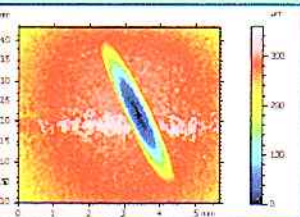
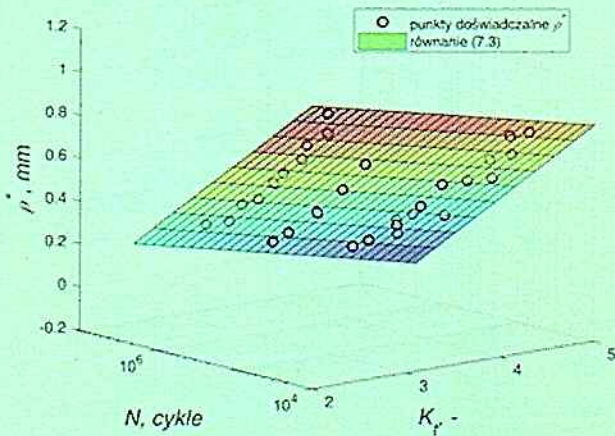


Redakcja naukowa
Marta KUREK
Andrzej KUREK
Tadeusz ŁAGODA

Procesy zmęczenia i mechanika pękania



Studia i Monografie

z. 536

Procesy zmęczenia i mechanika pękania

Redakcja naukowa

Marta KUREK

Andrzej KUREK

Tadeusz ŁAGODA



Opole 2020

POLITECHNIKA OPOLSKA

ISSN 1429-6063

ISBN 978-83-66033-76-4

POLITECHNIKA OPOLSKA

KOMITET REDAKCYJNY

Małgorzata ADAMSKA, Włodzimierz BĘDKOWSKI, Aleksander KAROLCZUK,
Mariusz MIGAŁA, Barbara MIŁASZEWICZ, Piotr NIESŁONY – przewodniczący,
Zbigniew PERKOWSKI, Jan SADECKI, Beata ŚWIERCZEWSKA

Recenzenci:

- dr hab. inż. Lucjan Witek – Politechnika Rzeszowska
dr hab. inż. Andrzej Kazberuk – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Dariusz Rozumek – Politechnika Opolska
prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda – Politechnika Opolska
dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Jarosław Gałkiewicz – Politechnika Świętokrzyska
dr hab. inż. Janusz German – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. Jerzy Okrajni – Politechnika Śląska
prof. dr hab. n.t. Dorota Kocańda – Wojskowa Akademia Techniczna
w Warszawie
prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński – Politechnika Śląska
dr hab. inż. Lucjan Śnieżek – Wojskowa Akademia Techniczna
w Warszawie
dr hab. inż. Dariusz Skibicki prof. nzw. – Uniwersytet
Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
prof. dr hab. inż. Andrzej Neimitz – Politechnika Świętokrzyska
prof. dr hab. inż. Jerzy Kaleta – Politechnika Wrocławska
prof. nzw. dr hab. inż. Paweł Pyrzanowski – Politechnika Warszawska
dr hab. inż. Tomasz Machniewicz – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
dr hab. inż. Dariusz Boroński – Uniwersytet
Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
dr hab. inż. Michał Basista – ZMM PZMK IPPT PAN Warszawa
dr hab. inż. Zdzisław Bogdanowicz prof. WAT – Wojskowa Akademia
Techniczna w Warszawie
dr hab. inż. Grzegorz Golański – Politechnika Częstochowska
prof. dr hab. inż. Aleksander Karolczuk – Politechnika Opolska

Komitet Redakcyjny Wydawnictw Politechniki Opolskiej
ul. Prószkowska 76

© Copyright by Politechnika Opolska 2020

Skład: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej.
Nakład 70 egz. Ark. wyd. 16,0. Ark. druk. 16,0.
Druk i oprawa: Sekcja Poligrafii Politechniki Opolskiej.

SPIS TREŚCI

WSTĘP	5
1. ALEXANDER BALITSKII, JACEK ELIASZ, TOMASZ OSIPOWICZ, VALENTYNA KAROL, FRANCISZEK ABRAMEK WPŁYW WODOROWEGO ŚRODOWISKA NA PROCESY ZUŻYCIA ELEMENTÓW PAR PRECYZYJNYCH WSPÓŁCZESNYCH WTRYSKIWACZY PALIWA SILNIKÓW POJAZDÓW SPECJALNYCH I POŻAROWYCH	7
2. ALEXANDER BALITSKII MECHANISM OF HYDROGEN ASSISTED NICKEL-COBALT SUPERALLOYS FRACTURE ON MESA, MICRO AND NANO LEVEL	19
3. KAROLINA GŁOWACKA, ANDRZEJ KUREK WPŁYW SPOSOBU UŁOŻENIA WŁÓKIEN NA UDARNOŚĆ MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH	31
4. GRZEGORZ GOŁAŃSKI ANALIZA PRZYCZYŃ USZKODZENIA ELEMENTU UKŁADU WYDECHOWEGO	43
5. URSZULA JANUS-GAŁKIEWICZ WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW NA PROCES PĘKANIA ŁUPLIWEGO STALI HARDOX-400	51
6. ANDRZEJ KAZBERUK, MYKHAYLO P. SAVRUK, MARTA KOSIOR-KAZBERUK KONCENTRACJA NAPRĘŻEŃ W WIERZCHOŁKACH KARBÓW W CIAŁACH PSEUDOIZOTROPOWYCH	67
7. ADAM KORBEL, TOMASZ MACHNIEWICZ, MAŁGORZATA SKORUPA PRZEWIDYWANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ NITOWYCH STOSOWANYCH W LOTNICTWIE NA PODSTAWIE ANALIZ MES	89
8. PIOTR KOSIŃSKI, PIOTR ŻACH, JAROSŁAW MAŃKOWSKI, JAROSŁAW PANKIEWICZ ANALIZA ZJAWISK ZACHODZĄCYCH PODCZAS ZNISZCZENIA WARSTWOWEJ STRUKTURY POLIMEROWO-CERAMICZNEJ	105
9. MARTA KOSIOR-KAZBERUK, ANDRZEJ KAZBERUK, ANNA BERNATOWICZ WYKORZYSTANIE KRYTERIUM ODKSZTAŁCENIOWEGO DO OCENY ODPORNOŚCI NA PĘKANIE KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH	119

