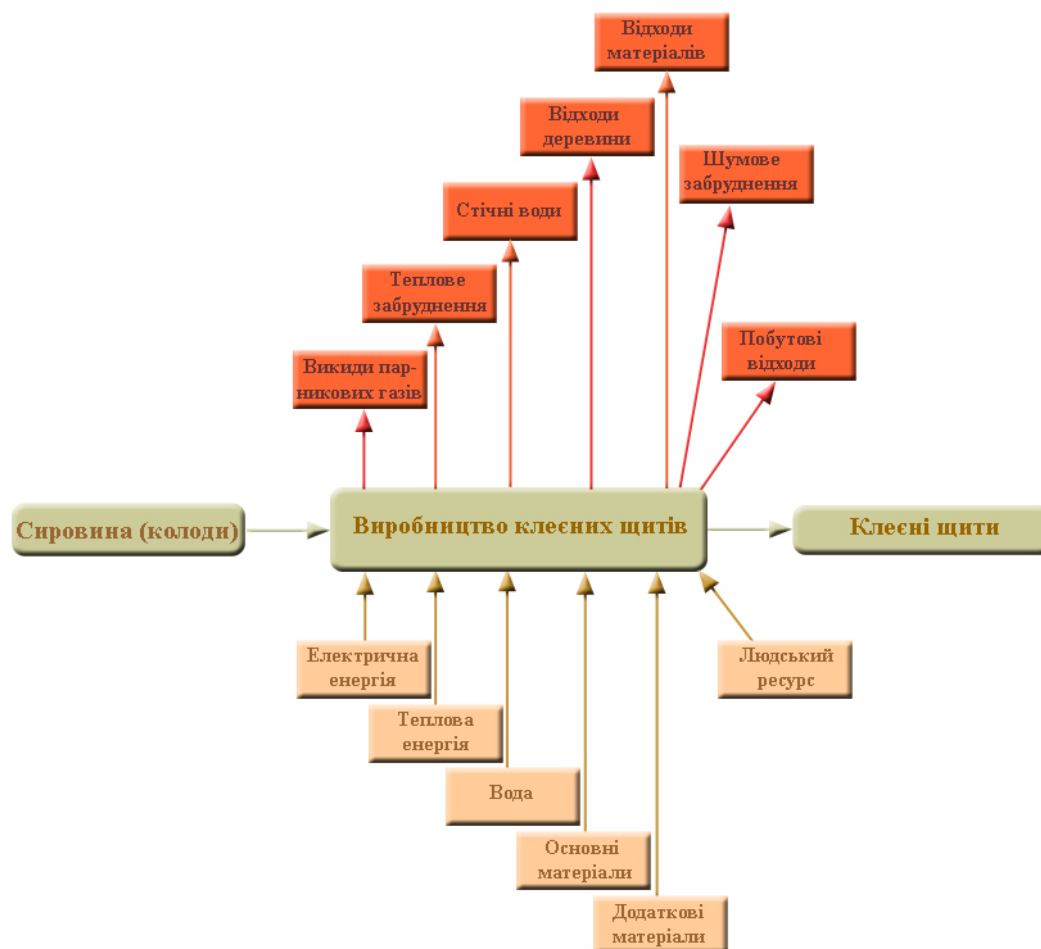


Рис. 1. – Схема витрат на виробництво і відходів виробництва клеєних щитів

Висновок. Дослідження виробничого циклу виготовлення клеєних щитів підтверджує необхідність інтеграції екологічних критеріїв у традиційну модель економічної доцільності. Розроблені економічна та екологічна моделі наочно відображають взаємозв'язок між споживанням ресурсів на кожному технологічному етапі та відповідним навантаженням на довкілля. Досягнення синергетичного ефекту між ними потребує комплексного підходу: від оптимізації перероблення лісоматеріалів до раціонального використання енергетичних і трудових ресурсів. Саме така стратегія забезпечить довгострокову конкурентоспроможність підприємства в умовах сучасних екологічних вимог.

Список посилань

1. Кійко О.А. Екологічний слід від діяльності деревообробного підприємства: оцінювання впливу та шляхи мінімізації / О.А. Кійко, М.М. Ільків, О.Р. Пелюх, І.П. Соловій, Т.О. Челепіс, В.В. Лавний, Д.Б. Савка, А.О. Луценко // Науковий вісник. Львів, НЛТУ України. – 2025. – Вип.35.1. – С. 68-75. DOI: <https://doi.org/10.36930/40350109>
2. Маєвський В.О. Визначення витрати дубових сухих обрізних пиломатеріалів на виготовлення клеєних щитів / В.О. Маєвський, Р.О. Мороз, С.В. Копинець, О.Б. Ференц, Р.Б. Щупаківський, Є.М. Миськів // Наукові праці Лісівничої академії наук України : збірник наукових праць. – Львів: Видавництво «Компанія “Манускрипт”». – 2024. – Вип. 27. – С. 181-188. DOI: <https://doi.org/10.15421/412425>
3. Маєвський В.О. Оцінювання витрати букової пиловної сировини на виготовлення чорнових заготовок із заданими розмірно-якісними характеристиками / В.О. Маєвський, З.П. Копинець, О.Б. Ференц, Є.М. Миськів, М.М. Федик // Наукові праці Лісівничої академії наук України : збірник наукових праць. – Львів: Видавництво «Компанія “Манускрипт”». – 2021. – Вип. 22. – С. 227-234. DOI: <https://doi.org/10.15421/412121>

УДК 674.09

Завацький Р.Я., аспірант

Іванина В.В., аспірант

Копинець З.П., канд. техн. наук, доцент

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, 25zavatskyi.r@nltu.lviv.ua

ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ОЩАДЛИВОГО ВИРОБНИЦТВА У ЛІСОПИЛЯННІ

Ощадливе виробництво – це концепція, спрямована на зниження собівартості продукції без втрати її якості [1]. Цей підхід успішно поширюється і на підприємства деревообробної промисловості. Згідно з цією концепцією, варто виділити 8 основних видів виробничих втрат: 1) зайве транспортування – на лісопиляльному виробництві необхідно оптимізувати логістичні потоки так, щоб уникати зворотних рухів і зайвих переміщень предметів праці (колод, дощок), незавершеного виробництва та готової продукції; 2) надлишкові запаси – зважаючи на специфіку зберігання деревини та ризик погіршення її якості, обсяги лісоматеріалів на складах пиловної сировини мають бути збалансованими – достатніми для безперебійної роботи, але не надмірними; 3) зайві рухи – нераціональні рухи операторів та хаотичне налаштування обладнання спричиняють втрати часу, що безпосередньо підвищує собівартість продукції; 4) очікування – виникає через простой обладнання або незбалансованість міжопераційних запасів, що вимагає постійного моніторингу та синхронізації технологічних процесів; 5) перевиробництво – обсяг випуску пилопродукції має чітко відповідати внутрішнім потребам підприємства або замовленням клієнтів. Тут важливою є оптимізація плану розпилювання, яка запобігає надмірному випуску одних типорозмірів за рахунок дефіциту інших. Цей вид втрат є найнебезпечнішим, оскільки непродана продукція заморожує кошти та потребує додаткових витрат на зберігання й облік; 6) технологія – пов'язана з випадками, коли технологія не дає змоги повною мірою реалізувати вимоги споживача, або коли точність роботи колодопиляльного обладнання є недостатньою. Це призводить до відхилень від номінальних розмірів, визначених стандартами чи контрактами, і спричиняє рекламації щодо розмірно-якісних характеристик; 7) дефекти – у лісопилянні на якість готових пиломатеріалів впливає як низька якість вихідної сировини, так і дефекти механічної обробки (сколи, вириви тощо), які призводять до перевитрати деревини; 8) невикористаний потенціал працівників – виникає тоді, коли ідеї, навички чи знання персоналу не залучаються ефективно. Одним із чинників цього є недостатній рівень фахової освіти або консерватизм керівного складу, що безпосередньо гальмує підвищення ефективності виробництва.

Загалом, виробничий процес лісопиляльного виробництва включає етапи зберігання і підготовки колод до розпилювання, процес розпилювання колод на пилопродукцію, а також сушіння, сортування та зберігання пилопродукції. Для прикладу, досвід вітчизняних підприємств із виготовлення дерев'яної тари (зокрема піддонів) свідчить, що їхній технологічний цикл зазвичай починається саме з розпилювання колод, тому лісопиляльні цехи є невід'ємною складовою їхньої структури.

Оптимальне використання пиловної сировини дає змогу заощаджувати не лише матеріальні, а й енергетичні та трудові ресурси. З огляду на це, дослідження технологічних процесів розпилювання пиловної сировини на пилопродукцію для побудови оптимального плану розпилювання завжди залишається актуальним.

Список посилань

1. Гавловська Н., Кривдик М., Рудніченко Є., Зацерковний В. Сучасні технології управління ресурсами промислових підприємств на засадах ощадливого виробництва / Н. Гавловська, М. Кривдик, Є. Рудніченко, В. Зацерковний // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – 2022. – № 5. Том 1. – С. 298–302. DOI: 10.31891/2307-5740-2022-310-5(1)-49.

УДК 662.6/8:631.17

Гасій О.Б., докт. техн. наук, доцент
Гончар І.М., канд. техн. наук, доцент
Степанишин В.І., канд. техн. наук, доцент
Шпуляр Ю.С., докт. філ.

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, gonchar0405@ukr.net

АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИН ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

Подрібнення деревної біомаси є одним із ключових етапів у її переробці та подальшому використанні в різних галузях промисловості. Цей процес відіграє важливу роль у лісовому господарстві, меблевій промисловості, виробництві будівельних матеріалів, а також у сфері біоенергетики

Машини для подрібнення деревини, які ще називають дробарками або шредерами, вирізняються різноманітністю конструктивних особливостей, принципами роботи, рівнем продуктивності та енергоефективністю. Залежно від призначення вони можуть бути стаціонарними або мобільними, дисковими чи барабанними, з різними типами ріжучих органів. Дробарки успішно переробляють широкий спектр матеріалів: гілки різної товщини, стовбури дерев, дошки, рейки, коріння, пеньки, а також інші деревні відходи, що утворюються під час заготівлі лісу, деревообробки чи будівельних робіт.

Основним завданням подрібнення є отримання однорідної сировини для подальшого використання. Подрібнена деревна біомаса перетворюється на паливні гранули (пелети), деревні брикети, технологічну тріску або дрібну тирсу. Ця продукція широко застосовується в біоенергетиці для виробництва теплової та електричної енергії, а також у целюлозно-паперовій промисловості, виробництві плитних матеріалів (ДСП, ДВП, OSB) і навіть у ландшафтному дизайні як мульча.

Особливої популярності в останні роки набули мобільні дробарки. Вони дозволяють проводити подрібнення біомаси безпосередньо на місці заготівлі або лісозаготівельних ділянках. Такий підхід значно підвищує загальну ефективність технологічного процесу, оскільки усуває необхідність транспортування великогабаритних деревних відходів на великі відстані.

Сучасний розвиток машин для подрібнення деревної біомаси характеризується кількома важливими тенденціями. По-перше, активно впроваджуються автоматичні системи управління та моніторингу. Вони дозволяють оператору в реальному часі контролювати параметри роботи обладнання, регулювати швидкість подачі матеріалу, ступінь подрібнення та навантаження на двигун. Завдяки цьому підвищується точність процесу, зменшується ймовірність поломок

По-друге, велику увагу приділяють підвищенню енергоефективності. Виробники постійно працюють над оптимізацією конструкцій дробарок, зменшенням маси рухомих частин, використанням сучасних економічних двигунів з низьким рівнем споживання пального та систем рекуперації енергії. Це дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати.

По-третє, активно застосовуються нові, зносостійкі матеріали для виготовлення ріжучих елементів (ножів, молотків, дисків). Використання високолегованих сталей, титанових сплавів, твердосплавних напайок та спеціальних покриттів значно подовжує термін служби робочих органів, зменшує частоту їх заміни та скорочує простой обладнання. Крім того, сучасні дробарки оснащуються системами автоматичного заточування ножів та захисту від сторонніх предметів (металу, каміння), що підвищує безпеку роботи та надійність машини в цілому.

Робочі органи машин для подрібнення деревної біомаси різняться за конструкцією та матеріалами залежно від типу обладнання та умов експлуатації.

Основні типи дробарок :

1. Дискові подрібнювачі:
 - Робочий орган: ріжучі ножі, закріплені на диску.
 - Матеріали ножів: високоякісна легована або інструментальна сталь (HSS, 65Г, X12МФ) із термообробкою.
 - Матеріал диска: конструкційна або високоміцна сталь.
2. Барабанні подрібнювачі:
 - Робочий орган: ножі, розташовані на обертовому барабані.
 - Матеріали ножів: зносостійка сталь (X12МФ, 9ХС, 65Г).
 - Матеріал барабана: конструкційна сталь (45, 40Х).
3. Роторні молоткові подрібнювачі (шредери, молоткові дробарки):
 - Робочий орган: молотки або бітери, встановлені на роторі.
 - Матеріали молотків: марганцевмісна або загартована сталь (110Г13Л, 40Х).
 - Матеріал ротора: зносостійка або конструкційна сталь.
4. Гвинтові (шнекові) подрібнювачі:
 - Робочий орган: конічний або циліндричний шнек із ріжучими гранями.
 - Матеріали шнека: загартована інструментальна сталь (X12Ф, 9ХС).
5. Валкові подрібнювачі:
 - Робочий орган: валки із зубцями або ріжучими сегментами.
 - Матеріали валків: конструкційна або легована сталь (45, 40Х).
 - Матеріали ріжучих сегментів: зносостійка сталь (X12МФ, 9ХС).

Як показує аналіз у всіх конструкціях дробарок матеріалом для різальних ножів в основному використовуються такі матеріали як леговані сталі X12МФ, 9ХС, 65Г.

Підвищення зносостійкості ножів є комплексним завданням, яке включає: застосування передових технологій термообробки та покриттів, інноваційні методи обробки поверхонь для зменшення тертя та зносу. Такий підхід забезпечує ефективне використання ресурсів, зниження витрат на обслуговування та підвищення продуктивності галузі.

Висновок. Машини для подрібнення деревної біомаси є невід'ємною частиною лісопереробної та біоенергетичної галузей. Їхня ефективність залежить від конструктивних рішень, матеріалів робочих органів і технологій виробництва. Подальший розвиток галузі передбачає інтеграцію інноваційних матеріалів для різальних ножів з покриттями, які мають підвищену зносостійкість при роботі в важких технологічних умовах. Це сприятиме підвищенню продуктивності, економічності та екологічності обладнання.