10.	TOMASZ MACHNIEWICZ, SZYMON KURPIEL, PRZEMYSŁAW NOSAL, ADAM KORBEL WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I PRĘDKOŚĆ ROZWOJU PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH W DOCZOŁOWYCH POŁĄCZENIACH FSW BLACH Z LOTNICZEGO STOPU ALUMINIUM 2024-T3.....	131
11.	ZBIGNIEW MARCINIAK, DOMINIK MIŁKOWSKI WPŁYW DEFEKTU ELIPTYCZNEGO NA TRWAŁOŚĆ PRÓBEK PODDANYCH CYKLICZNEMU ZGINANIU.....	145
12.	ANDZREJ NEIMITZ, JAROSŁAW GAŁKIEWICZ EKSPERYMENTALNO-NUMERYCZNA ANALIZA CIĄGLIWYCH MECHANIZMÓW ZNISZCZENIA W STALI S355JR.....	159
13.	ANDZREJ NEIMITZ, JAROSŁAW GAŁKIEWICZ EKSPERYMENTALNO-NUMERYCZNA ANALIZA KRUCHYCH MECHANIZMÓW ZNISZCZENIA W STALI S355JR.....	173
14.	KRZYSZTOF NOWAK, JANUSZ GERMAN WIELOSKALOWY MODEL WZROSTU SZCZELINY W WARUNKACH PEŁZANIA.....	185
15.	ROLAND PAWLICZEK, KRZYSZTOF KLUGER BADANIA ZMĘCZENIOWE STOPÓW ALUMINIUM W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ BLOKOWYCH Z ASYMETRIĄ CYKLU.....	197
16.	GRZEGORZ ROBAK SZACOWANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW Z KARBEM W RÓŻNYCH STANACH OBCIĄŻENIA Z WYKORZYSTANIEM ZMIENNEJ WARTOŚCI PROMIENIA FIKCYJNEGO.....	209
17.	DARIUSZ ROZUMEK, MATEUSZ KOWALSKI WZROST PĘKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO W ŁĄCZNIKU SPAWANYM STAŁOWO-ALUMINIOWYM.....	221
18.	MYKOŁA PIDGURSKYI, MYKOŁA STASHKIV, IVAN PIDGURSKYI, ANDRIY MAKAR NUMERICAL INVESTIGATION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR THE SURFACE CRACKS UNDER COALESCENCE.....	231
	STRESZCZENIE.....	247

WSTĘP

131 Niniejsza monografia stanowi zbiór wybranych artykułów wygłoszonych na
145 XVII Krajowej Konferencji Mechaniki Pękania, która odbyła się w dniach
159 16–19.09.2019 r. w Hucisku. Organizatorem konferencji była Katedra Mecha-
niki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Opol-
skiej przy współpracy Polskim Towarzystwem Mechaniki Teoretycznej i Sto-
sowanej O/Opole. Zakres tematyczny konferencji obejmował szeroko pojętą
problematykę dotyczącą mechaniki pękania, zarówno w skali mikro jak i makro
oraz metod doświadczalnych i prognozowania uszkodzeń konstrukcji z wyko-
rzystaniem wiedzy na temat procesów powstawania i rozwoju pęknięć zmęcze-
niowych.

173 W konferencji udział wzięło 56 uczestników z 15 ośrodków akademickich,
w tym 14 z kraju i jeden ośrodek zagraniczny – Ternopil Ivan Puluj National
Technical University. Swoją obecnością konferencję o czynnik praktyczny wzbo-
gaciły firmy takie jak Zakład Technologii Wysokocenergetycznych EXPLOMET,
185 KELVION, LENS0, Rawicka Fabryka Wyposażenia Wagonów RAWAG.

197 Tematyka monografii skupia się na zjawisku zmęczenia materiałów, ze
szczególnym uwzględnieniem mechaniki pękania. Już od lat problematyka ta
jest poruszana na obradach naukowych tej konferencji, a z każdą kolejną edycją
przybywa nowych, bardzo ciekawych prac. Rozdziały niniejszej monografii
stanowią zbiór najnowszych zagadnień z obszaru procesów zmęczenia materia-
łów oraz mechaniki pękania.

209 Organizatorzy konferencji dziękują wszystkim Autorom za opracowanie
rozdziałów monografii, a Recenzentom za ich wnikliwą oraz krytyczną ocenę.

Marta Kurek
Andrzej Kurek
Tadeusz Łagoda

ALEXANDER BALITSKII^{1,2}, JACEK ELIASZ¹, TOMASZ OSIPOWICZ¹,
VALENTYNA BALITSKA³ KAROL FRANCISZEK ABRAMEK¹

¹Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, tosipowicz@zut.edu.pl

²Fizyko-Mechaniczny Instytut Państwowej Akademii Nauk Ukrainy we Lwowie

³Lwowski Państwowy Uniwersytet Bezpieczeństwa Życia

WPLYW WODOROWEGO ŚRODOWISKA NA PROCESY ZUŻYCIA ELEMENTÓW PAR PRECYZYJNYCH WSPÓŁCZESNYCH WTRYSKIWACZY PALIWA SILNIKÓW POJAZDÓW SPECJALNYCH I POŻAROWYCH

Abstract: Article shows how hydrogen wearing process affected on fuel injectors precision elements. There has been described how fuel injector work and its neuralgic points. There has been performed functional scheme of common fuel injector. The paper describes operational parameters and microscopic precision elements of fuel injectors.

WSTĘP

Zadaniem wtryskiwaczy jest dostarczenie paliwa do komory spalania silnika o zapłonie samoczynnym. Wtryskiwacze zamontowane są w głowicy silnika bezpośrednio nad komorą spalania. Ze względu na wysokie temperatury i ciśnienia na jakie są narażone, warunki ich pracy są ekstremalne. Proces wtrysku paliwa rozpatrywany jest w dwóch aspektach: jakościowym i ilościowym. Najbardziej newralgicznymi podzespołami wtryskiwacza paliwa są: rozpylacz, którego zadaniem jest odpowiednie przygotowanie paliwa do rozpylenia oraz zawór sterujący, który odpowiada za jego właściwości elektrohydrauliczne. Rozpylacz paliwa znajduje się bezpośrednio nad komorą spalania. Składa się on z obudowy i iglicy. Iglica posiada trzy strefy: parę precyzyjną, część niepracującą oraz zawór otwierający dyszę. Zawór sterujący pracą wtryskiwacza umieszczony jest w górnej jego części. Posiada on parę precyzyjną oraz gniazdo kulki sterującej. Elementy te ulegają zużyciu podczas eksploatacji [6].

Proces zużycia aparatury wtryskowej współczesnych pojazdów samochodowych zależy od wielu czynników [8]. Najbardziej istotne z nich to sposób wylinienia elementów par precyzyjnych oraz jakość paliwa [2]. Obecność procesów zużycia elementów par precyzyjnych we współczesnych wtryskiwaczach paliwa silników pojazdów specjalnych i pożarowych, między innymi w lotniślowych samochodach pożarniczych RIV 03 (Savar-Kronenburg), Protector (Closter Saro), Dragon (Iveco), Panthera (Rosenbauer) na podwoziu MAN a także MULLER Umwelttechnik do ochrony środowiska, wymaga monitorowania i zapobiegania gwałtownego pęknięcia odpowiedzialnych elementów konstrukcji podczas szybkiej interwencji (RIV – Rapid Intervention Vehicle) i spełnienia wymagania ICAO (o nie przekraczaniu reguły 100 sek.). Podczas pracy pojazdy te obciążane są maksymalnie w bardzo krótkim czasie. Powoduje to przyspieszone zużycie podzespołów silnika oraz elementów aparatury wtryskowej. Udowodniono, że podczas procesów tarcia w wyniku wysokich temperatur

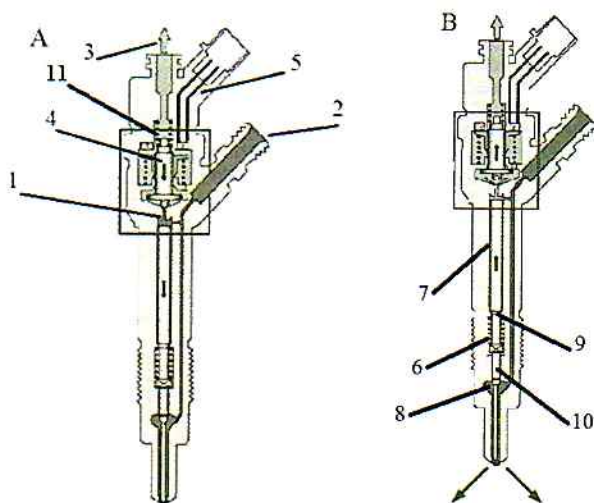
między parami kinematycznymi wytwarza się wodór, który powoduje zużycie tych elementów. Warunki robocze rozpylaczy paliwa sprzyjają temu zjawisku.

Budowa i działanie współczesnych wtryskiwaczy paliwa

Pracę elektromagnetycznego wtryskiwacza należy opisać w kilku stanach: wtryskiwacz zamknięty, faza otwarcia, faza podtrzymania przy całkowitym otwarciu oraz zamykanie wtryskiwacza paliwa (rys. 1). W momencie kiedy wtryskiwacz paliwa jest zamknięty, nie płynie przez element elektromagnetyczny prąd i zawór jest zamknięty. Element twornika dociska kulkę do gniazda zaworu za pomocą siły sprężyny znajdującej się w cewce elektromagnetycznej. W komorze sterującej wtryskiwacza paliwa znajduje się takie samo ciśnienie, co w komorze rozpylacza i w całym układzie CR. Siły przeciwstawne działające na powierzchnię czołową tłoczka sterującego i odsadzenie iglicy mają taką samą wartość, dlatego rozpylacz jest zamknięty. Kiedy przez cewkę elektromagnetyczną zaczyna płynąć prąd, zawór szybko otwiera się. Jest to etap otwarcia wtryskiwacza paliwa. Wartość prądu wynosi 20A. Siła elektromagnesu jest wyższa niż siła sprężyny, element twornika unosi się razem z kulką otwierając zawór. Po chwili następuje zmniejszenie wartości prądu do 13A i następuje faza podtrzymania. W momencie otwarcia zaworu paliwo odpywa górą przez komorę sterującą i cewkę kanałem odpływowym do zbiornika paliwa (dawka przelewowa). Ciśnienie w komorze sterującej zmniejsza się w stosunku do komory rozpylacza i układu CR. Siła działająca na powierzchnię czołową tłoczka sterującego maleje, wskutek czego iglica unosi się i rozpoczyna się wtrysk paliwa. Rozpylacz w tym momencie jest całkowicie otwarty. Tłoczek sterujący jest w górnej skrajnej pozycji. Wielkość dawki wtrysku zależy od czasu otwarcia rozpylacza i ciśnienia w układzie. Po wyłączeniu prądu przez sterownik silnika pole elektromagnetyczne w uzwojeniu cewki zanika. Zespół twornika pod wpływem działania sprężyny w cewce zostaje dociśnięty i kulka zamyka zawór sterujący. Ciśnienie w komorze sterującej wyrównuje się z ciśnieniem w układzie CR. Siła działająca na powierzchnię czołową tłoczka sterującego wzrasta i w połączeniu z siłą dociskową sprężyny znajdującą się nad iglicą zamyka rozpylacz. Wtrysk paliwa do komory spalania kończy się w momencie, gdy iglica osiągnie położenie dolnego zderzaka zamykając otwory w rozpylaczu paliwa. Zrzut cieczy roboczej w momencie pracy wtryskiwacza nazywamy dawką sterującą, natomiast dawka przelewowa jest to dawka sterująca powiększona o wielkości przecieków paliwa na elementach par precyzyjnych iglicy i tłoczka sterującego [2].

zycie
ku.

nach:
itym
kiedy
tycz-
iazda
znej.
e, co
ce na
samą
agne-
arcia
jest
rajac
faza
omo-
zele-
mory
steru-
liwa.
y jest
arcia
lnika
pod
awór
ukła-
zrasta
a roz-
glica
liwa
steru-
wiel-
steru-



Rys. 1. Zasada działania elektromagnetycznego wtryskiwacza paliwa firmy Bosch

A) wtryskiwacz niewysterowany, B) wtryskiwacz wysterowany

1 – komora sterująca, 2 – dopływ paliwa do wtryskiwacza, 3 – kanał przelewowy, 4 – zespół zawornika, 5 – cewka elektromagnetyczna, 6 – sprężyna nad iglicą, 7 – tłoczek sterujący,

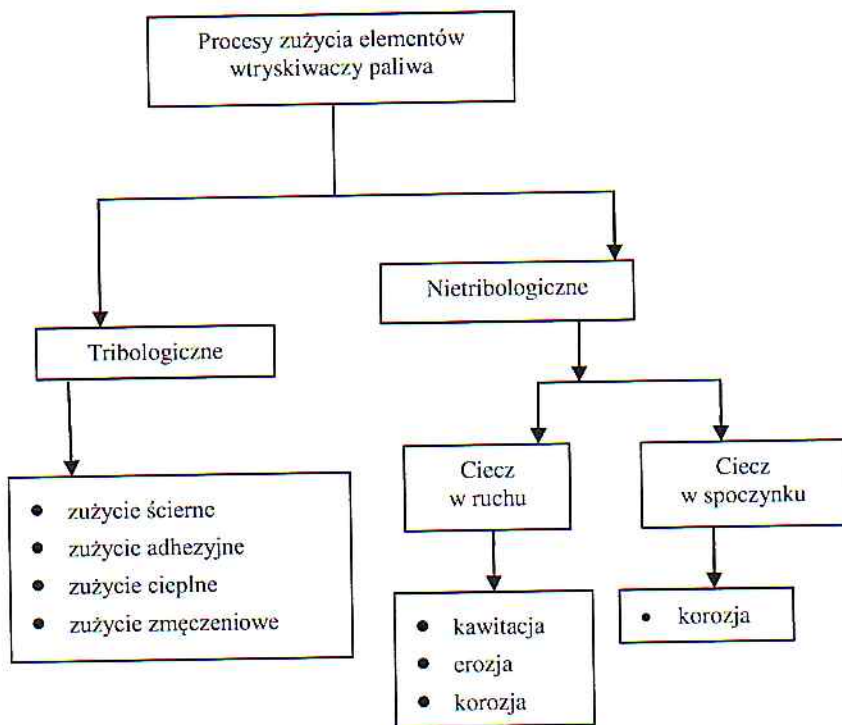
8 – komora w rozpylaczu, 9 – podkładka regulacyjna nad sprężyną, 10 – iglica