Список посилань

1. Grejtek T. Enhancing the shredder durability for biomass preprocessing utilizing wear-resistant cutter // ScienceDirect. – 2025. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X25002610>
2. Spinelli R. Managing chipper knife wear to increase chip quality and reduce chipping cost // Biomass and Bioenergy. – 2014. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953414000087>
3. Grejtek T. Improving knife milling performance for biomass preprocessing by utilizing wear-resistant blade material // Wear. – 2023. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164823000972>
4. Кравченко В. І. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та композитів на їх основі : монографія. – [К. : КНТУ], [б. р.]. – (цит. за: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/2e6b2b4c-48f6-4b84-b5f7-9a205cdd5eb8/content>).
5. Мікульонюк І. О. Стан та перспективи одержання пресованого твердого біопалива з рослинної сировини // Енергетика та автоматика. – 2022. – URL: <https://www.etars-journal.org/index.php/journal/article/download/328/267>

УДК 662.6/8:631.17-

Кузін О.А., докт. техн. наук, професор

Гончар І.М., канд. техн. наук, доцент

Здобиський А.Я., канд. техн. наук, доцент

Лучка Ю.В., аспірант

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, gonchar0405@ukr.net

СУЧАСНІ МАШИНИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ТВЕРДОЇ БІОМАСИ

Розвиток відновлюваної енергетики і глобальні екологічні виклики обумовлюють актуальність використання твердої біомаси як палива. Європейськими директивами встановлено амбітні цільові показники щодо впровадження відновлюваних джерел енергії. Економічний потенціал біомаси в Україні оцінюється у понад 26 млн т умовного палива щорічно. Це підтверджує потребу в сучасних технологіях подрібнення твердої біомаси для енергетичних цілей.

Сучасна лісозаготівля і первинна переробка деревини суттєво вирізняється не тільки використанням новітнього високопродуктивного і екологічного обладнання, але також комплексністю переробки її відходів. Їх переробка на тверді біопалива здійснюється як безпосередньо на лісосіках так і спеціалізованих підприємствах, які надають послуги постачання різних видів біопалив і при цьому гарантують їх якість і відповідність стандартам. Такі підприємства успішно працюють в Європі, США, Китаї і інших країнах, зокрема в Україні.

Продуктивність обладнання для подрібнення деревини, його енергоспоживання та якість отриманої тріски значною мірою залежать від конструкції машин. Найпоширенішими типами є дискові та барабанні подрібнювачі, в яких в якості робочих елементів використовуються ножі. Дискові агрегати застосовуються переважно для обробки тонкомірної деревини невеликого діаметра, тоді як барабанні машини підходять для обробки більших колод і можуть переробляти значні обсяги деревини. У новітніх барабанних подрібнювачах передбачена можливість змінювати розмір щепи завдяки налаштуванню параметрів ножового барабана. Мобільні дробарки на базі різноманітних тракторів, зазвичай, обладнують гідравлічними маніпуляторами, які спрощують і частково автоматизують завантаження деревної сировини. Для транспортування готової щепи з машини застосовують конвеєрні системи. Молоткові дробарки або млини, в яких подрібнення відбувається під дією ударів сталевих молотків, становлять окрему групу. Таке обладнання дозволяє отримувати дрібнозернисту фракцію, придатну для виробництва пелет або брикетів; однак воно вимагає більших енерговитрат і утворює значну кількість пилу. Деякі конструкції додатково оснащені захисними механізмами, що запобігають пошкодженню робочих частин твердими сторонніми включеннями. Одним із прикладів сучасного подрібнювального обладнання є самохідна машина Biomaster, яку виготовляє компанія «Арієс Україна». Вона комплектується двигуном Volvo потужністю 565 кВт і має два ротори. Завдяки заміні решіт або сит можна отримувати щепу різних фракцій — зокрема 0–20 мм або 20–100 мм. Крім того, агрегат обладнано системою автоматичного вилучення металевих домішок, що підвищує безпечність і стабільність його роботи.

Однією з головних вимог до сучасних машин для перероблення біомаси є висока енергоефективність. Обладнання повинно забезпечувати якомога більший обсяг переробки за мінімальних витрат електроенергії, які зазвичай оцінюють у кВт·год на тонну сировини. Для досягнення кращих показників виробники впроваджують удосконалені системи приводу, автоматизоване керування та інші інноваційні рішення. Зокрема, безредукторні електроприводи прямої дії, наприклад система HiTorg, показали високу потужність, надійність і економічність, тому їх застосовують у сучасних швидкісних щепорізах. Такі інтелектуальні приводи здатні змінювати подачу потужності відповідно до фактичного

навантаження, що дозволяє уникати зайвого споживання енергії. Якість деревної щепи визначається насамперед рівномірністю її фракційного складу та відсутністю небажаних домішок. Сучасні подрібнювачі дозволяють встановлювати бажану довжину та розмір тріски або використовувати сита для більш точного регулювання розміру частинок. Водночас велике значення має технічне обслуговування обладнання: своєчасне заточування ножів, заміна зношених деталей та контроль стану робочих вузлів допомагають підтримувати стабільну якість продукції та високу ефективність процесу подрібнення.

Основні тенденції в вдосконаленні обладнання для отримання різноманітних твердих біопалив спрямовані на підвищення ефективності та розширення їх можливостей. Розробляються ще економічніші й екологічніші агрегати – з електричними або гібридними приводами замість традиційних дизельних, із нижчим рівнем викидів і шуму. Інтеграція цифрових технологій (датчиків, систем моніторингу, IoT) дозволить створювати «розумні» подрібнювачі, які оптимізуватимуть роботу в реальному часі та спрощуватимуть діагностику. Перспективними є також спеціалізовані машини для нетипових видів біомаси (солома, енергетичні культури, обрізки дерев) та комбіновані агрегати, які суміщають збирання і подрібнення в одному процесі.

Отже, сучасні подрібнювачі твердої біомаси – це ключова ланка біоенергетичних технологій, що забезпечує ефективну переробку поновлюваної сировини на паливні матеріали при дотриманні високих вимог енергоефективності та якості. Існує широкий спектр моделей таких машин – від компактних навісних до потужних самохідних комплексів – що дозволяє оптимально обрати обладнання для різних видів сировини і масштабів виробництва. Безперервне вдосконалення конструкції, матеріалів і систем керування сприяє підвищенню продуктивності та надійності подрібнювачів, зниженню витрат енергії й розширенню сфер їх застосування в умовах переходу до сталих енергетичних систем.

Список посилань

1. Єременко О. І. Дослідження перспективної дробарки деревної біомаси для твердопаливного виробництва. Техніка та енергетика. 2020. Т. 11, № 1. С. 105–114.
2. Єременко О., Халін С., Гайдай Т., Саркісова М., Данилюк О. Аналіз перспективи застосування безрешітної молоткової дробарки для ліній твердопаливного виробництва. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб. наук. пр. 2025. Вип. 36 (50). С. 85–98.
3. Телюта Р. В., Клименко В. В., Скрипник О. В., Телюта А. В. Енергоефективність системи подрібнення твердих рослинних відходів для виробництва біопаливних пелет. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 6(37), ч. I. С. 119–126.
4. Думич В., Крупич О. Дослідження ефективності систем машин для виробництва паливної тріски на лісосіці. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб. наук. пр. 2025. Вип. 36 (50). С. 69–84.
5. Корінчук Д. М. Обґрунтування енерговитрат стадії подрібнення в технологіях виробництва біопалив. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. № 268. С. 90–99.

**СЕКЦІЯ 3.
АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ.
ГІДРАВЛІЧНІ ТА ПНЕВМАТИЧНІ СИСТЕМИ**

УДК 656.073.53

Лужанська Н.О., канд. техн. наук, доцент

Лебідь Є.М., канд. техн. наук, доцент

Лебідь І.Г., канд. техн. наук, доцент

Національний транспортний університет, м. Київ, natali.luzhanska@gmail.com

**ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАЛУЧЕННЯ ПОСЛУГ ОБ'ЄКТІВ МИТНО-
ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПРИ ВИКОНАННІ МІЖНАРОДНИХ
АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

В умовах загострення конкурентної боротьби на ринку транспортних послуг особливого значення набуває пошук раціональних підходів до транспортного обслуговування, обґрунтування транспортно-технологічних схем доставки вантажів, упровадження прогресивних форм і методів організації перевізного процесу, надання супутніх послуг, а також удосконалення чинних і розроблення перспективних технологій управління транспортним процесом. Особливу роль у зазначених процесах відіграють міжнародні автомобільні перевезення, які забезпечують високу мобільність доставки, оперативність реагування на зміни попиту та можливість організації перевезень за принципом «від дверей до дверей». Автомобільний транспорт є одним із найбільш гнучких видів транспорту, що дозволяє ефективно інтегрувати його з іншими видами перевезень у межах мультимодальних логістичних систем. Доставка вантажів у міжнародному сполученні може здійснюватися як безпосередньо вантажовласником, так і за участю посередників, що формують логістичний ланцюг. Сучасний ринок характеризується не лише значною кількістю суб'єктів транспортних послуг, які виконують аналогічні функції, а й різноманітністю організаційних форм їх діяльності, що визначає специфіку взаємозв'язків між учасниками логістичного ланцюга [1].

Міжнародні автомобільні перевезення мають стратегічне значення для розвитку зовнішньої торгівлі держави, оскільки забезпечують переміщення експортно-імпорتنих вантажів між країнами та сприяють розширенню економічних зв'язків. Їх ефективність значною мірою залежить від стану прикордонної інфраструктури, якості автомобільних шляхів, пропускної спроможності пунктів пропуску, рівня цифровізації митних процедур та гармонізації нормативно-правового регулювання з міжнародними стандартами.

Світові тенденції розвитку митно-логістичної інфраструктури орієнтовані на використання сучасних методів доставки товарів, забезпечення правомірності дій усіх учасників транспортного процесу та сприяння державних органів у формуванні позитивного іміджу України на міжнародному ринку торгівлі та послуг. В умовах активізації інтеграційних процесів особливої актуальності набувають питання забезпечення конкурентоспроможності національних підприємств. У межах програм розвитку митної інфраструктури та транспортно-логістичного комплексу доцільним є дослідження якісних і загальногосподарських показників функціонування інфраструктурних об'єктів, здатних здійснювати комплексне обслуговування учасників зовнішньоекономічної діяльності. Для підприємств, що здійснюють міжнародні автомобільні перевезення, важливими показниками є швидкість проходження кордону, собівартість рейсу, коефіцієнт використання пробігу, рівень завантаження транспортних засобів та надійність виконання графіків доставки.

Стабільний попит на митно-логістичні послуги формується за рахунок експортних та імпорتنих вантажопотоків приватного сектору. Водночас з боку держави спостерігаються такі стримувальні чинники, як дефіцит дозволів на міжнародні перевезення, недосконалість

інфраструктури, недостатня кількість сучасних стоянок і сервісних зон для вантажного транспорту, а також перешкоди у взаємодії з митними органами. У зв'язку з цим актуалізується необхідність пошуку ефективних механізмів удосконалення співпраці державного і приватного секторів у процесі реалізації зовнішньоторговельних операцій. Особливо важливим є впровадження електронного документообігу, попереднього декларування вантажів та автоматизованих систем управління чергами на кордоні.

У формуванні торговельних відносин між Україною та її потенційними партнерами важливе значення має сприйняття державної політики з боку інших країн та її відповідність міжнародним тенденціям і вимогам. Рівень довіри до України як надійного партнера у сфері зовнішньоторговельної діяльності залишається недостатнім, що зумовлює необхідність реформування внутрішньої політики держави та адаптації позитивного досвіду провідних країн світу. Наявні на території України вантажні митні комплекси істотно відрізняються за рівнем технічного, технологічного та організаційного забезпечення, особливостями формування попиту залежно від регіону розміщення і пропускної спроможності, вартістю та тривалістю обслуговування, а також спектром послуг, що надаються суб'єктам зовнішньоекономічної діяльності. В умовах постійного зростання потреб споживачів забезпечення стійких ринкових позицій і високого рівня конкурентоспроможності послуг є необхідною умовою ефективною та прибутковою діяльністю вантажних митних комплексів. Досягнення таких результатів можливе за умови систематичного моніторингу потреб наявних і потенційних споживачів митно-логістичних послуг, а також залучення додаткових інвестиційних ресурсів для модернізації та розширення інфраструктурних можливостей об'єктів. Для міжнародних автоперевізників важливим є наявність зон митного оформлення, стоянок для вантажних автомобілів, сервісного обслуговування, складів тимчасового зберігання та сучасних інформаційних систем відстеження вантажів.

Сукупний ефект від митно-логістичного обслуговування зовнішньоторговельних операцій на вантажних митних комплексах формується внаслідок взаємодії державних органів, суб'єктів ринку транспортних послуг та утримувачів відповідних комплексів. Держава зацікавлена у формуванні позитивного міжнародного іміджу, збільшенні надходжень до бюджету від сплати податків і митних платежів. Учасники ринку транспортних послуг орієнтовані на оперативне та якісне виконання зобов'язань перед контрагентами, тоді як утримувачі вантажних митних комплексів прагнуть отримання прибутку та зміцнення конкурентних позицій серед інших інфраструктурних об'єктів.

Отримані результати обумовлюють необхідність прийняття управлінських рішень, спрямованих на зростання попиту на митно-логістичні послуги вантажних митних комплексів та забезпечення їх подальшого розвитку за рахунок фінансових надходжень від господарської діяльності. Серед основних переваг такого підходу доцільно виокремити: концентрацію широкого спектра послуг у межах однієї юридичної особи, що сприятиме скороченню часу очікування обслуговування; спрощення взаємодії клієнтів із єдиним постачальником митно-логістичних послуг замість співпраці з окремими експедиторами, брокерами та складами; можливість здійснення митного оформлення в будь-якому митному режимі безпосередньо на території комплексу; збільшення попиту на послуги, що забезпечить додаткові фінансові ресурси для вдосконалення технічного, технологічного й організаційного забезпечення об'єкта інфраструктури. Для сфери міжнародних автомобільних перевезень це також означає скорочення простоїв транспортних засобів, зниження логістичних витрат, підвищення оборотності рухомого складу та покращення якості транспортного сервісу.

Список посилань

1. Полянська А. С., Мартинець В. Б., Кабан О. В. Оптимізація ланцюга постачання на підприємстві в умовах кризових явищ // Актуальні проблеми розвитку економіки регіону. - 2022. - Вип. 18(2). - С. 112-127.

УДК 621.225

Аврунін Г.А., канд. техн. наук, доцент

Мороз І.І., старший викладач

Білан І.В., аспірант

Нікітін С.А., аспірант

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, griavrunin@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ ОБ'ЄМНИХ ГІДРОПРИВОДІВ В ТРАНСМІСІЯХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСОБІВ

В трансмісіях транспортно-технологічних засобів (ТТЗ), зокрема тракторів і будівельно-дорожніх машин, мають розповсюдження механічні, гідромеханічні (гідродинамічні і двопотокові) і об'ємні (гідростатичні) трансмісії, і слід очікувати створення і поширення електромеханічних трансмісій по аналогії з автомобільними. Розглянемо конструктивні особливості трансмісій з точки зору використання в них об'ємного гідропривода (ОГП), яким згідно ДСТУ 3455.1 називається привод, до складу якого входить гідравлічний механізм з одним чи більше об'ємними гідродвигунами, призначений для передавання, керування та розподілення енергії робочої рідини під тиском.

В механічних трансмісіях, наприклад тракторів ХТЗ, застосування ОГП передбачено для перемикання передач без розриву потужності між двигуном і провідними колесами. Водій трактора важелем переміщує цапфовий гідро- розподільник подачі робочої рідини до відповідних муфт (бустерів).

Трансмісії на базі гідродинамічних передач мають комплексні гідротрансформатори з використанням кінетичної енергії робочої рідини для функціонування на режимах «гідромуфта-гідротрансформатор-блокування» і планетарні коробки передач, які повністю задовольняють тягово-швидкісні характеристики ТТЗ крім специфічного режиму ходозменшення. На такому режимі вимушені використовувати ОГП у складі «насос-гідромотор» для створення високих крутних моментів на режимах зрушування та «повзучих» швидкостей.