Analizując działanie elektromagnetycznego wtryskiwacza paliwa istotną rolę w jego funkcjonowaniu odgrywa stopień zużycia elementów par precyzyjnych. Wielkości przecieków wpływają na dawki wtrysku i przelewowe, moment otwarcia rozpylacza i czas reakcji wtryskiwacza paliwa. Przecieki mogą występować na iglicy albo na tłoczku sterującym. W miejscu gdzie występują wewnętrzne nieszczelności par precyzyjnych, zwiększa się temperatura korpusu wtryskiwacza paliwa.

Procesy zużycia współczesnych wtryskiwaczy paliw

Analiza procesu zużycia elementów wtryskiwaczy paliwa ma na celu wskazanie newralgicznych par trybologicznych. W wysokociśnieniowym układzie Common Rail elementami wykonawczymi są wtryskiwacze paliwa, układ regulacji ciśnienia oraz pompa wtryskowa.

Warunki robocze systemu Common Rail potęgują procesy zużycia poszczególnych jego podzespołów. Najszybciej podczas eksploatacji zużywają się elementy par precyzyjnych we wtryskiwaczach paliwa. Procesy zużycia elementów układu wtryskowego systemu CR można podzielić na trybologiczne i nietrybologiczne (rys. 2). Najczęściej zjawiska intensywności zużywania elementów układu zasilania w paliwo nakładają się na siebie, co skraca okres eksploatacji danego elementu.

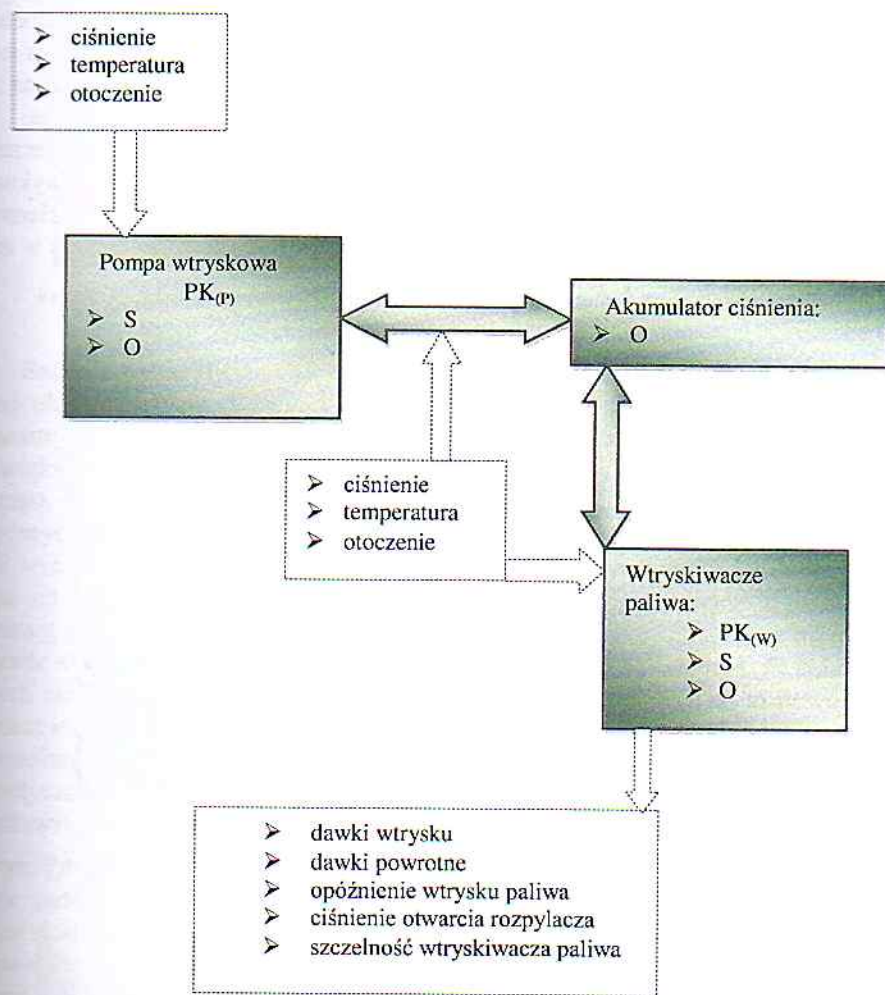


Rys. 2. Procesy zużycia elementów układu zasilania paliwem Common Rail

Zjawiska zachodzące w układzie zasilania paliwa związane z eksploatacją i zużyciem poszczególnych podzespołów można rozpatrywać w ujęciu systemowym [5]. System tribologiczny elementów układu wtryskowego składa się z par kinematycznych, substancji smarującej oraz otoczenia. Parami kinematycznymi (PK) są skojarzenia tribologiczne, w których zachodzą procesy związane z tarcieniem i zużyciem. Smarem (S) jest substancja, której wprowadzenie do elementów par kinematycznych zmniejsza ich tarcie i zużycie. Bezpośrednim otoczeniem (O) są warunki pracy systemu. W przypadku układów wtryskowych jest to paliwo, zanieczyszczenia i temperatury pracy podzespołów. Na rys. 3 przedstawiono system tribologiczny układu zasilania z systemem Common Rail.