Гідромеханічні двопотокові безступеневі трансмісії (ГОМТ) мають механічну передачу з планетарним редуктором або коробкою передач і паралельним ОГП, гідромотор якого обертає епіциклічну шестерню. Безступеневе регулювання робочого об'єму насоса, гідромотора або обох гідромашин одночасно дає можливість забезпечити функціонування трансмісії в повному діапазоні тягово-швидкісної характеристики. Першою вітчизняною безступеневою ГОМТ з ОГП з'явилась розробка підприємством ХКБМ ім. О.О. Морозова для залізничного мотовоза МТ-1 фірми «Крокус». Успішні випробування дослідного зразка цієї трансмісії стали основою для створення вченими харківського національного технічного університету НТУ «ХП» двопотокової трансмісії для колісних тракторів харківського виробництва заводом ХТЗ. Харківським інститутом НДГідропривод була створена гідропередача ГОП-900, де вперше в вітчизняній практиці були застосовані радіальнопоршнєві гідромашини з шариками-поршнями, що дало можливість отримати ГОМТ потужністю до 900 кВт.

Незалежно від типу транспортного засобу – колісного або гусеничного, ГОМТ складається з двох контурів передачі потужності провідним маточинам від ДВЗ: механічної гілки з планетарним редуктором або коробкою передач та паралельної ОГП: «насос-гідромотор». Відмінністю для трансмісій гусеничних машин є застосування бортових ГОМТ, що дає можливість здійснювати повороти за рахунок розбіжностей швидкостей ведучих зірочок. Структурна схема ГОМТ колісного транспортного засобу (рис. 1 [1]) має ДВЗ, вихідний вал 2 якого передає постійно потужність на планетарний редуктор 3 і далі на ведучий міст. Шестерня 4 постійно з'єднана з валом 2 і приводить в обертання насос 5 гідропередачі. Гідромотор приводить в обертання епіциклічну шестерню 6 планетарного редуктора 3. Завдяки регулюванню робочих об'ємів насоса або гідромотора, або обох

гідромашин одночасно, епіциклічна шестерня може обертатися з різною частотою і напрямком, що змінює вихідні параметри планетарного редуктора і швидкість ведучого моста. Застосування регуляторів гідромашин з безступеневою зміною робочого об'єму забезпечує також безступеневу зміну частоти обертання ведучого моста.

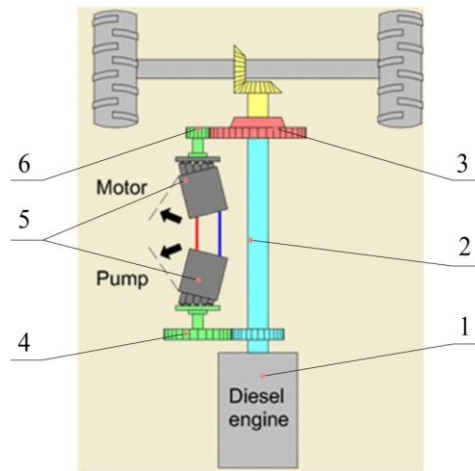


Рис. 1 – Структурна схема двопотокової гідромеханічної трансмісії (ГОМТ)

Слід відзначити, що одною з суттєвих переваг ГОМТ є те, що вони не потребують додаткового ходозменшувача в порівнянні з гідродинамічними передачами, які не забезпечують швидкість транспортного засобу близько 2 км/год, тобто на режимі зрушування.

Окремий клас трансмісій має ОГП для обертання провідних мостів ТТЗ або безпосередньо маточин за допомогою гідромотор-колес. Гідромотор-колеса на базі аксіальнопоршневих гідромоторів приводять в обертання маточини через планетарні редуктори для створення підвищеного крутного моменту, а героторні і радіальнопоршнєві високомоментні гідромотори застосовують для безпосереднього обертання маточин або «зірочок» в гусеничних ТТЗ. Сучасні досягнення в створенні радіальнопоршневих гідромоторів багатоциклової дії з підвищеними швидкісними характеристиками дають широкі можливості їх використовувати в трансмісіях ТТЗ.

Слід звернути увагу на бортові трансмісії з ОГП для ТТЗ класу всюдиходів. Та фахівці вітчизняного підприємства «Tornado» працюють над альтернативними механічними трансмісіями і зроблена спроба створення гідроприводної трансмісії з використанням гідромотор-колес. На рис. 2 представлена компоновка трансмісії Tornado, яка забезпечує підсумковий крутний момент 4-х провідних колес в 25420 Н.м і швидкість всюдихода до 40 км/год.



Рис. 2 – Компоновка агрегатів в бортовій трансмісії всюдихода «Tornado» з аксіально-поршневими гідромотор-колесами і редукторами

Кожне колесо оснащується аксіальнопоршневим гідромотором з регульованим робочим об'ємом. До гідромоторів кожного з бортів підводиться гідравлічна енергія від окремого насоса. Система бортового керування поворотом здійснюється відповідним електричним джойстиком завдяки наявності пропорційних електромагнітів в системах регулювання насосами і гідромоторами. Принципово така система бортового керування з постійним аналізом швидкості провідних коліс кожного з бортів запроваджена в гусеничних тракторах ТС-10 виробництва ХТЗ з використанням гідромашин компанії Rexroth Bosch Group і також створена компанією Sauer-Danfoss.

Список посилань

1. <https://de.linkedin.com/in/eckhard-skirde-64203b67> (Echard Srirde. Sauer-Danfoss Technologies for Tractor HMT. 23 p.)

УДК 681.518.5

Худяков І.В., канд. техн. наук, доцент

Херсонська державна морська академія, igor.khudiakov563@gmail.com

Грицук І.В., докт. техн. наук, професор

Національний університет «Чернігівська політехніка», gritsuk_iv@ukr.net

Погорлецький Д.С., канд. техн. наук, доцент

Херсонська державна морська академія, dimon150582@gmail.com

ІДЕНТИФІКАЦІЯ РЕЖИМІВ ПРАЦІ ТА ВІДПОЧИНКУ ВОДІЯ В СИСТЕМІ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Стрімкий прогрес у сфері інформаційно-комунікаційних технологій та систем стеження за рухом транспорту відкриває нові можливості для цифровізації й оптимізації логістичних процесів. Це стає можливим завдяки якісному розширенню інформаційних ресурсів, модернізації каналів зв'язку та збільшенню інтелектуального потенціалу самих транспортних засобів (ТЗ) [1, 2]. Базовим вектором розвитку сучасної автотехнічної індустрії є формування єдиного інформаційного простору в мережі Internet, який синергетично об'єднує обчислювальні ресурси всіх суб'єктів дорожнього руху – від конкретного автомобіля на лінії до великих корпоративних систем керування автопідприємством.

Більшість сучасних телематичних комплексів мають гнучкий інтерфейс, що дозволяє їм оперувати масштабними й складними контурами зв'язку та обробляти значні масиви даних [2–5]. Наприклад, у діагностичних комплексах техніки Caterpillar застосовуються модулі *Product Link*, які забезпечують безперервний двосторонній обмін даними між бортовими системами спеціалізованих машин і диспетчерським пунктом власника через онлайн-платформу *Dealer Storefront* [6, 7].

У європейській практиці автосервісу з 2006 року функціонує інтегрований інфраструктурний проект *Myscarevent*, створений для координації дій мобільних мереж екстреної технічної допомоги [6, 8]. Головна філософія цього проекту базується на тому, що стандартна бортова діагностика (OBD) не завжди здатна верифікувати справжню першопричину технічної відмови, через що виникає потреба в залученні зовнішніх експертних консультацій у реальному часі.

У військовому секторі США розгорнуто інтегровану систему віддаленої мережевої логістики *MRLN* [6, 9], яка пройшла успішні випробування в реальних операційних умовах на базі бронетранспортерів *Stryker*. Комплекс *MRLN* ефективно комбінує можливості інтерактивних електронних технічних керівництв (*IETM*) та автоматизованої системи технічного обслуговування (*EMS*), які є внутрішніми стандартами американської армії.

Фахівці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) на основі чинних нормативно-правових актів розробили комплексну класифікацію умов

експлуатації колісного транспорту [2, 3]. Для практичного впровадження цієї методології у співпраці з науковцями Херсонської державної морської академії (ХДМА) та Національного транспортного університету (НТУ) було створено інформаційно-програмний комплекс *IdenMonDiaOperCon "HNADU-16"*. Цей інструмент призначений для онлайн-моніторингу, діагностування, фіксації параметрів технічного стану та ідентифікації специфіки роботи ТЗ в середовищі інтелектуальних транспортних систем (ITS) [4].

Паралельно на ринку розвиваються комерційні рішення. Компанія *Mobileye* [10] постачає високотехнологічні апаратно-програмні модулі допомоги водієві, які аналізують відеопотік із камер та зіставляють його з даними CAN-шини автомобіля (темپ руху, активація показників повороту, зусилля на педалі гальма тощо). Аналогічні інженерні розв'язання для підвищення пасивної й активної безпеки пасажирів та інших учасників руху у швидко зростаючому сегменті систем *ADAS* активно розробляють корпорації *Bosch Mobility Solutions* [11] та *TRW Automotive* [12].

Проте з погляду наскрізного контролю експлуатаційних процесів усім згаданим системам притаманний один суттєвий недолік — відсутність функції одночасної оцінки режиму праці та відпочинку водія (РПВВ) і його поточного психофізичного стану. Наявні програми не дозволяють встановити прямі кореляційні зв'язки між миттєвою витратою палива, динамікою зміни технічного стану вузлів автомобіля та режимом роботи водія. Функціональна обмеженість компонентів унеможливорює оперативне й раціональне керування парком ТЗ з урахуванням конкретних дорожніх умов у реальному часі [13].

Перспективним інструментом для подолання цього бар'єру є спільна розробка вчених ХДМА, НТУ та ХНАДУ — інформаційна модель на базі програмного комплексу *MVSPM* ("*Motor Vehicle Safety and Performance Management*"). Ключова перевага цієї системи полягає в архітектурі паралельного моніторингу: вона дозволяє одночасно відстежувати технічні параметри автомобіля, здійснювати дистанційний контроль за дотриманням РПВВ, оцінювати фізичний стан оператора, фіксувати екологічні показники викидів та випадки порушення швидкісного ліміту за допомогою інструментів ITS безпосередньо під час руху.

Для детальної оцінки можливостей систем моніторингу вантажного транспорту в умовах логістичного ринку України було виконано експериментальне дослідження. Об'єктом спостереження виступив сідловий тягач *Mercedes-Benz Actros 1841LS* (державний реєстраційний номер AA5113TA), який здійснював міжнародний рейс за маршрутом Амстердам (Нідерланди) — Нижнєпотапів (Україна).

Узагальнені результати цього ходового моніторингу наведено в табл. 1, а географічний трекінг руху автомобіля на карті спостереження представлено на рис. 1.

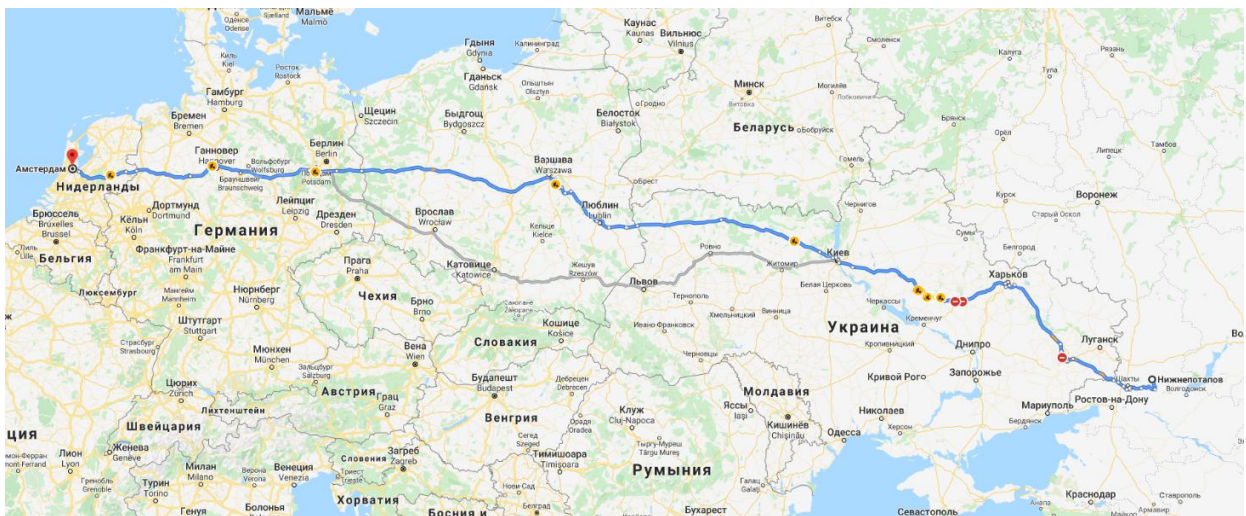


Рис. 1 – Трекінг ТЗ на карті спостереження час рейсу ТЗ за маршрутом Амстердам (Нідерланди) – Нижнєпотапів (Україна)

Таблиця 1 – Моніторинг основних параметрів експлуатації ТЗ час рейсу за маршрутом Амстердам (Нідерланди) – Нижнєпотів (Україна)

Дата	Тривалість водіння	Тривалість відпочинку	Пробіг	Рівень палива, початок	Рівень палива, кінець	Різниця	Середня швидкість	Середня витрата палива
	годин	годин	км	літр	літр	літр	км/ год	літр/ 100 км
10.12.19	0:03:00	23:57:00	0,540	897,0	1150,0	253,0		
11.12.19	11:09:00	12:51:00	721,350				65,01	29,4
12.12.19	8:10:00	15:50:00	567,880				70,1	29
13.12.19	3:39:00	20:21:00	255,890				75,48	28
14.12.19	0:00:00	23:59:59	0,000					
15.12.19	0:00:00	23:59:59	0,000					
16.12.19	0:11:00	23:49:00	4,940					
17.12.19	0:18:00	23:42:00	1,190					
18.12.19	7:55:00	16:05:00	541,560				71,72	28,6
19.12.19	15:20:00	8:40:00	911,485				59,96	31
20.12.19	0:10:00	23:50:00	6,105					
21.12.19	0:22:00	23:38:00	4,285					
22.12.19	0:15:00	23:45:00	7,300					
23.12.19	0:21:00	23:39:00	5,135	504,00	1150,00	646,00		
РАЗОМ:	47:53:00	288:07:00	3027,66			899,0	66,7	29,9

Реєстрація динаміки витрати палива забезпечувалася за допомогою високоточних додаткових датчиків, інтегрованих у паливну систему автомобіля. Разом із цим здійснювався безперервний хронометраж режимів праці та відпочинку. На рис. 2 продемонстровано ключові графічні тренди зміни об'ємів споживання палива та структури робочого часу за період дослідження.