Pompy wtryskowe firmy Bosch posiadają sekcje tłoczące. Parami kinematycznymi pompy wtryskowej (PK_(P)) będą elementy spiętrzające paliwo. Zużyciu tribologicznemu ulega również wałek napędzający z elementami sekcji wysokiego ciśnienia. Czynnikiem smarującym jest olej napędowy. To od jego jakości zależy czas eksploatacji pompy wtryskowej. Otoczeniem jest atmosfera w jakiej pracuje cały element. Czynniki przyspieszające zużycie podzespołów pompy wtryskowej to głównie zanieczyszczenia, które znajdują się w paliwie. Bardzo niebezpieczne są metaliczne opiłki, które niszczą powierzchnię współpracujących ze sobą elementów. Spiętrzone paliwo przemieszcza się przewodem wysokiego ciśnienia do szyny Common Rail, która pełni funkcję akumulatora ciśnienia. W akumulatorze dochodzi do zjawisk zużycia nietribologicznego jego

ścianki, miejsc połączeń z przewodami wysokiego ciśnienia, gniazd czujnika ciśnienia, regulatora czy zaworów zabezpieczających układ. Ostatnim elementem układu wysokiego ciśnienia systemu Common Rail są wtryskiwacze paliwa.

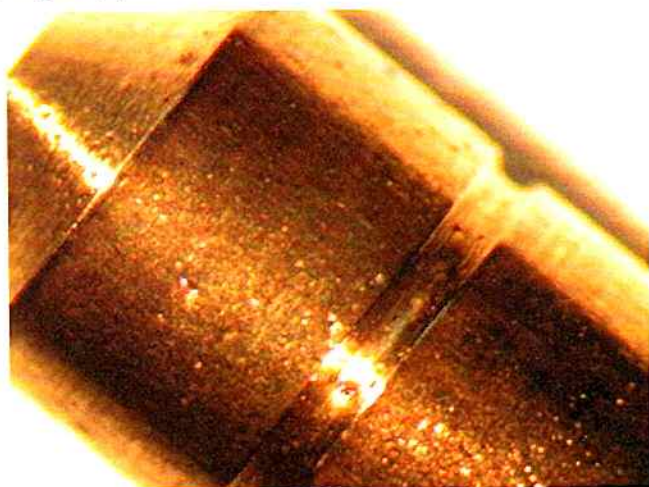


Rys. 3. System tribologiczny układu zasilania w paliwo Common Rail

We wtryskiwaczach paliwa parami kinematycznymi $PK_{(w)}$ są elementy precyzyjne zaworu sterującego oraz rozpylacza. Czynnikiem smarującym jest olej napędowy. Czynnikiem przyspieszającym proces zużycia tribologicznego w otoczeniu są zanieczyszczenia. Bardzo niebezpieczne są metaliczne opiłki powstające w pompie wysokiego ciśnienia. Powodują one zacieranie się par precyzyjnych, co znacznie zwiększa dawkę przelewową. Dodatkowo procesy zużycia nietribologicznego i zanieczyszczenia otoczenia powstałe w wyniku ich

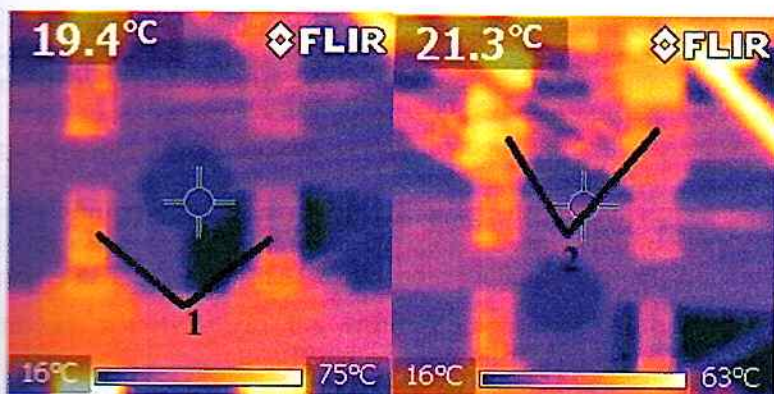
działania dodatkowo niszczą elementy par precyzyjnych i pozostałe podzespoły. Dodatkowym czynnikiem przyspieszającym procesy niszczące jest temperatura. Badania Autorów [5] wykazały, że w wyniku zużycia eksploatacyjnego dochodzi do zwiększenia dawek przelewowych w wyniku zwiększających się przecieków par precyzyjnych. W miejscach, gdzie występują nieszczelności dochodzi do zwiększenia prędkości przepływu cieczy. W następstwie tego zjawiska rośnie energia kinetyczna paliwa, co powoduje wzrost temperatury. Podwyższona temperatura pogarsza parametry smarne paliwa i przyspiesza procesy zużycia.

Niebezpiecznym zjawiskiem, które intensywnie niszczy warstwę wierzchnią podzespołów aparatury wtryskowej jest zużycie wodorowe. Badania wykazały, że w węzłach kinematycznych gdzie współpracowały ze sobą dwa elementy, zużyciu ulegał twardszy, ale wykruszane cząstki metalu były wgniatane w materiał bardziej miękki [4].



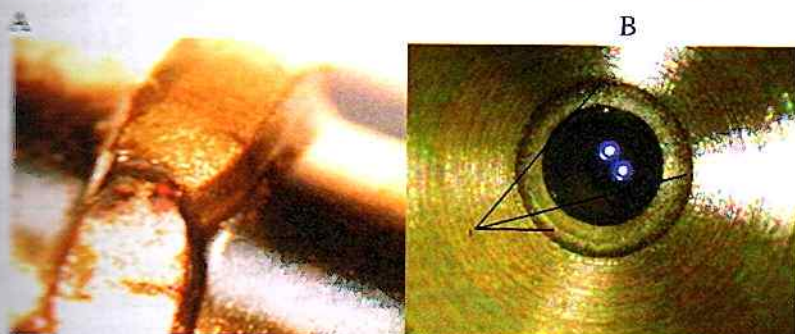
Rys. 4. Wprasowane opilki w powierzchnię pary precyzyjnej tłoczka zaworu

Wg autorów monografii [4] w teorii zużycia wodorowego występują trzy różne grupy zjawisk, które powodują przyspieszone niszczenie warstwy wierzchniej: wydzielanie wodoru w obszarze styku ciernego i jego absorpcja na powierzchni elementów współpracujących, dyfuzja wodoru w głąb warstwy wierzchniej, procesy związane z utratą plastyczności i dekohezją fragmentów warstw wierzchnich pod wpływem obciążeń na styku. Ze względu na otoczenie wewnątrz wtryskiwaczy paliwa wydzielanie wodoru może następować w wyniku rozkładu tribochemicznego substancji smarnej (paliwo) oraz dysocjacji termicznej wodoru cząsteczkowego i gazów wodoronośnych w podwyższonych temperaturach [4]. Na rys. 5 przedstawiono rozkład temperatury na korpusie wtryskiwacza paliwa 1) w strefie pary precyzyjnej rozpylacza, 2) w strefie pary precyzyjnej zaworu sterującego.