Аналіз отриманого масиву телематичних даних щодо паливної економічності, швидкісних режимів та РПВВ дозволяє зробити такі обґрунтовані висновки:

- У вітчизняній практиці експлуатації великовагового транспорту параметрам технічного стану автомобілів (окрім базових показників швидкості та витрати палива) приділяється поверхнева увага.
- Наявні комерційні системи не забезпечують власника бізнесу можливістю синхронної автоматичної реєстрації РПВВ в онлайн-режимі. Зчитування даних із тахографа зазвичай відбувається постфактум — після завершення рейсу. Це унеможливає оперативне відстеження того, як саме зміна психофізіологічного стану або втома водія впливає на характер керування та технічні параметри автомобіля.
- Моніторинг паливних параметрів у більшості комерційних систем зводиться до відображення усереднених значень витрати на 100 км у прив'язці до середньої швидкості, чого на сьогоднішній день для глибокої аналітики недостатньо. Доступу до інших діагностичних параметрів автовиробники власникам не надають, а розширене зчитування кодів часто потребує окремих угод. Параметри роботи водія фіксуються виключно локальними приладами в кабіні, позбавленими функції віддаленої передачі даних.

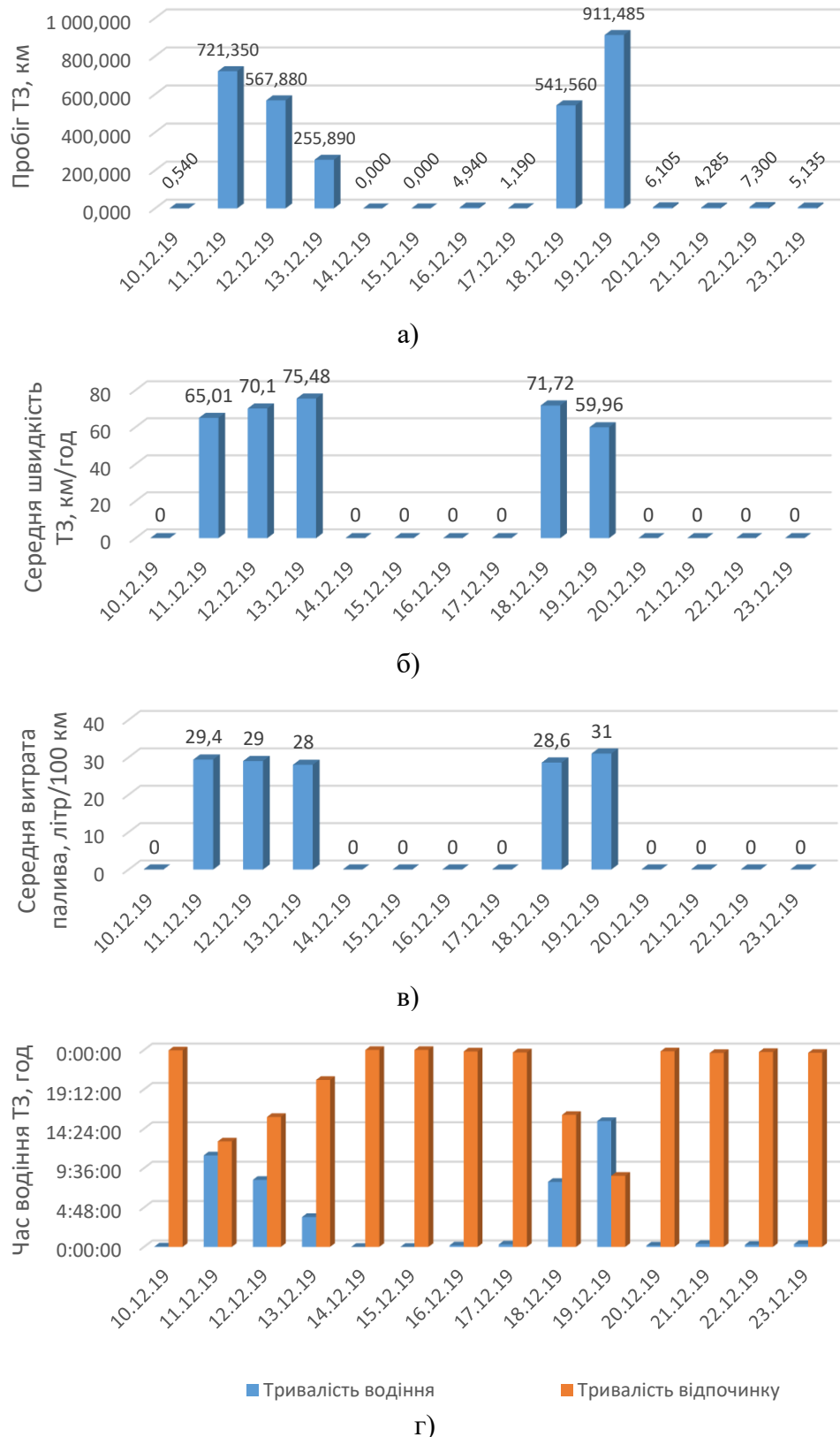


Рис. 2 – Моніторинг основних параметрів експлуатації ТЗ: а) результати реєстрації пробігу ТЗ під час спостереження, б) середня швидкість, в) середня витрата палива, г) результати реєстрації основних режимів праці та відпочинку водія за період спостереження

Таким чином, розгорнуті в Україні цифрові системи дистанційного моніторингу технічного стану ТЗ та контролю тахографічних даних на сьогодні не забезпечують можливості отримання комплексної, системної інформації про взаємозв'язок між технічним зносом (або паливною ефективністю) автомобіля, зміною режимів роботи водія та рівнем його професійної кваліфікації.

Для розв'язання цієї науково-технічної задачі авторами запропоновано комплексне дослідження, спрямоване на формування системних методів та інструментів віддаленого інтегрованого моніторингу технічних параметрів комерційного транспорту (вантажних автомобілів, автобусів) та режимів праці водіїв з урахуванням дорожньо-кліматичних умов експлуатації. Концепція передбачає розробку єдиної інформаційної моделі, яка дозволить у реальному часі проводити дистанційну оцінку коливань параметрів надійності та ефективності ТЗ залежно від факторів втоми водія та умов навколишнього середовища.

У межах цього розділу виконано детальний аналіз специфіки віддаленої ідентифікації режимів праці та відпочинку водія в сучасних інформаційних системах України. Досліджено взаємозв'язок між швидкісними режимами, об'ємами споживання палива та тахографічними профілями вантажного автомобіля. На основі отриманих результатів обґрунтовано архітектуру та принципи побудови перспективної інтегрованої системи інформаційного моніторингу технічного стану ТЗ та РПВВ в реальних умовах експлуатації.

Список посилань

1. Волков В.П., Матейчик В.П., Комов П.Б., Комов О.Б., Грицук І.В. Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Х. : НТУ «ХПІ». 2013. № 29 (1002). с.138-144.
2. Волков В.П., Грицук І.В., Грицук Ю.В., Шурко Г.К., Волков Ю.В. Особливості формування методики застосування класифікації умов експлуатації транспортних засобів в інформаційних умовах ITS // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. Х. : НТУ «ХПІ», 2017. № 14 (1236). С. 10–20.
3. Говорущенко Н.Я. Туренко А.Н. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта) Харьков: РИО ХГАДТУ, 1999. – 468 с.
4. Волков В.П., Грицук І.В., Грицук Ю.В., Волков Ю.В., Володарець М.В. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів Монографія Харків: Вид-во Панов А. М., 2018. - 298 с.
5. Говорущенко Н.Я. Техническая эксплуатация автомобилей Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 2014. – 312 с.
6. Golovin S.F. (2008), "Technical service transport machinery and equipment", ["Techniceskij servis transportnich machin"], Moskva. Alfa M. INFRA - M, 2008, 288p.
7. (2014), "Remote Monitoring System / Zeppelin - Car", ["Sistema udalennogo monitoringa / Zeppelin - Car"], :http://www.zeppelin.ua/products/automatic_monitoring/.
8. (2014), "Automotive", ["SAE internationalTM"], <http://www.sae.org/automotive/> 21.02.2014.
9. Maintainer's Remote Logistics Network. MRLN Remote Diagnostics. Press Release: Ruggedized Command & Control Solutions (Division of L-3 Communications). San Diego, California. 2004. 3 p.
10. Mobileye. [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.mobile-eye.ru/>
11. Bosch Mobility Solutions. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.bosch-mobility-solutions.com/en/> (дата звернення: 07.11.2017).
12. TRW Automotive. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.trw.com/>

УДК 629.083

Венжега В.І., канд. техн. наук, доцент
Пасов Г.В., канд. техн. наук, доцент
Кологойда А.В., канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Чернігівська політехніка», vivenzhega@gmail.com

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

Відновлення деталей є основним джерелом ефективності авторемонтного виробництва. Деталі втрачають свою працездатність в результаті зношування, механічних і корозійних ушкоджень, а також внаслідок втоми металу. Проте більшість з них має залишковий ресурс і може бути використано повторно в результаті проведення порівняно невеликого об'єму робіт по їх відновленню [1].

Витрати на відновлення деталей в умовах сучасних авторемонтних підприємств (АРП) складають залежно від конструктивно-технологічних особливостей деталей і характеру їх дефектів 10 – 50% від вартості нових деталей. [2].

Одна й та ж сама деталь може бути відновлена різними методами. Для вибору найбільш раціонального методу відновлення деталей автомобілів необхідно використовувати такі критерії [3].

1. Критерій застосовності. За допомогою цього критерію можна встановити, які з деталей можна відновити кількома способами, а які за своїми структурними характеристиками допускають тільки один спосіб відновлення.

2. Критерій довговічності – оцінка способів відновлення з точки зору довговічності, яку вони забезпечують. Довговічність відновленої деталі повинна бути не меншою 0,8 ресурсу нової деталі.

3. Критерій собівартості. Собівартість відновлення деталей повинна бути нижчою за собівартість нової заводської деталі.

4. Вартість експлуатаційних витрат. Сума всіх експлуатаційних затрат, пов'язаних з обслуговуванням відновленої при ремонті деталі повинна бути меншою витрат на обслуговування нової заводської деталі.

5. Техніко-економічний критерій є узагальнюючим критерієм, який пов'язує всі перераховані вище критерії. За цим критерієм можна остаточно вирішити питання про вибір раціонального способу відновлення деталі. Техніко-економічний критерій визначається за формулою:

$$C_v \leq K_d C_n,$$

де C_v – вартість відновленої деталі, грн;

C_n – вартість нової деталі, грн;

K_d – коефіцієнт довговічності.

Список посилань

1. Канарчук В.Є., Чигринцев А.Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. – К.: Вища шк., 1994. – Кн. 1: Теоретичні основи: Технологія: Підручник. – 342 с; Кн. 2: Організація, планування і управління: Підручник. – 383 с; Кн. 3: Ремонт автотранспортних засобів. – 495 с.

2. Чередніков О.М. Технологічні основи ремонту машин і відновлення деталей: Навчальний посібник. – Чернігів: ЧДТУ, 2008. – 212с.

3. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник. – К: Знання-Прес, 2003. – 511с.

УДК 629.02

Тюпа В. О., аспірант
Лимаренко О. М., канд. техн. наук
Баланюк Г.В., докт. техн. наук

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, balanuk.a.v@op.edu.ua

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРОСТОРОВИХ РАМ ГОНОЧНИХ АВТОМОБІЛІВ

Проектування несучих систем сучасних спортивних автомобілів (класів Formula Student, Mini Baja, Locost 750) вимагає досягнення суворого балансу між високою жорсткістю конструкції та її мінімальною масою. Традиційні інженерні підходи, засновані на використанні детермінованих коефіцієнтів динамічності, часто призводять до надмірного запасу міцності або неврахування втомних руйнувань від стохастичних навантажень. У відомих працях (Prajwal Kumar, Yogesh Sahu) переважно застосовується статичне моделювання за регламентними перевантаженнями, що залишає актуальним питання верифікації моделей через реальний спектр експлуатаційних навантажень.

Для розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) використано метод скінчених елементів. Враховуючи, що мікропрофіль дороги створює випадкові коливання, дисперсія напружень σ_{RMS}^2 визначається через спектральну щільність потужності (PSD):

$$\sigma_{RMS}^2 = \int_0^\infty |H(f)|^2 \cdot S_q(f) df \quad (1)$$

де $H(f)$ – передавальна функція конструкції;

$S_q(f)$ – спектральна щільність дороги.

Традиційні розрахунки через коефіцієнт динамічності $K_d = 1 + \frac{a_{max}}{g}$ часто призводять до переобважнення. Для точного прогнозування втомного ресурсу за рівнянням Басквіна $\sigma_a^m \cdot N = C$ необхідні реальні дані телеметрії.

Верифікація моделі проводилася за допомогою тензометрії. Напруження σ розраховували за зміною опору датчиків ΔR :

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta R}{R \cdot K_f} \quad (2)$$

На прикладі рами автомобіля класу Mini Baja (Buggy) проведено параметричну оптимізацію, де цільовою функцією виступала мінімізація загального об'єму матеріалу за обмеження еквівалентних напружень в інтервалі 150–160 МПа. Аналіз полів напружень показав локалізацію максимальних значень у зонах кріплення силової установки.

В результаті ітераційного процесу вдалося знизити об'єм матеріалу рами з початкових 0,176 м³ до 0,104 м³, що становить понад 40 % економії маси при збереженні конструктивної міцності. Динаміку збіжності цільової функції (об'єму матеріалу) залежно від кроку проектування наочно продемонстровано на рис. 1.

На основі проведеного аналізу та результатів моделювання можна стверджувати, що сучасне проектування несучих систем гоночних автомобілів потребує комплексного підходу, який виходить за межі традиційних квазістатичних розрахунків. Виконані дослідження наочно демонструють, що використання методів параметричної оптимізації в середовищі скінченно-елементного аналізу дозволяє досягти радикального зниження матеріаломісткості конструкції, зокрема зменшення об'єму та маси рами на понад 40 % без

втрати її регламентованої міцності. Це має вирішальне значення для болідів класів Formula Student чи Mini Baja, де кожен кілограм ваги безпосередньо впливає на питому потужність та керованість транспортного засобу.

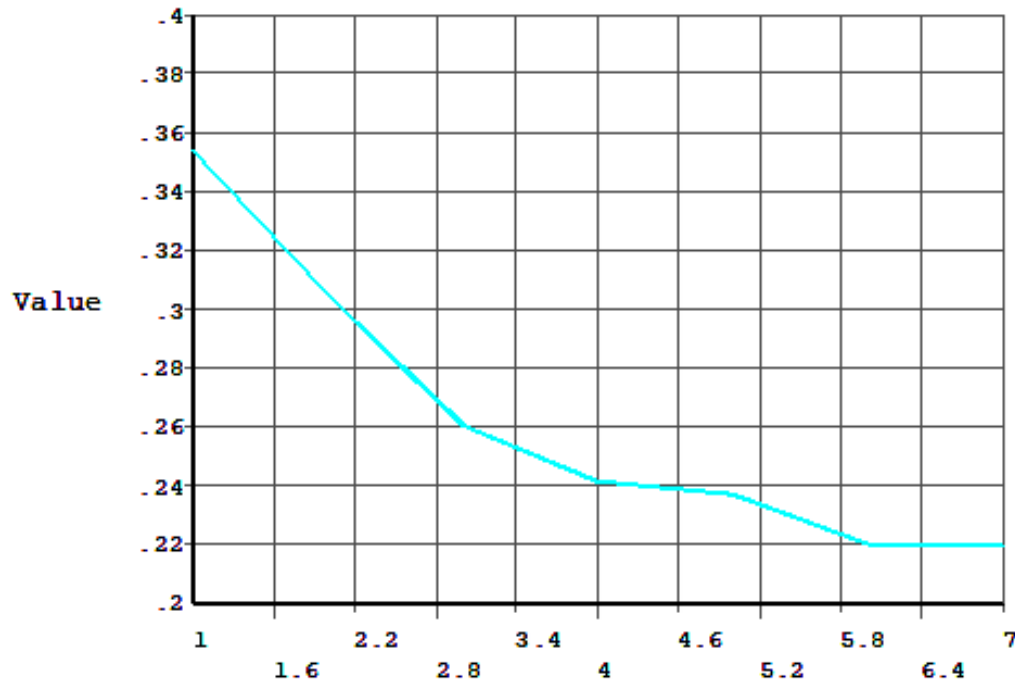


Рис. 1 – Графік зміни цільової функції (об'єму матеріалу рами) в процесі параметричної оптимізації

Водночас науковий пошук підтверджує, що детерміноване задання навантажень через фіксовані коефіцієнти динамічності не повною мірою відображає реальні умови експлуатації, оскільки зовнішні збурення від мікропрофілю траси мають виражений стохастичний характер. Для забезпечення високої достовірності результатів та точного прогнозування втомного ресурсу за рівнянням Басквіна необхідно інтегрувати чисельне моделювання з натурним експериментом. Застосування бортових систем збору даних та тензометрії дозволяє отримати реальні часові реалізації напружень, що є єдиним надійним шляхом для верифікації розрахункових моделей.

Таким чином, сформовано замкнений цикл проєктування, який поєднує CAD-моделювання, ітераційну оптимізацію НДС та експериментальну перевірку за допомогою телеметрії. Такий методологічний підхід дозволяє уникнути надлишкового запасу міцності, що є критично важливим для конкурентоспроможних спортивних машин, забезпечуючи при цьому надійність конструкції в умовах високочастотних вібраційних та ударних навантажень. Проведені дослідження підкреслює актуальність переходу від статичних схем до аналізу спектральної щільності потужності збурень, що відкриває нові можливості для вдосконалення просторових стержньових систем.

Список посилань

1. Lavanya, D., Guru Mahesh, G., Ajay, V., & Yuvaraj, C. (2014). DESIGN AND ANALYSIS OF A SINGLE SEATER RACE CAR CHASSIS FRAME. *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering (IJRAME)*, 2(8), 12-23.
2. Prajwal Kumar, M. P., Muralidharan, V., & Madhusudhana, G. (2014). DESIGN AND ANALYSIS OF A TUBULAR SPACE FRAME CHASSIS OF A HIGH PERFORMANCE RACE CAR. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 3(2), 494-500.
3. Agarwal, S., Awasthi, P., Saatyaki, T., Kushwaha, M., & Jaiswal, V. (2020). Design & Analysis of Spaceframe Chassis for FSAE Vehicle. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(3)

УДК 539.595

Губська В.В., канд. фіз.-мат. наук
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, viktoriagubskaia@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРУ І РІДИНИ З ВІЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ПІД ДІЄЮ ПЕРІОДИЧНОЇ СИЛИ

При русі транспортних засобів, таких як ракети-носії, літаки, цистерни рідина не цілком заповнює їх баки і під час транспортування виникають коливання вільної поверхні рідини. При великій відносній масі рідини її хвильові рухи можуть суттєво впливати на динаміку транспортного засобу. Це висуває додаткові вимоги до системи управління і може бути причиною небажаних режимів руху і навіть аварійних ситуацій [3].

Розглядається задача динаміки рідини з вільною поверхнею в резервуарі циліндричної форми у випадку прикладання до резервуара зовнішньої періодичної сили. Розглянуто циліндричний резервуар з радіусом основи 0,4 м, глибина заповнення 0,8 м. Для дослідження задачі було використано модель [1], яка була протестована для задач динаміки резервуарів із рідиною з вільною поверхнею [2], а також розв'язання з використанням середовища Star-CCM+. Розглянуто випадок, коли частота зовнішнього збурення більша за резонансну і складає $\Omega = 1,2\Omega_0$ резонансної частоти, співвідношення мас резервуару і рідини 0,01.

Досліджено амплітуди коливань рідини на стінках резервуару. В подальшому планується використати отримані результати для обчислень амплітуд коливань в резервуарах для більш складних конструкцій. На рис. 1 представлено графіки зміни амплітуди коливань рідини на стінці з часом. Для випадку частот коливань більших за резонансну можна спостерігати прояви вищих гармонік і затухання коливань. Показано, що підхід в моделюванні, при якому динаміка системи розглядається в рамках моделі сумісного руху, значно більше відповідає реальним інженерним системам.

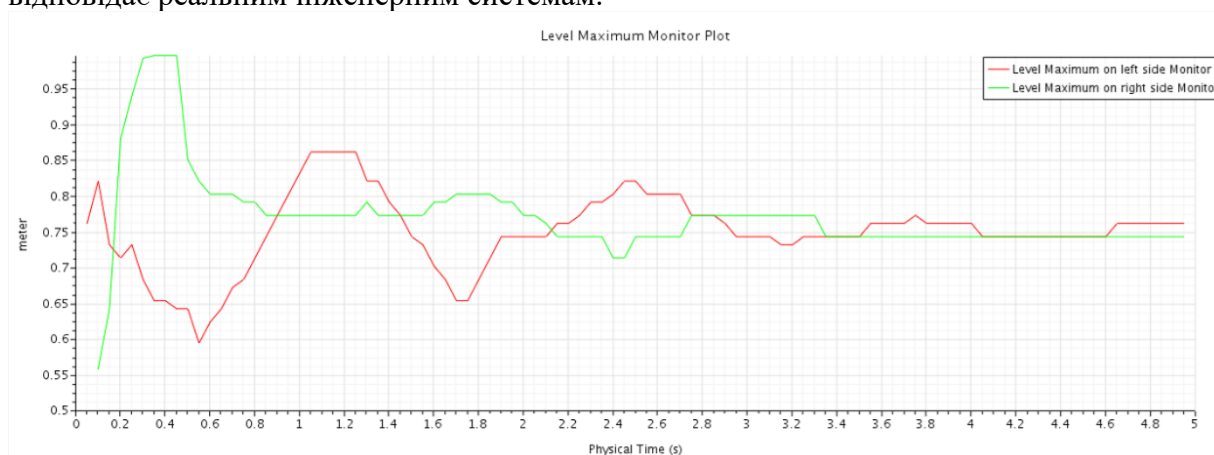


Рис. 1 – Зміна амплітуди коливань рідини на стінці резервуара з часом

Список посилань

1. Лимарченко О.С. Нелинейная динамика конструкций с жидкостью./ Лимарченко О.С., Ясинский В.В. – Киев: НТТУ КПИ. – 1997. – 338 с.
2. Лимарченко О.С. Задача про вимушені нелінійні коливання резервуару у формі усіченого конуса, частково заповненого рідиною / Лимарченко О.С., Губська В.В. // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, серія Фізико-математичні науки. – 2012. Т.1, №1. – С.73-76.
3. Raouf A. Ibrahim Liquid Sloshing Dynamics Theory and Applications / Cambridge University Press, 2005.

УДК 629.3

Кологойда А.В., канд. техн. наук
Пасов Г.В., канд. техн. наук, доцент
Сіра Н.М., канд. техн. наук

Національний університет «Чернігівська політехніка», kolohoidaitm@stu.cn.ua

ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ: ПЕРЕВАГИ, ОБМЕЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Сучасний автомобільний транспорт потребує впровадження технологій, здатних підвищити гнучкість виробництва, скоротити терміни виготовлення деталей, зменшити залежність від складських запасів і забезпечити швидке відновлення окремих елементів транспортних засобів. У цьому контексті 3D-друк набуває особливого значення, оскільки дає змогу переходити від традиційних виробничих підходів до цифрового моделювання та пошарового створення виробів.

Наразі все більше розглядають сучасні 3D-технології саме у зв'язку з машинобудуванням та автомобільним транспортом. Зокрема, у роботі [1] проаналізовано напрями застосування таких рішень у технічних галузях. Інтеграція САПР із технологіями тривимірного друку дозволяє прискорити інженерне прототипування, удосконалити конструктивні рішення та оперативно перевіряти працездатність майбутніх виробів.

Особливо складним є питання застосування надрукованих деталей у вузлах, що зазнають механічних навантажень, вібрацій, температурних коливань і зношування. Дослідження постоброблення виробів інженерного призначення показують, що після пошарового формування необхідно враховувати анізотропність, пористість, дефектний шар і вплив механічного доведення на фізико-механічні властивості деталі. Отже, наукова проблема полягає у визначенні раціональних напрямів застосування 3D-друку в транспорті з урахуванням технологічних, експлуатаційних та економічних чинників.

Аналіз наукових праць засвідчує, що українські дослідження з тематики 3D-друку охоплюють кілька взаємопов'язаних напрямів: автомобільне та загальне машинобудування, реверс-інжиніринг, САПР, композиційні матеріали, металеве адитивне виробництво, постоброблення, порівняння із субтрактивними методами та економічні аспекти розвитку ринку. Автори у роботі [2] акцентують увагу на прототипуванні й реверс-інжинірингу. Це особливо важливо для автомобільної галузі, де часто виникає потреба у відтворенні зношених, дефіцитних або знятих з виробництва деталей.

Важливим напрямом є матеріалознавче забезпечення. У роботі [3] проаналізовано полімерні композиційні суміші та обладнання для їх друку, що має значення для створення легких конструкційних елементів, корпусних деталей і допоміжних автомобільних компонентів.

Економічний контекст висвітлено в роботі [4], де адитивні технології розглядаються як складова техноглобалізації та розвитку сучасного ринку. Це дозволяє трактувати 3D-друк не лише як технічний інструмент, а і як чинник трансформації виробничих і логістичних моделей.

3D-друк у системі автомобільного транспорту доцільно розглядати як технологічний комплекс, що охоплює цифрове моделювання, вибір матеріалу, формування виробу, контроль якості, постоброблення та оцінювання експлуатаційної придатності. Його головна перевага полягає у можливості виготовлення деталей без складного оснащення, прес-форм або тривалого виробничого циклу.

У сфері автомобільного транспорту найбільш перспективними напрямками застосування адитивних технологій є:

1. Інженерне прототипування. 3D-друк дозволяє швидко отримати фізичний зразок автомобільної деталі, перевірити її форму, посадкові розміри, ергономічність і сумісність.

2. За допомогою сканування, цифрового моделювання та подальшого друку можна відтворювати деталі, які складно придбати або які вже не виготовляються серійно.

3. Адитивне виробництво є доцільним для деталей, які потрібні в обмеженій кількості: кронштейнів, корпусних елементів, декоративних вставок, технологічного оснащення, адаптерів, шаблонів та допоміжних пристроїв.

4. Пошарове виготовлення дає можливість створювати складні внутрішні структури, порожнисті елементи та топологічно оптимізовані форми, що є важливим для зменшення маси транспортного засобу.

5. 3D-друк може бути використаний для відтворення окремих деталей, виготовлення ремонтних вставок, створення замінників дефіцитних комплектуючих або підготовки елементів для подальшої механічної обробки.

6. Для закладів вищої освіти, лабораторій і навчальних майстерень адитивні технології є ефективним засобом демонстрації конструкції автомобільних вузлів, моделювання технічних рішень і виконання експериментальних робіт.

Разом з тим практичне впровадження 3D-друку в автомобільному транспорті потребує обережного підходу. Не кожна надрукована деталь може використовуватися в реальних умовах експлуатації. Для відповідальних вузлів необхідні випробування на міцність, зносостійкість, термостійкість, втомну довговічність і стабільність геометричних параметрів.

Особливо важливим є вибір матеріалу. Полімерні та композитні матеріали можуть бути ефективними для легких, корпусних, декоративних або допоміжних елементів. Металеві сплави, зокрема титанові, мають значний потенціал для створення міцних і легких деталей, проте потребують складного обладнання, контролю мікроструктури та додаткової обробки.

Окремі уваги потребує постоброблення. Після друку виріб часто має шорстку поверхню, залишкові напруження, нерівномірну структуру або відхилення від заданої геометрії. Тому механічне доведення, термічна обробка, шліфування, полірування чи зміцнення поверхні є необхідними етапами для забезпечення належної якості.

Економічна доцільність 3D-друку залежить від багатьох чинників: складності деталі, вартості матеріалу, тривалості друку, потреби в постобробленні, кількості виробів, вимог до точності та наявності цифрової моделі. У масовому виробництві традиційні методи часто залишаються дешевшими, однак для одиничних, експериментальних, складнопрофільних або дефіцитних деталей адитивне виробництво може бути більш ефективним.

Таким чином, 3D-друк не варто розглядати як універсальну заміну класичних технологій. Його доцільно впроваджувати вибірково — там, де він забезпечує технічну, економічну або організаційну перевагу.

Список посилань

1. Кальченко В., Кологойда А., Пасов Г., Сіра Н., Зюзько Д., Пивовар Д. Сучасні 3D-технології в машинобудуванні та автомобільному транспорті. *Технічні науки та технології*. 2023. № 2(32). С. 33–41. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-33-41

2. Гусачук Д. А., Мельничук М. Д., Парфентьєва І. О., Фурс Т. В., Боярська І. В., Карпюк М. М. Прототипування та стратегія реверс-інжинірингу на прикладі інженерних задач адитивного виробництва. *Наукові нотатки*. 2023. № 76. С. 58–65. DOI: 10.36910/775.24153966.2023.76.8.

3. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та обладнання для 3D-друку ними. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. № 319(2). С. 252–262. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262.

4. Ахновська І. О., Брацлавець О. Ю. Розвиток світового ринку адитивних технологій в умовах техноглобалізму. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2022. № 1(01). С. 36–42. DOI: 10.32782/dees.1-6

УДК 629

Кужельний Я.В., канд. тех. наук, доцент

Машковцев Д.С., асистент

Сухоліт М.І., здобувач вищої освіти

Національний університет «Чернігівська політехніка», kyzhelnuyitm@stu.cn.ua

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ

У сучасному автомобілебудуванні значна увага приділяється підвищенню паливної економічності та зменшенню шкідливих викидів. Одним із найефективніших рішень стали гібридні автомобілі, які поєднують двигун внутрішнього згоряння та електричний привід [1]. Такі транспортні засоби забезпечують меншу витрату пального, особливо в міських умовах, а також дозволяють знизити рівень забруднення навколишнього середовища.

Гібридні транспортні засоби класифікують за рівнем електрифікації силової установки. Найпростішими є мікрогібриди (Micro Hybrid), які використовують систему «Start-Stop» та рекуперацію енергії під час гальмування. До таких моделей належать Volkswagen Golf eTSI та Mazda 3 e-Skyactiv [2]. Наступною групою є м'які гібриди (MHEV), у яких електродвигун допомагає двигуну внутрішнього згоряння під час розгону та зменшує навантаження на нього. Прикладом є Audi A6 MHEV і Mercedes-Benz C-Class MHEV.