Rys. 5. Rozkład temperatury na korpusie wtryskiwacza paliwa 1) strefa rozpylacza, 2) strefa zaworu

Badania wykazały, że w wyniku eksploatacji podzespoły aparatury wtryskowej ulegają zużyciu. W wyniku niszczenia par precyzyjnych zmieniają się parametry robocze wtryskiwaczy paliwa takie jak dawka wtrysku i przelewowa. Zwiększone przecieki powodują zwiększenie temperatury pracy obiektu badawczego, co sprzyja wydzielaniu wodoru i przyśpieszeniu niszczenia par kinematycznych. Proces zużycia wodorowego ma postać pęknięcia i rozdrabniania [4]. W wyniku siły tarcia na powierzchniach par precyzyjnych dochodzi do kruszenia się warstwy wierzchniej. Powstają opiłki, które mieszają się z paliwem, zostają zgniecione i wbite w materiał, zacierając elementy precyzyjne niszcząc zawór sterujący i rozpylacz. Dodatkowo dochodzi do pęknięć (rys. 6) osłabionych elementów pod wpływem ciśnienia i temperatury. Zjawisko to powoduje znaczne zwiększenie dawki przelewowej, w wyniku czego układ CR traci szczelność. Na rys. 6B przedstawiono uszkodzone gniazdo zaworu elektromagnetycznego wtryskiwacza paliwa układu CR. Na gnieździe wystąpiło wiele odmian uszkodzeń takich jak mikropęknięcia w wyniku wydzielania się wodoru, kawitacja na krawędziach gniazda (1), erozja i dodatkowo korozja.



Rys. 6. A) Pęknięty uszczelniacz zaworu wtryskiwacza CR, B) uszkodzone gniazdo zaworu wtryskiwacza CR

Zjawiska te spowodowały, że kulka otwierająca zawór straciła szczelność i wtryskiwacz paliwa cały czas podaje paliwo do komory spalania, co niszczy silnik. Dodatkowo zanieczyszczenia powstałe w wyniku zjawiska korozji przenikają do paliwa zanieczyszczając układ [1].

Zmniejszenie zużycia wodorowego w aparaturze wtryskowej polega na zastosowaniu materiałów o zwiększonej odporności na pękanie wodorowe lub zastosowaniu odpowiednich powłok ochronnych (azotowanie iglic rozpylaczy paliwa), stosowaniu dodatków do paliwa, które zmniejszają wydzielanie się wodoru, obniżanie temperatury w obszarach elementów par precyzyjnych

Wpływ stopnia zużycia elementów par precyzyjnych na parametry robocze wtryskiwaczy paliwa układu CR

Parametry robocze wtryskiwaczy paliwa układu CR to dawka wtrysku, dawka powrotna (przelewowa), opóźnienie wtrysku paliwa i ciśnienie otwarcia rozpylacza. Dodatkowym parametrem diagnostycznym jest temperatura korpusu wtryskiwacza paliwa. Stopień zużycia podzespołów par kinematycznych znacząco wpływa na wszystkie parametry operacyjne współczesnych wtryskiwaczy paliwa. Na rys. 6 przedstawiono schemat funkcjonalny współczesnego wtryskiwacza paliwa.

Opis parametrów:

EC – cewka elektromagnetyczna, V – zespół zaworu, N – zespół rozpylacza, P_s – ciśnienie w układzie, I_T – czas wtrysku, D_I – dawka wtrysku, D_R – dawka przelewowa, NOP – ciśnienie otwarcia rozpylacza, RSP – opóźnienie wtrysku paliwa, I – wartość prądu, E_F – pole elektromagnetyczne, M_I – mechaniczne oddziaływanie pomiędzy zaworem a rozpylaczem, L_1 – przecieki w strefie zaworu, L_2 – przecieki w strefie rozpylacza, T_1 – temperatura zespołu zaworu, T_2 – temperatura strefy rozpylacza.

Standardowe metody diagnostyczne polegają na pomiarze wielkości dawek wtrysku i przelewowych przy określonych parametrach pracy układu takich jak ciśnienie oraz czas wysterowania wtryskiwacza paliwa. Najczęściej dokonuje się kilka pomiarów przy określonych dawkach wtrysku: pełnego (VL) i połowicznego obciążenia (EM), dawce wolnych obrotów (LL) i pilotażowej (VE). Przy dawce pełnego obciążenia, kiedy wtryskiwacz paliwa pracuje przy maksymalnym ciśnieniu mierzona jest wartość dawki przelewowej [3]. Producenci wychodzą z założenia, że nie ma sensu mierzyć dawek przelewowych podczas wszystkich pomiarów, ponieważ jeżeli wyniki przy maksymalnych obciążeniach są w normie, to przy pozostałych też będą prawidłowe. Jeżeli podczas testu wtryskiwacz paliwa ma za dużą wartość dawki przelewowej albo ciężko jest wyregulować wielkości dawek wtrysku, wtedy należy wymienić element zaworu oraz rozpylacz. Ze względu na niskie ciśnienia i czasy wysterowania wtryskiwacza paliwa, za wielkości dawek pilotażowych odpowiada strefa zaworu V (rys. 7). Za dawki pełnego obciążenia i wolnych obrotów strefa N (rys. 7). Dawka połowicznego obciążenia (emisyjna) jest wypadkową wszyst-

Zjawiska te spowodowały, że kulka otwierająca zawór straciła szczelność i wtryskiwacz paliwa cały czas podaje paliwo do komory spalania, co niszczy silnik. Dodatkowo zanieczyszczenia powstałe w wyniku zjawiska korozji przenikają do paliwa zanieczyszczając układ [1].

Zmniejszenie zużycia wodorowego w aparaturze wtryskowej polega na zastosowaniu materiałów o zwiększonej odporności na pękanie wodorowe lub zastosowaniu odpowiednich powłok ochronnych (azotowanie iglic rozpylaczy paliwa), stosowaniu dodatków do paliwa, które zmniejszają wydzielanie się wodoru, obniżanie temperatury w obszarach elementów par precyzyjnych

Wpływ stopnia zużycia elementów par precyzyjnych na parametry robocze wtryskiwaczy paliwa układu CR

Parametry robocze wtryskiwaczy paliwa układu CR to dawka wtrysku, dawka powrotna (przelewowa), opóźnienie wtrysku paliwa i ciśnienie otwarcia rozpylacza. Dodatkowym parametrem diagnostycznym jest temperatura korpusu wtryskiwacza paliwa. Stopień zużycia podzespołów par kinematycznych znacząco wpływa na wszystkie parametry operacyjne współczesnych wtryskiwaczy paliwa. Na rys. 6 przedstawiono schemat funkcjonalny współczesnego wtryskiwacza paliwa.