Повні гібриди (HEV) можуть рухатися виключно на електротязі на невеликій швидкості. Найвідомішими представниками є Toyota Prius та Honda Accord Hybrid [3]. Окрему групу становлять плагін-гібриди (PHEV), які мають батарею великої ємності та можуть заряджатися від електромережі. Такі автомобілі здатні долати десятки кілометрів без використання бензинового двигуна. Прикладами є Mitsubishi Outlander PHEV та BMW X5 xDrive50e [2].

Важливим елементом конструкції гібридного автомобіля є схема передачі енергії до коліс. У сучасних автомобілях застосовують послідовну, паралельну та комбіновану схеми [1]. У послідовній схемі двигун внутрішнього згоряння не має прямого зв'язку з колесами та працює лише для генерації електроенергії. У паралельній схемі крутний момент передається одночасно від двигуна внутрішнього згоряння та електромотора. Приклад розміщення основних вузлів гібридної силової установки наведено на рис. 1 [4]. Комбінована схема поєднує переваги двох попередніх та вважається найбільш ефективною.

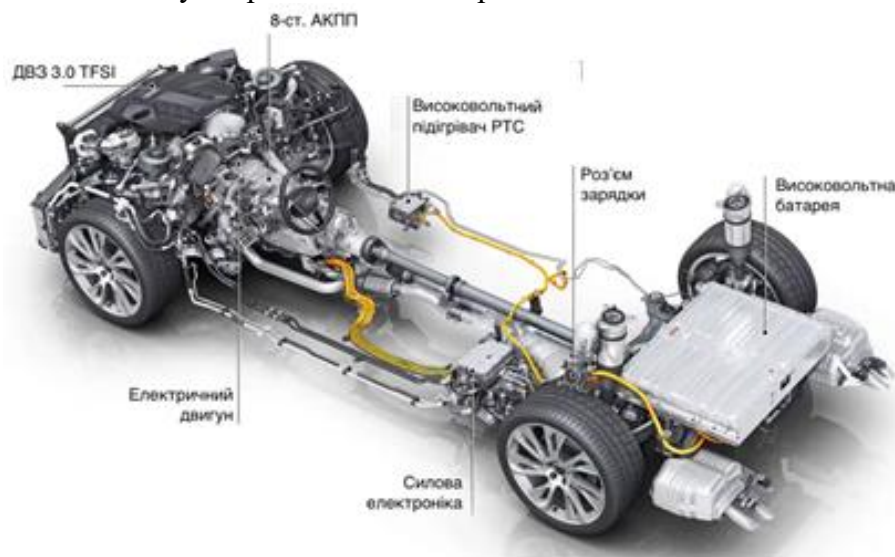


Рис. 1 – Схема розміщення основних вузлів гібридної силової установки Audi A8 TFSI e Quattro Hybrid

Однією з головних переваг гібридних автомобілів є рекуперативне гальмування. Під час уповільнення електродвигун працює як генератор і перетворює кінетичну енергію на електричну, яка накопичується в акумуляторній батареї [2]. Це дозволяє зменшити витрату пального та підвищити ресурс гальмівної системи. Для керування електричними процесами використовується інвертор, який перетворює постійний струм батареї на змінний струм для живлення електродвигуна. Конструкцію планетарного механізму гібридної трансмісії показано на рис. 2 [5].



Рис. 2 – Конструкція планетарного механізму та мотор-генераторів гібридної трансмісії Toyota Hybrid Synergy Drive.

Гібридні автомобілі мають низку переваг: економію пального, зниження шкідливих викидів, тихішу роботу двигуна та менший знос гальмівної системи [2]. Водночас існують певні недоліки, серед яких складність технічного обслуговування, висока вартість батарей та потреба у спеціальному обладнанні для ремонту високовольтних систем.

Перспективи розвитку гібридних технологій пов'язані з удосконаленням систем керування, збільшенням ресурсу батарей та впровадженням нових напівпровідникових матеріалів [3]. Очікується, що в майбутньому гібридні автомобілі стануть ще економічнішими та екологічнішими.

Отже, гібридні транспортні засоби є важливим етапом розвитку сучасного автомобілебудування. Поєднання електроприводу та двигуна внутрішнього згоряння дозволяє забезпечити оптимальний баланс між економічністю, екологічністю та зручністю експлуатації.

Список посилань

1. Булан І.Л. Система керування гібридним автомобілем: магістерська дисертація. - Київ, НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2020. -102 с.
2. Кубіч В. І. Гібридні силові установки легкових автомобілів : навчальний посібник. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 193 с.
3. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. Гібридні автомобілі: монографія. - Харків, ХНАДУ, 2008. - 327 с.
4. Варіанти гібридного приводу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/jchlpt>
5. Toyota hybrid – how does it work? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mag.toyota.co.uk/how-does-toyota-hybrid-work/>

УДК 629.021

Апаракін А.Р., канд. техн. наук, ст. викладач

Центральноукраїнський національний технічний університет, anton.aparakin@gmail.com

ДЖЕРЕЛА КОНТАКТНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ЗОНІ ПРИКЛАДАННЯ УПРАВЛЯЮЧОГО ЗУСИЛЛЯ ГІДРОПІДСИЛЮВАЧА РУЛЯ

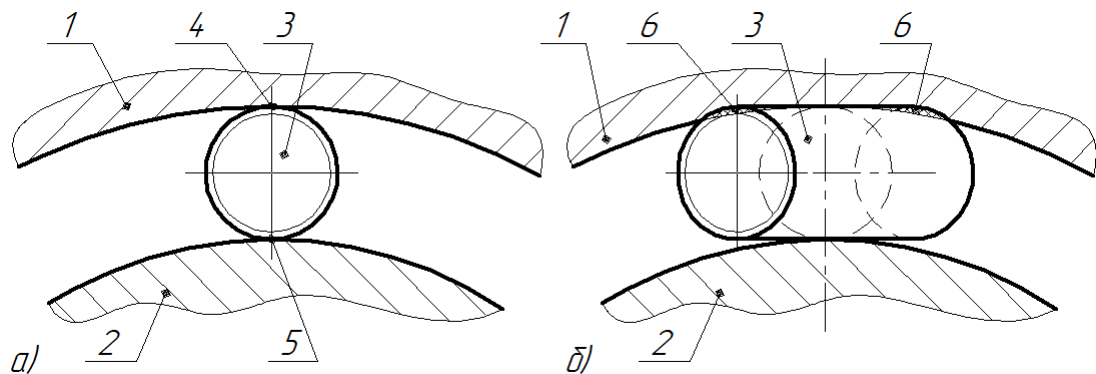
Актуальна конструкція [1] модельного ряду провідного виробника кульково-гвинтових гідропідсилювачів (КГГП) руля зарекомендувала себе як надійна та практична, однак має свої особливості. Відома проблема із підклинюванням і не поверненням вхідного валу (ротору) в нейтраль.

В обумовленій конструкції ротор, який утворює разом із гвинтом гідророзподільник, базується на двох рядах циліндричних роликів, закріплених у пружному полімерному сепараторі. В той же час, між внутрішнім діаметром гвинта та зовнішнім діаметром ротора виконано спряження із зазором 3...6 мкм, який призначений для забезпечення обертання ротора саме на роликах, без ривків та заклинювання.

Однак цю вимогу не завжди вдається задовільнити. Із досвіду експлуатації роликів підшипникових опор відомо, що перекося роликів не повинен перевищувати 2', інакше з'являються значні контактні напруження на краях. Саме це явище стає причиною заклинювань і не повернення ротору в нейтраль.

На рис. 1 приведена схема обумовленого заклинювання ротору 2 у результаті перекосу роликів 3 більше допустимого значення, за умов мінімізації зазору у спряженні ротор-гвинт. На рис. 1, а показано номінальне розташування ролика 3 із контактами в точках 4 та 5. При перекосі ролика виникає контакт в точках 6 із утворенням натягу на внутрішній циліндричній поверхні із зазором по зовнішній циліндричній поверхні ролика 3, як показано на схемі рис. 1, б.

Одним із шляхів нейтралізації цього негативного явища може стати кардинальна зміна конструкції опор кочення ротора. Раціональне їх розміщення зменшить контактне навантаження в зоні прикладання управляючого зусилля, чим покращить умови експлуатації складальної одиниці.



1 – гвинт; 2 – ротор; 3 – ролик; 4, 5 – точки контакту ролика за нормальних умов роботи; 6 – точки контакту ролика за умов перекосу.

Рис. 1 – Схема нормального а) положення та заклинювання б) роликів у результаті перекосу у опорах ротору.

Список посилань

1. Servocom - the power steering for commercial vehicles : веб сайт. URL: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/steering/servocom/> (дата звернення 16.05.2026).

2. Кулінченко, В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід : підручник / В. Р. Кулінченко. – Київ: ІНКОС, Центр навчальної літератури, 2006. - 616 с.

УДК 621.771.07.001.5

Солових А.Є., канд. техн. наук, доцент

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький,
andreisolovuh@gmail.com

Лопата В.М. канд. техн. наук, доцент

Національний транспортний університет, м.Київ, Україна, gazoterm@ukr.net

Качинська І.Р., інженер-дослідник

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, kir508@ukr.net

ФАКТОРИ, ВИЗНАЧАЮЧІ ЗНОС ДЕТАЛЕЙ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ ДВИГУНА

Зношування шатунних шийок колінчастого валу значною мірою залежить від вигинів шатуна і колінчастого валу, а також від перекосів у шатунно-поршневій групі. У цих випадках поршень працює у циліндрі з перекосом. Розташування більшої осі овалу циліндрів у площині поздовжньої осі колінчастого валу свідчить про вигин шатуна, нежорсткості колінчастого валу або перекося, отриманому при складанні шатуна з поршнем [1].

Колінчасті вали можуть мати такі дефекти [1]:

- овальність, конусність та пошкодження шатунних та корінних шийок (задири, глибокі риски, вм'ятини, сліди корозії або значна хвилястість їхньої поверхні);
- знос гнізда в торці колінчастого валу під шарикопідшипник валу муфти зчеплення та посадкових місць під шестірні та шків вентилятора;
- пошкодження або зношування отворів під болти кріплення маховика;
- знос шпонкової канавки та маслосгінного різьблення.

Шийки валів та його підшипники зношуються внаслідок на них фізичних, хімічних та інших чинників. Сили, що діють при роботі двигуна в кривошипно-шатунному механізмі, виникають періодично, один раз за два обороти колінчастого валу змінюються за величиною та напрямом і найбільшого значення досягають при робочому ході поршня.

На кривошипно-шатунний механізм діє інерційна сила, що виникає внаслідок нерівномірності руху шатунно-поршневої групи. Ця сила діє вздовж осі циліндра періодично і досягає свого найбільшого значення в момент зміни напрямку руху поршня, причому значення інерційної сили в нижньому положенні поршня більше ніж у верхньому [2].

Періодично діючі тиск газів та інерційна сила передають колінчастому валу поштовхи, скручують його та згинають, викликаючи пружні деформації. В результаті пружних деформацій у валі виникають внутрішні напруження. При збігу періодів і напрямів тиску газів та інерційної сили, з одного боку, і пружних внутрішніх напруг - з іншого амплітуда коливань валу зростає, що призводить до утворення в найбільш напружених місцях (галтелях і щоках) тріщин втоми, розвиток яких може викликати поломку валу.

Крім періодично діючих сил, під час роботи при обертанні колінчастого валу виникає відцентрова сила неврівноваженої маси шатуна, що діє на шатунні та корінні шийки валу. Ця сила постійно притискає шатунний підшипник до шийки валу з боку кривошипів.

Аналіз роботи наведених сил показує, що основна частина роботи тертя між шатунами та шатунними шийками припадає на частини шийок, спрямовані у бік осі колінчастого валу. Внаслідок цього у шатунних шийок колінчастих валів автотракторних двигунів в основному зношуються ці частини, внаслідок чого шийки стають овальними. При такому зносі шатунних шийок збільшується радіус кривошипу і, отже, хід поршня, що призводить до збільшення стиснення. Крім того, у разі заміни верхнього компресійного кільця воно буде ударятися об буртик циліндра, що утворився в результаті зношування, швидко зношуватися по висоті і ламатися. Сила інерції та відцентрова сила сприяють також зносу корінних шийок колінчастого валу.

Крім сил тертя, на знос шийок великий вплив мають конструкція валу та його жорсткість. У міру зменшення діаметрів шатунних та корінних шийок в результаті шліфування прогин валу під час роботи двигуна зростає, що призводить до перекосу шатунів на шийках валу та поршнів у циліндрах та посилює процес зношування.

Знос шатунних шийок на конус визначається головним чином перекосом шатунів на шийках. Конусність корінних шийок внаслідок зношування незначна. Зношування корінних шийок, крім того, значною мірою залежить від неспіввісності корінних підшипників і шийок, неспіввісності колінчастого валу і валу муфти зчеплення, а також від незбалансованості колінчастого валу, маховика і муфти зчеплення. Співвісність корінних підшипників порушується в результаті їх індивідуальної розточування, зносу поверхонь під вкладиші, короблення блоку, неправильного складання тощо [3].

Якість і властивості мастила також сильно впливають на знос колінчастого валу та підшипників. Практика показує, що незадовільний стан олії та вузлів системи мастила, особливо фільтруючих пристроїв, значно посилює зношування шийок колінчастих валів. Абразивні частинки та продукти зносу, потрапляючи з маслом у підшипники валу, осідають в антифрикційному шарі та зношують шийки валу.

Велика різниця у масі деталей шатунно-поршневої групи; одного комплекту також впливає на знос колінчастого валу. Чим більша різниця в масі шатунно-поршневої групи, тим більше коливання колінчастого валу, отже, тим швидше зношуються шийки валу та підшипники.

Поздовжнє переміщення валу, вигин та скрученість шатунів приводять до перекосів шатунів на шийках валу та поршнів у циліндрах, внаслідок чого різко збільшується зношування цих деталей.

Список посилань

1. А.С. Полянский, Е.А. Дубинин, В.Н. Плетнев Анализ и классификация показателей ремонтпригодности средств транспорта. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Зб. наук. праць, Вип. 60. Харків: 2007. С. 165-169.
2. O. Saraiev, I. Saraieva, I. Gritsuk, R. Vrublevskiy, D. Kurnosenko, M. Ahieiev Automated Diagnostic System for Engine Cylinder–Piston Group. *SAE Technical Paper* 2020–01–2022. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2022>. Mode of access: *SAE International*. <http://papers.sae.org/10.4271/2020-01-2022>.
3. I. Gritsuk, D. Pohorletskiy, V. Mateichyk, M. Ahieiev, I. Sadovnyk Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems). *SAE Technical Papers*, 2020–01–2031. <http://papers.sae.org/10.4271/2020-01-2031>.

УДК 621.865:629.364

Полюхович А.Г., аспірант

Ковальов Ю.А., канд. техн. наук, доцент

Київський національний університет технологій та дизайну, poliukhovych.a@knutd.edu.ua

ВПЛИВ МАСО-ІНЕРЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ДИНАМІКУ РУХУ ГІБРИДНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ З ОМНІНАПРАВЛЕНИМ ПРИВОДОМ

Сучасні транспортно-логістичні системи характеризуються високою інтенсивністю матеріальних потоків та підвищеними вимогами до адаптивності технологічних процесів. У зв'язку з цим відбувається поступовий перехід від автоматизованих транспортних засобів із фіксованими маршрутами руху (AGV) до автономних мобільних роботів (AMR), здатних функціонувати у динамічному середовищі та взаємодіяти з людиною-оператором у межах концепції Human–Robot Collaboration (HRC) [1, 2].