Opis parametrów:

EC – cewka elektromagnetyczna, V – zespół zaworu, N – zespół rozpylacza, P_s – ciśnienie w układzie, I_T – czas wtrysku, D_1 – dawka wtrysku, D_R – dawka przelewowa, NOP – ciśnienie otwarcia rozpylacza, RSP – opóźnienie wtrysku paliwa, I – wartość prądu, E_F – pole elektromagnetyczne, M_1 – mechaniczne oddziaływanie pomiędzy zaworem a rozpylaczem, L_1 – przecieki w strefie zaworu, L_2 – przecieki w strefie rozpylacza, T_1 – temperatura zespołu zaworu, T_2 – temperatura strefy rozpylacza.

Standardowe metody diagnostyczne polegają na pomiarze wielkości dawek wtrysku i przelewowych przy określonych parametrach pracy układu takich jak ciśnienie oraz czas wysterowania wtryskiwacza paliwa. Najczęściej dokonuje się kilka pomiarów przy określonych dawkach wtrysku: pełnego (VL) i połowicznego obciążenia (EM), dawce wolnych obrotów (LL) i pilotażowej (VE). Przy dawce pełnego obciążenia, kiedy wtryskiwacz paliwa pracuje przy maksymalnym ciśnieniu mierzona jest wartość dawki przelewowej [3]. Producenci wychodzą z założenia, że nie ma sensu mierzyć dawek przelewowych podczas wszystkich pomiarów, ponieważ jeżeli wyniki przy maksymalnych obciążeniach są w normie, to przy pozostałych też będą prawidłowe. Jeżeli podczas testu wtryskiwacz paliwa ma za dużą wartość dawki przelewowej albo ciężko jest wyregulować wielkości dawek wtrysku, wtedy należy wymienić element zaworu oraz rozpylacz. Ze względu na niskie ciśnienia i czasy wysterowania wtryskiwacza paliwa, za wielkości dawek pilotażowych odpowiada strefa zaworu V (rys. 7). Za dawki pełnego obciążenia i wolnych obrotów strefa N (rys. 7). Dawka połowicznego obciążenia (emisyjna) jest wypadkową wszyst-

kich dawek wtrysku. Ciśnienie otwarcia rozpylacza i opóźnienie wtrysku paliwa zależą od stopnia zużycia elementów par precyzyjnych.

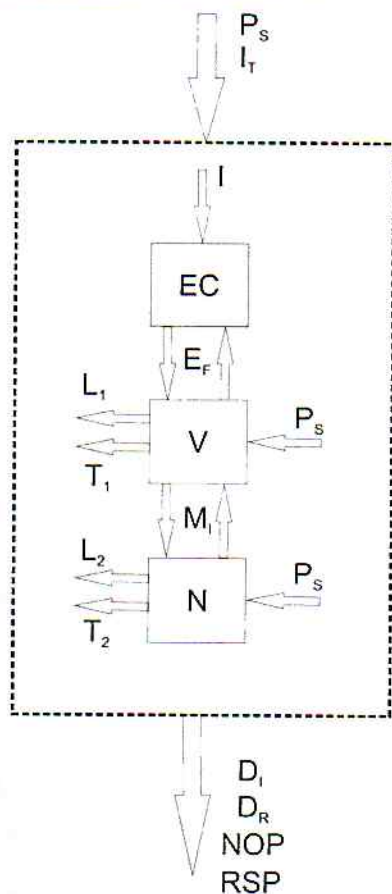


Fig. 7. Schemat funkcjonalny elektromagnetycznego wtryskiwacza paliwa układu CR

Do badań wykorzystano elektromagnetyczne wtryskiwacze paliwa firmy Bosch generacji 2.5 o nr. katalogowym 0445110369. Wtryskiwacz paliwa został poddany regeneracji. Wymieniono zawór sterujący i rozpylacz. Przed naprawą zostały zmierzone parametry robocze na urządzeniu Zapp CRU2i. Badania wykazały, że w wyniku zużycia par precyzyjnych dawki wtrysku zostały zmienione.

Tabela 1.

Parametry badanego wtryskiwacza paliwa

	Parametry	1	2
NOP	12–20 MPa	13	16
LKT	0–70 mm ³ /H	30,67	25,43
RSP	100–340 μs	371	236
VL	43,5–53,5 mm ³ /H (W)	52,83	52,97
	5–80 mm ³ /H (P) 180 MPa, 750 μs	43,54	31,18
EM	12,35–24,35 mm ³ /H 80 MPa, 610 μs	21,92	22,45
LL	2,5–9,5 mm ³ /H 30 MPa, 630 μs	6,27	6,85
	VE	0,3–3,3 mm ³ /H 80 MPa, 245 μs	0,15

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badania wtryskiwacza paliwa przed wymianą elementu zaworu (1) i po jego wymianie (2).

Wnioski

Warunki pracy pojazdów specjalnych różnią się w znacznym stopniu od osobowych i użytkowych. Celem ich działania jest wykonanie zadania w możliwie jak najkrótszym czasie bez względu na czynniki zewnętrzne. Główny cel przy ich projektowaniu to niezawodność przy maksymalnych obciążeniach silnika. Aby spełnić te wymagania podzespoły należy wykonać z najwyższej jakości materiałów z bardzo wysoką precyzją. W pracy omówiono procesy zużycia wtryskiwaczy paliwa. Wskazano ich nierzaliczne punkty, w jakich obszarach występuje degradacja materiału i przedstawiono w jaki sposób można poprawić ich niezawodność. Badania laboratoryjne zostały wykonane na elektromagnetycznych wtryskiwaczach paliwa generacji 2.5. Jest to najnowsza generacja wtryskiwaczy paliwa firmy Bosch układu CR. Analiza wykazała, że we wtryskiwaczu paliwa uszkodzeniu uległ zawór CR. Wskazuje na to znacznie obniżona wielkość dawki pilotażowej VE i zwiększona wartość dawki przelewowej podczas pomiaru VL. Dodatkowo zwiększony został parametr opóźnienia wtrysku paliwa RSP. Wydłużenie opóźnienia wtrysku paliwa zmniejsza kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa do komory spalania, co zmienia charakterystykę pracy silnika. Po wymianie zaworu sterującego pracą wtryskiwacza paliwa wszystkie parametry wróciły do normy.