Одним із перспективних рішень для складських та виробничих транспортно-логістичних систем є використання гібридних транспортно-логістичних платформ з омнінаправленим приводом на базі коліс Mecanum. Такі платформи забезпечують голономний рух, що дозволяє здійснювати переміщення у довільному напрямку без зміни орієнтації корпусу. Це суттєво підвищує маневреність платформи в умовах обмеженого простору та складної конфігурації транспортних маршрутів [2].

Проте ефективність функціонування мобільної платформи визначається не лише її кінематичними можливостями, а й динамічними характеристиками системи. Зокрема, маса платформи, маса вантажу та момент інерції безпосередньо впливають на процеси розгону, гальмування, зміну траєкторії руху та енергоспоживання приводів. У зв'язку з цим виникає необхідність врахування масо-інерційних параметрів уже на етапі концептуального проєктування мехатронної системи [3].

Положення платформи в локальній системі координат задається вектором швидкостей:

$$\mathbf{v} = [v_x, v_y, \omega_z]^T$$

де v_x та v_y – лінійні швидкості руху платформи вздовж відповідних осей;

ω_z – кутова швидкість обертання навколо вертикальної осі.

Для омнінаправленої платформи з чотирма колесами Mecanum обернена кінематична задача визначає зв'язок між швидкістю руху платформи та кутовими швидкостями коліс [4]:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{1}{R} (v_x - v_y - (L_x + L_y)\omega_z) \\ \omega_2 &= \frac{1}{R} (v_x + v_y + (L_x + L_y)\omega_z) \\ \omega_3 &= \frac{1}{R} (v_x + v_y - (L_x + L_y)\omega_z) \\ \omega_4 &= \frac{1}{R} (v_x - v_y + (L_x + L_y)\omega_z)\end{aligned}$$

де R – радіус колеса;

L_x – половина колісної бази;

L_y – половина ширини колії;

$\omega_1 \dots \omega_4$ – кутові швидкості коліс.

Для врахування динаміки руху введемо сумарну масу системи:

$$m_\Sigma = m_p + m_l$$

де m_p – маса платформи,

m_l – маса вантажу.

Лінійний рух платформи описується другим законом Ньютона:

$$F = m_\Sigma a$$

а обертальний рух – рівнянням моментів:

$$M = J_z \varepsilon$$

де F – результуюча сила тяги;

a – лінійне прискорення;

M – момент сил;

J_z – момент інерції платформи відносно вертикальної осі;

ε – кутове прискорення.

Аналіз наведених співвідношень показує, що зі збільшенням маси вантажу зростають інерційні навантаження на приводи платформи. Це призводить до збільшення часу розгону та гальмування, зниження маневреності під час виконання складних траєкторій руху, а

також до підвищення енергоспоживання системи. Крім того, збільшення моменту інерції ускладнює виконання швидких поворотів та зміну напрямку руху, що є особливо важливим для платформ з омнінаправленим приводом.

Для коліс Mecanum характерною особливістю є наявність додаткових втрат енергії, пов'язаних із конструкцією роликів та складним характером взаємодії колеса з опірною поверхнею. У результаті під час реалізації бокового або діагонального руху навантаження на електроприводи розподіляється нерівномірно, що також необхідно враховувати при проектуванні системи керування.

Таким чином, масо-інерційні параметри суттєво впливають на динаміку руху гібридної транспортно-логістичної платформи з омнінаправленим приводом. Врахування маси вантажу, моменту інерції та динамічних навантажень дозволяє підвищити точність моделювання руху, забезпечити коректний вибір параметрів приводів та створити передумови для подальшої оптимізації енерговитрат і алгоритмів керування автономною платформою.

Список посилань

1. Zhang M., Grosse E. H. How to Model Human–Robot Collaborative Logistics Systems: Systematic Literature Review and Future Perspectives. IFAC-PapersOnLine. 2024. Vol. 58, № 19. P. 379–384. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896324016707>
2. Keith R., La H. M. Review of Autonomous Mobile Robots for the Warehouse Environment. Reno : University of Nevada, 2024. 25 p. <https://arxiv.org/pdf/2406.08333>
3. Gerschütz B., Sauer C., Kormann A. et al. Digital Engineering Methods in Practical Use during Mechatronic Design Processes. Designs. 2023. Vol. 7, № 4. Art. 93. https://www.researchgate.net/publication/372436992_Digital_Engineering_Methods_in_Practical_Use_during_Mechatronic_Design_Processes
4. Taheri H., Qiao B., Ghaeminezhad N. Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot. International Journal of Computer Applications. 2015. Vol. 113, № 3. P. 6–9. https://www.researchgate.net/publication/276344731_Kinematic_Model_of_a_Four_Mecanum_Wheeled_Mobile_Robot

УДК 625.7/.8

Мельник В.Б. канд.техн.наук, доцент
Леусенко Д.В., доктор філософії
Конарева В.В., магістр

Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ
Національний транспортний університет, м. Київ, melnikvb408@gmail.com

ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ WIM (Weigh-In-Motion) КОМПЛЕКСІВ

Система WIM (Weigh-In-Motion) – це високотехнологічний вимірювальний комплекс, призначений для автоматичного зважування транспортних засобів (далі - ТЗ) у русі, визначення їх габаритів, осьових навантажень, швидкості руху та типу транспортного засобу. Робота таких систем базується на принципі перетворення механічного тиску коліс транспортного засобу, що рухається, на електричний сигнал за допомогою спеціальних датчиків, розташованих у дорожньому полотні. WIM функціонує на основі вимірювання фізичних характеристик транспортного засобу під час його руху. Система реєструє силу тиску коліс на дорожнє покриття, габаритні параметри ТЗ, швидкість руху та інші характеристики, необхідні для визначення маси.

Процес роботи WIM можна поділити на кілька етапів:

1 етап Реєстрація сигналів від датчиків – кожне колесо транспортного засобу проходить через сенсор, який вимірює силу тиску;

2 етап Перетворення фізичних величин у цифровий сигнал – отримані дані переводяться у форму, яку обробляє комп'ютер;

3 етап Обробка сигналів і фільтрація шумів – система усуває похибки, пов'язані з нерівністю дороги або коливанням ТЗ;

4 етап Визначення маси та навантаження на осі – після аналізу даних алгоритм розраховує масу окремих осей і загальну масу транспортного засобу.

Дані етапи забезпечують високу точність вимірювань без необхідності зупинки транспортного засобу. Всі датчики на комплексах працюють синхронно: тензодатчики визначають масу, індуктивні – кількість осей і швидкість, оптичні – габарити ТЗ.

Приклад роботи: тривісна вантажівка з вантажем проходить через WIM. Тензодатчики реєструють тиск на кожну вісь, а також шинність ТЗ, індуктивні датчики визначають, що осей три, а лазерні – що відстань між осями відповідає шаблону тривісної вантажівки. Алгоритм об'єднує ці дані, обчислює загальну масу та визначає тип ТЗ.

Важливо те, що на комплексах компенсуються похибки, тобто сама система враховує нерівності дороги, коливання кузова та погодні умови. Наприклад, якщо вантажівка проїжджає по невеликій ямці, тензодатчик зафіксує тимчасове збільшення або зменшення тиску. Алгоритм компенсує цей ефект, усереднюючи значення, щоб не виникало помилкових сигналів про перевантаження.

Якщо взяти до уваги всі вищезазначені дані можемо узагальнити та детально розглянути роботу WIM комплексів:

Відразу після виявлення індукційними петлями транспортного засобу система визначає напрямок та швидкість руху. У момент, коли колеса проїжджають через вимірювальну зону, п'єзоелектричні, тензорезисторні або кварцові датчики реєструють силу тиску на дорожнє покриття. Отримані сигнали передаються в електронний блок обробки даних, де вони перетворюються на цифрову форму. Програмне забезпечення виконує температурну компенсацію, фільтрацію шумів, а також розрахунок навантаження на кожну вісь і загальної маси транспортного засобу.

Окрім зважування, WIM комплекси здійснюють вимірювання габаритних параметрів за допомогою лазерних або інфрачервоних сканерів. Це дозволяє визначити довжину, ширину та висоту транспортного засобу під час його руху.

Важливою функцією системи є автоматичне визначення типу транспортного засобу. WIM-комплекс здійснює класифікацію транспортного засобу за низкою параметрів, зокрема кількістю осей, відстанню між ними, загальною довжиною, розподілом маси та навантаженням на кожну вісь. Отримані дані порівнюються з еталонними профілями, що відповідають різним типам транспортних засобів (легковий автомобіль, автобус, дво- чи тривісна вантажівка, автопоїзд тощо).

Процес класифікації здійснюється автоматично за допомогою вбудованих алгоритмів обробки даних. У сучасних системах WIM застосовуються моделі класифікації, побудовані на основі міжнародних стандартів, зокрема COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicles for Europe та ДСТУ OIML R 134-1:2010 Прилади автоматичні для зважування дорожніх транспортних засобів у русі та вимірювання навантажень на вісь, які передбачають врахування кількості осей, міжосьових відстаней та динамічних характеристик транспортного засобу. Також комплекси можуть додатково використовувати відеоаналітику для покращення точності класифікації ТЗ.

Після визначення типу транспортного засобу система автоматично порівнює результати вимірювань із допустимими нормативами для даної категорії. У разі виявлення перевищення допустимих осьових навантажень чи загальної маси формується повідомлення про порушення, яке передається до інформаційно-комунікаційної системи автоматичної фіксації габаритно-вагового контролю на дорогах (САФ ГВК) у вигляді метаданих.

Таким чином, WIM-комплекс забезпечує комплексний контроль транспортного потоку, здійснюючи автоматичне вимірювання параметрів транспортних засобів у русі, їх класифікацію та формування інформаційних звітів. Його принцип роботи ґрунтується на поєднанні механічних, електронних, оптичних та програмних технологій, що дозволяє отримувати достовірні результати у реальному часі.

Основними показниками якості WIM комплексу є такі:

1. Похибка вимірювання

Похибка визначає відхилення результату вимірювання від істинного значення маси або осьового навантаження транспортного засобу. Вона складається з випадкової та систематичної складових і залежить від типу сенсорів, швидкості руху, температурних умов, стану дорожнього покриття та коректності калібрування.

2. Відтворюваність результатів

Це здатність системи забезпечувати однакові результати за повторних вимірювань одного й того ж транспортного засобу при аналогічних умовах. Висока відтворюваність свідчить про стабільність роботи датчиків і коректну обробку сигналів.

3. Стабільність показань у часі

Стабільність визначає, наскільки вимірювальні характеристики комплексу залишаються незмінними протягом тривалого періоду експлуатації. На неї впливають знос датчиків, зміни температури, вологості, а також коректність регулярного технічного обслуговування та калібрування.

4. Надійність і безперервність роботи

WIM комплекс повинен забезпечувати стабільну роботу в режимі 24/7/365 за будь-яких погодних умов. Надійність оцінюється за середнім часом безвідмовної роботи, кількістю успішно оброблених проїздів та стійкістю до електромагнітних і кліматичних впливів. Кожен комплекс має бути обладнаним автономним джерелом живлення і у разі відключення від електромережі чи мережі Інтернет повинен збирати та обробляти дані.

5. Достовірність класифікації транспортних засобів

Точність автоматичного визначення типу транспортного засобу (легковий, автобус, вантажівка тощо) є важливим критерієм якості, оскільки саме від правильності класифікації залежить подальша інтерпретація результатів зважування. Сучасні системи мають забезпечувати достовірність класифікації не нижче 95–98 %.

6. Повнота та цілісність даних

Якість роботи WIM-комплексу також визначається повнотою зібраної інформації — наявністю усіх параметрів (дата, час, маса, габарити, швидкість, зображення ТЗ, тип ТЗ). Важливо, щоб система не допускала втрат даних при передачі до центрального сервера.

7. Калібрування та повірка

Регулярна метрологічна повірка є обов'язковою процедурою, що підтверджує придатність системи до експлуатації. Від вибору повірочної лабораторії та точності її еталонного обладнання залежить значення приведеної похибки, що вноситься у сертифікат повірки, при цьому значення приведеної похибки не повинно перевищувати допустимих меж, визначених для класу точності, у межах якого проходить повірку даний вимірювальний комплекс. Це забезпечує узгодженість результатів повірки з метрологічними вимогами до систем зважування у русі.

Оцінка якості роботи WIM-комплексів проводиться на основі аналізу зазначених показників, що дозволяє визначити придатність системи для контролю транспортного потоку, зважування у русі та фіксації порушень перевищення маси чи габаритів.

УДК 614.895.5:536.3:535.34

Виноградов А.Г., докт. техн. наук

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
vynogradov.ag@gmail.com

Стась С.В., канд. техн. наук, доцент

Колесніков Д.В., канд. техн. наук, доцент

Мигаленко К.І., канд. техн. наук, доцент

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси,
kolesnikov_denys@nuczu.edu.ua**ЗАХИСНА МАСКА ПОЖЕЖНИКА З ТОНКИМ ШАРОМ ВОДИ**

Одним із головних чинників, які зумовлюють небезпечний вплив пожежі на навколишнє середовище, є теплове випромінювання. Його частка в енергетичному балансі пожежі може досягати 30–50%, в залежності від горючої речовини і умов горіння [1, 2]. У зв'язку з цим, важливою є проблема захисту пожежників від впливу теплового випромінювання. Із цією метою, зокрема, використовують захисні костюми тепловідбивного типу. Прикладами таких костюмів є «Індекс-800», «Індекс-1», «Індекс-3» (Україна), Х-40 (США), 4НК (Китай). Поверхня тепловідбивного костюма є здатною ефективно відбивати падаюче на неї електромагнітне випромінювання пожеж. Таким чином, досягається мета захисту майже всього тіла пожежника, за виключенням обличчя, оскільки захисна маска для обличчя повинна залишатися прозорою в оптичному діапазоні для забезпечення функції зору. Існуючі зразки костюмів такого типу обладнані захисними масками, які мають суттєві недоліки. У якості матеріалу для виготовлення ілюмінатора в таких масках використовують пластину полікарбонату. Проте відомо, що спектр випромінювання пожеж на 90–95% (за потужністю) лежить в інфрачервоній, а решта – у видимій ділянці спектру. Полікарбонат не здатен забезпечити ефективний захист обличчя, оскільки він є прозорим не лише для видимої, але й для інфрачервоної ділянки спектру.

Об'єктом дослідження є захисна маска пожежника з оглядовим ілюмінатором, в якому в якості оптичного фільтра використовується тонкий шар води. Маска вказаної конструкції покликана вирішити проблему захисту обличчя пожежника від інтенсивного теплового випромінювання в зоні пожежі. Ілюмінатор маски представляє собою дві паралельні прозорі пластини із проміжком між ними, через який неперервно протікає вода (рис. 1).