Analizując wyniki badań widać w jak istotny sposób pary precyzyjne zaworu CR wpłynęły na parametry robocze badanego wtryskiwacza paliwa. W wyniku nałożenia na siebie procesów niszczących doszło do przyspieszonego zużycia badanego elementu. Jednym z takich procesów, któremu sprzyjają warunki otoczenia jest zużycie wodorowe. Otoczeniem układów zasilania w paliwo silników ZS jest olej napędowy, który składa się z węgla i wodoru. Warunki robocze wtryskiwaczy paliwa takie jak wysokie ciśnienie i temperatura sprzyjają wydzielaniu się jonów i atomów wodoru na warstwie wierzchniej elementów par

precyzyjnych powodując ich przyspieszone niszczenie. Dodatkowo pojazdy specjalne pracują przy całkowitych obciążeniach silnika. Ich zadaniem jest jak najszybsze dotarcie do celu. Takie warunki wymuszają wysokie ciśnienia temperatury w układach. Środowisko to sprzyja wydzielaniu wodoru z paliwa i podlega zużyciu podzespołów. W celu zmniejszenia procesów niszczących aparaty wtryskowej należy stosować dodatki do paliw polepszające własności smarne i obniżające temperaturę pracy elementów par precyzyjnych. Dodatkowo stosowanie powłok ochronnych zmniejsza stopień niszczenia par kinematycznych.

Literatura

- [1] BALYTS'KYI O.I., ABRAMEK K.F., SHTOECK T., OSIPOWICZ T.: *diagnostics of degradation of the lock of a sealing ring according to the loss of working gases of an internal combustion engine*. Materials Science. 2014, 50(1), 156–159.
- [2] **INFORMATOR TECHNICZNY**. Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail. Robert Bosch GmbH 2009.
- [3] KNEFEL T.: Ocena techniczna wtryskiwaczy Common Rail na podstawie doświadczalnych badań przelewów. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 1: 42–53.
- [4] KULA P.: *Inżynieria warstwy wierzchniej*. Monografie 2000. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź.
- [5] OSIPOWICZ T., ABRAMEK K.F.: *Diagnosing methods Common Rail fuel injectors*. Combustion Engines. 2017, 168 (1), 56–61.
- [6] OSIPOWICZ T., ABRAMEK K.F.: *The analysis of temperature disintegration on the body of fuel injector during research on the test bench*. Combustion Engines. 2017, 168 (1), 172–177.
- [7] OSIPOWICZ T., ABRAMEK K.F.: *Catalytic treatment in Diesel engine injectors*. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (1): 22–28.
- [8] SHTOECK T., OSIPOWICZ T., ABRAMEK K.F.: *Methodology for the repair of Denso Common Rail solenoid injectors*. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2014; 16 (2): 259–264.

Monografia, będąca zbiorem prac opisujących najnowsze zagadnienia z dziedziny zmęczenia materiału i mechaniki pękania, podzielona została na osiemnaście rozdziałów.

Pierwszy rozdział skupia się na ocenie wpływu środowiska wodoroowego na zużycie wtryskiwaczy paliwa we współczesnych pojazdach specjalnych i pożarowych. W pracy opisano parametry operacyjne i mikroskopijne przyczynne elementy wtryskiwaczy paliwa. Rozdział drugi pozostając przy zagadnieniach wodorowania, opisuje proces pękania w stopach nikielowo-kobaltowych.

Rozdział trzeci to praca, w której opisano wpływ orientacji włókien węglowych na udarność materiałów kompozytowych, autorzy wskazują na znaczące różnice w wytrzymałości materiału w zależności od sposobu ułożenia włókien ciągłych w wznaturz badanego kompozytu. Kolejny rozdział zawiera informacje na temat przyczyn uszkodzeń układów wydechowych popierając swoje konkluzje mocno rozbudowaną analizą metalograficzną. Pęknięcie trójpliwie stali Hardox-400 stanowi główny element rozdziału piątego. W szóstym znajduje się obszerna analiza dotycząca koncentracji naprężeń w karbach ciał pseudotworopowych, a siódmy porządek nielocowych i przewidywania ich trwałości w oparciu o analizy numeryczne. Wastrowe struktury poliimero-ceramiczne to temat rozważań zwartych w rozdziale ósmym. Kompozyty cementowe, i ocena ich odporności na pęknięcie z wykorzystaniem kryteriów odkształceniowych w rozdziale dziewiątym.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono wyniki badań połączeń FSW wykonanych ze stopu aluminium 2024-T3. W ramach oceny ich wytrzymałości przeprowadzono badania statycznej próby rozciągania, mikrotrwałości i rozwoju pęknięć zmęczeniowych. W rozdziale 11 autorzy przedstawili wpływ eliptycznych defektów na trwałość zmęczeniową próbek poddanych wahałomemu zginaniu z wykorzystaniem metod eksperymentalnych i numerycznych. Kolejne dwa rozdziały dotyczą ciągłych i kruchych mechanizmów zniszczenia w stali S355JR.

Wieloskalowy model oceny wzrostu szczeliny jest tematem przewodnim rozdziału czternastego. Zaproponowano nielokalną metodę CAFE do analizy zagadnienia wzrostu szczeliny w warunkach pełzania. Metoda ta łączy zalety metod mechaniki uszkodzeń z opisem energetycznym mechaniki pękania. Poprzez wprowadzenie nielokalizacji rezultatów symulacji i uszkodzeń, a tym samym możliwe jest osiągnięcie wiarygodnych rezultatów symulacji numerycznych. Zaprezentowane zostały wyniki takich symulacji dla próbki ze szczeliną centralną oraz krąwdziową. Przeanalizowano także zależność tych wyników od parametrów używanych w opisie wzrostu szczeliny w mechanice pękania.

Rozdział piętnasty natomiast zawiera rozważania na temat badań zmęczenia wycieków aluminium w warunkach obciążenia blokowego z asymetrią cyklu. W rozdziale przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych próbek o przekroju pierścieniowym poddanych dwustopniowym obciążeniom blokowym, gdzie w pierwszym etapie zastosowano obciążenie średnie skracające. Przeanalizowano wpływ tego bloku na wielkość kumulowanych uszkodzeń zmęczeniowych w zależności od wartości maksymalnej obciążenia. Badane stopy aluminium 6082-T6, 2017A-T4,

2024-T3 cechują się zblizowanymi charakterystykami zmęczeniowymi przy skrajnie w warunkach obciążeń wahałowych.

W rozdziale szesnastym autor wykorzystuje koncepcję zmiennej wartości granicznej obciążenia. Opracowany algorytm wykorzystujący zmienność wartości granicznej obciążenia pozwala na zwiększenie stosowalności istniejących metod obliczeniowych w szerszym zakresie liczby cykli. Siedemnasty rozdział zawiera informacje na temat pęknienia zmęczeniowych występujących w łązku spawalniczym wykonanym ze stali i aluminium. Autorzy na podstawie wyników badań eksperymentalnych łączników spawanych i obliczeń numerycznych formują kilka bardzo interesujących wniosków. Ostatni, osiemnasty rozdział zawiera ciekawe informacje na temat współczynnika intensywności naprężenia dla pęknienia powierzcniowych.

ISSN 1429-6063
ISBN 978-83-66033-76-4