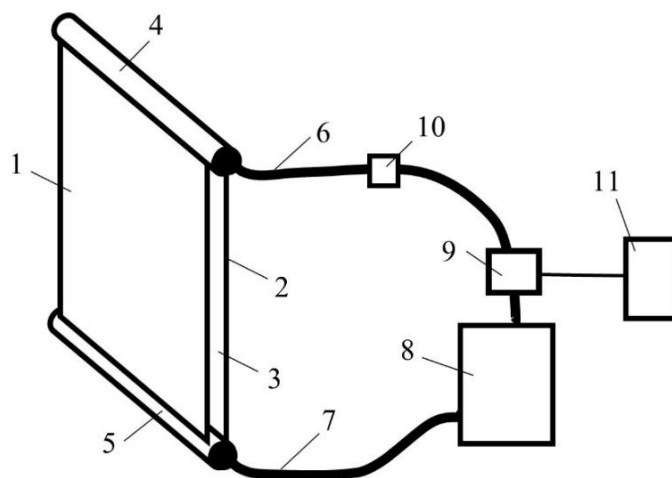


Рис. 1. – Схема оглядового ілюмінатора: 1, 2 – прозорі пластини; 3 – проміжок між пластинами; 4, 5 – засоби для підведення і виведення води з проміжку; 6, 7 – трубопроводи для води; 8 – резервуар для води; 9 – насос; 10 – регулюючий кран; 11 – джерело живлення

В ілюмінаторі використовуються унікальні оптичні властивості води, яка є прозорою у видимій ділянці спектру і непрозорою в інфрачервоній ділянці, характерній для випромінювання пожеж. Крім функції ослаблення променистого теплового потоку, вода виконує також функцію охолодження захисної маски. В роботі виконано теоретичний аналіз фізичних процесів, отримано розрахункові формули, виконано оцінкові розрахунки конструктивних і експлуатаційних параметрів захисної маски для типових умов роботи в зоні пожежі. Для виконання цієї задачі використано результати математичного моделювання процесу екранування теплового випромінювання пожеж струменями розпиленої води, представлені в роботах [3-6]. Для точних розрахунків оптичних властивостей води використовуються детальні таблиці значень дійсної та уявної частин комплексного показника заломлення залежно від довжини хвилі [7, 8]. Зокрема, визначено методику розрахунку витрати води, зміну її температури, ослаблення променистого теплового потоку при заданих умовах в зоні пожежі. Наприклад, для інтенсивності теплового потоку 25 кВт/м^2 , ефективної температури осередку пожежі 1200 К і товщини шару води в ілюмінаторі 1 мм отримано ослаблення теплового потоку в 15 разів (див. табл. 1). При цих умовах граничний час роботи в зоні пожежі досягає 12 хвилин, що втричі перевищує аналогічний параметр для існуючих зразків тепловідбивних костюмів.

Таблиця 1 – Коефіцієнт пропускання теплового випромінювання η при $d = 1 \text{ мм}$ для різних значень ефективної температури осередку пожежі T_f

$T_f, \text{ К}$	800	1000	1200	1500	1800
η	0,006	0,029	0,065	0,129	0,198

Ці параметри свідчать про можливість суттєвого вдосконалення захисних масок пожежників. За умови експериментального підтвердження результати роботи можуть знайти практичне застосування у конструкторських установах, що займаються розробкою захисного протипожежного спорядження [9].

Список посилань

1. Filkov, A I., Tihay-Felicelli, V., Masoudvaziri, N., Rush, D., Valencia, A. et al. (2023) A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment // Fire safety journal, 140: 103871.
2. Penney G., Modelling of the Radiant Heat Flux and Rate of Spread of Wildfire within the Urban Environment // Fire (Basel). – 2019. – Vol. 2, Issue 1. – P. 4.
3. Виноградов А.Г. Поглощение лучистого теплового потока в распыленной водяной струе // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», сер. Машинобудування. – 2012. – № 65. – с. 145-152.
4. Виноградов А.Г., Яхно О.М. Расчет параметров противопожарных струй распыленной воды // Прикладна гідромеханіка. – 2015. – Т.17. – № 4. – с. 3-13.
5. Виноградов А.Г., Яхно О.М. Еквівалентний діаметр крапель струменів розпиленої води та його залежність від технічних параметрів // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», сер. Машинобудування. – 2016. – № 1 (76). – с. 39-45.
6. Виноградов А.Г. Развитие научных основ систем защиты работников от потужних теплових випромінювань водяними завісами // Дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.26.01 – «Охорона праці». – Черкаси, 2017. – 355 с.
7. Hale G.M. Optical constants of water in the 200 nm to 200 mm wavelength region / G.M. Hale, M.P. Querry // Appl. Optics. – 1973. – V. 12, No. 3. – P. 555–563.
8. Segelstein D. The complex refractive index of water: MS thesis / D. Segelstein. – University of Missouri, Kansas City, 1981. – 167 p.
9. Vynogradov, A., Kolesnikov, D., Stas, S., Myhalenko, K. Design of a fire fighter's protective mask with a thin layer of water // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2026. – Vol. 10 (139), № 1. – p. 49–59.

УДК 621.65

Сукрут С.В., аспірант
Ратушний О.В., канд. техн. наук, доцент
Сумський державний університет, stassykryt@gmail.com

ПРОБЛЕМИ ПЕРЕДНІХ ЩІЛЬОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ У ВІДЦЕНТРОВОМУ НАСОСІ НИЗЬКОЇ ШВИДКОХІДНОСТІ

Відцентрові насоси низької швидкохідності є незамінними у хімічній, нафтопереробній та енергетичній галузях. Вони перекачують рідини при значних напорах і малих витратах. Саме ця особливість і породжує головну проблему. Робоче колесо таких насосів має велике відношення зовнішнього діаметра до діаметра входу, що суттєво ускладнює роботу ущільнюючих вузлів. Одним із таких вузлів є переднє щільове ущільнення, яке є одним із визначальних факторів енергетичної ефективності. Питанню впливу геометрії ущільнюючого зазору на об'ємні втрати присвячені роботи ряду дослідників, які показали, що відносна величина перетікань через зазор безпосередньо залежить від його радіального розміру, довжини та перепаду тиску на ньому.

Переднє щільове ущільнення це безконтактний елемент. Ніякого тертя, ніякого зносу в класичному розумінні. Його суть зводиться до кільцевого зазору між вхідним патрубком робочого колеса та розточкою корпусу. Різниця тисків між виходом і входом колеса змушує частину рідини рухатись у зворотному напрямку, крізь цей самий зазор назад, у всмоктувальну порожнину. Виникають внутрішні об'ємні втрати, які знижують подачу та ефективність насоса.

Переваги таких ущільнень очевидні. Вони прості у виготовленні, позбавлені механічного зносу через безконтактну роботу та придатні для роботи з агресивними і забрудненими середовищами. Саме завдяки цим якостям вони залишаються стандартним конструктивним рішенням у насособудуванні.

Водночас, для насосів низької швидкохідності недоліки щільових ущільнень проявляються значно гостріше. Оскільки номінальна витрата таких насосів є малою, відносна величина витоків через передній зазор може сягати 5-12% від робочої витрати. Крім того, значний перепад тисків на зазорі у поєднанні з великими дисковими втратами у передній пазусі суттєво знижує загальний ККД насоса нижче теоретично досяжного рівня. Варто зазначити, що зі зменшенням коефіцієнта швидкохідності частка цих втрат у загальному балансі енергії лише зростає, що робить задачу підвищення ефективності ущільнення особливо важливою саме для даного класу насосів.

Окремою проблемою є динамічний вплив ущільнення на ротор. При нерівномірному розподілі зазору по колу формуються значні радіальні сили, здатні збуджувати вібраційні режими та прискорювати знос підшипникових опор. Виникає замкнене коло: нерівномірний знос зазору спричиняє зростання радіальних сил, а ті, у свою чергу, ще більше прискорюють руйнування вузла.

Таким чином, традиційні щільові ущільнення мають принципові обмеження при застосуванні в насосах низької швидкохідності як з точки зору енергетичних втрат, так і з точки зору динамічної стабільності ротора. Перспективним шляхом вирішення цієї проблеми є впровадження ущільнюючих елементів вихрового типу, які за рахунок організованого обертального руху рідини у зазорі здатні одночасно зменшувати об'ємні витрати та знижувати дестабілізуючі гідродинамічні сили. Дослідження робочих характеристик таких ущільнень та їх порівняння зі щільовими аналогами є предметом подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

УДК 621.039.577:620.91](477)

Ратушний О.В., канд. техн. наук, доцент
Рибальченко В. М.

Сумський державний університет, o.ratushnij@pgm.sumdu.edu.ua

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗВИТОК ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ НАЦІОНАЛЬНОГО МАЛОГО МОДУЛЬНОГО РЕАКТОРА

Малі модульні реактори (ММР) відкривають значні можливості для реконструкції та модернізації існуючих теплоенергетичних об'єктів – насамперед ТЕЦ і ТЕС. Майданчики таких станцій уже мають готову інфраструктуру: розподільче обладнання, земельні ділянки з відповідним цільовим призначенням, доступ до водойм для систем охолодження, залізничні та автомобільні комунікації, системи стисненого повітря, хімічні склади, зберігання технічних газів, очищення стічних вод, мобільне підйомне обладнання та адміністративні будівлі. Наявність кваліфікованого персоналу дозволяє зберегти робочі місця, зменшити соціальну напругу в регіонах і суттєво скоротити капіталовкладення порівняно з будівництвом «з нуля».

ММР вирізняються високою маневреністю потужністю (швидке досягнення піку та мінімуму), меншою займаною площею (близько 40 тис. м² проти 400 тис. м² для традиційних реакторів), довшим терміном експлуатації та нижчим радіаційним фоном порівняно з вугільними ТЕЦ/ТЕС. Це робить їх ідеальною альтернативою для заміни застарілої теплової генерації, забезпечення стабільного енергопостачання енергоємних підприємств металургійної галузі, зниження залежності від імпорту енергоносіїв та підвищення екологічної безпеки.

Виконання ескізних проєктів ключового обладнання є початковим етапом створення повної концепції енергоблоку національного українського ММР з реакторною установкою ВВЕР-типу, що відповідає найвищим міжнародним стандартам. Це відкриває можливості для активної участі українських підприємств, наукових установ і державних органів у подальшому ліцензуванні, виробництві та будівництві. Дотримання найвищих стандартів ядерної та радіаційної безпеки дозволить створити безпечний, надійний та ефективний енергоблок, адаптований до українських умов.

У контексті післявоєнного відновлення ММР забезпечують автономне та стабільне енергопостачання промислових підприємств, знижують ризики, пов'язані з нестабільністю централізованих мереж, і сприяють переходу до низьковуглецевої економіки. Особлива увага приділяється металургійній галузі, де висока енергоємність процесів виплавки чавуну, виробництва сталі та прокату робить інтеграцію ММР особливо перспективною.

Існуюча нормативна база України активно гармонізується з міжнародними вимогами під специфіку ММР. Науково-технічний розвиток національної технології ММР відбувається паралельно з нормативними змінами, що забезпечує фахове узгодження норм і технологій. Виконання робіт створює підґрунтя для прискорення законодавчих змін і активної участі українських суб'єктів у розробленні та ліцензуванні ММР.

Таким чином, поєднання нормативної гармонізації, використання готової інфраструктури ТЕЦ/ТЕС та науково-технічного розвитку національної технології ММР дозволить Україні отримати сучасне, екологічне та маневрене джерело енергії, яке суттєво посилить енергетичну незалежність країни.

Успішне завершення ескізних проєктів головного циркуляційного насосу і парогенератора відкриває шлях до створення повноцінної національної технологічної лінії, що забезпечить енергетичну безпеку держави та підвищить її конкурентоспроможність на міжнародному ринку малих модульних реакторів.

Робота виконана у межах науково-дослідної роботи «Розроблення головного циркуляційного насосу і парогенератора для малого модульного реактора (SMR)» (держреєстрація № 0126U000865).

УДК 628.112.2:621.65

Кутас С., аспірант
Бондаренко О., аспірант
Сумський державний університет, kutas.sumy@gmail.com

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ СВЕРДЛОВИННОГО НАСОСА

В сучасних умовах завдяки економічним перевагам все більше розповсюдження в секторі малих та середніх витрат отримують водогінні системи з безпосередньою подачею води зі свердловини в мережу і частотним регулюванням відцентрового занурюваного насосного агрегату без використання резервуарів чистої води або водонапірних веж. Впровадження подібних децентралізованих та компактних рішень є особливо актуальним для прифронтових громад України. В умовах постійних руйнувань критичної інфраструктури вони потребують швидкого, гнучкого та енергонезалежного відновлення стабільного водопостачання з мінімальними фінансовими витратами на будівництво.

Нерівномірність графіка добового споживання води та відсутність накопичувального резервуара накладає певні обмеження щодо вибору параметрів насосних агрегатів, які б задовольняли їх енергоефективну роботу у всьому діапазоні подач.

На основі досліджень добових і сезонних графіків розбору води типового для України водозабору населеного пункту прикордонних територій обчислено та побудовано графіки погодинних потреб (подач) насоса, погодинної витрати (споживання) електричної енергії, розраховано показники питомих витрат електроенергії на перекачування одного кубічного метра води і визначено їх як нормативні для даної системи водопостачання, з урахуванням висоти підйому та довжини розподільних трубопроводів.

Обчислення виконані на підставі паспортних енергетичних характеристик насосів на номінальних частотах обертання з використанням теорії подібності для моделювання характеристик при регулюванні частоти обертання. Таким чином були отримані необхідні залежності частоти обертання $n = f(Q)$ та споживаної потужності $N = f(Q)$ від витрат води у водогоні. Відцентрові насоси мають виражений максимум ккд на подачах, близьких до номінальної, і в умовах частотного регулювання подачі при практично незмінному напорі, що має переважно статичну складову, не забезпечують максимальної енергетичної ефективності в усьому діапазоні можливих навантажень. Аналіз показав, що стандартний вибір насосу з параметрами, що забезпечують оптимум в режимі максимальних подач, не є найбільш енергоефективним.

Доведено, що оптимальним є типорозмір насосу з «перегрузом» на максимальних подачах, що забезпечує більший ккд якраз на режимах малих подач, які складають переважний час роботи агрегату. Вказаний «ефект» використано при розробці методики вибору регульованого насосного агрегата для вказаних мереж. Створена методика дозволяє робити обґрунтований вибір занурювального насосного агрегату для конкретного водозабору на основі індивідуального режиму споживання або ж скористуватися наявними середньостатистичними даними.

ДЛЯ НОТАТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

XVI Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 21 – 22 травня 2026 року, м. Чернігів Том 1

Конференцію організовано у рамках проєкту WIN2EDIH. Проєкт WIN2EDIH співфінансується Європейським Союзом. Висловлені погляди та думки належать виключно автору(ам) і не обов'язково відображають позицію Європейського Союзу чи Європейської Комісії. Європейський Союз та Європейська Комісія не несуть відповідальності за будь-яке використання цієї інформації. Проєкт WIN2EDIH отримав фінансування в межах програми «Цифрова Європа» за грантовою угодою №101191647.

Відповідальний за випуск	А.Л. Приступа
Редактор	С.П. Сапон
Комп'ютерна верстка і макетування:	О.С. Сапон



Прийнято 27.05.2026. Здано до друку 28.05.2026.
Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman.
Ум.-друк. арк. 15,35. Тираж 100 пр. Зам. № 08/25

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»
14030, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.