

УДК 621.787

І. С. АФТАНАЗІВ, А. І. БАССАРАБ, Я. Б. КИРИЛІВ

## МЕХАНІЧНІ ТА КОРОЗІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛІ 40Х ПІСЛЯ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОЇ ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ

Збільшення об'ємів поверхневої зміцнювальної обробки – один із шляхів покращання експлуатаційних властивостей деталей машин у світовій практиці. Перспективною є вібраційно-відцентрова зміцнювальна обробка (ВВЗО) [1]. Фізико-механічні властивості зміцненого шару під час ВВЗО залежать від часу обробки, рівня навантаження, ексцентриситету та величини подачі.

Вивчали вплив навантаження та тривалості ВВЗО на фізико-механічні та електрохімічні характеристики сталевих поверхонь.

**Методи випробувань.** Досліджували зразки зі сталі 40Х у стані поставки та після ВВЗО на установці, розроблені в НУ “Львівська політехніка” [2]. Зразки обробляли при зусиллях (вазі інструменту)  $P_f = 35; 45$  та  $75$  N впродовж 6; 12, 20; 28 та 36 min. Мікротвердість вимірювали мікротвердоміром ПМТ-3 за стандартною методикою.

Електрохімічно досліджували в потенціостатичному режимі на потенціостаті П-5827М за триелектродною схемою. Електрод порівняння – хлоридсрібляний, насичений. Поляризаційний опір  $R_p$  визначали за методом лінійної зміни потенціалу в околі потенціалу корозії. За Стерном [3], нахилом поляризаційної кривої  $\Delta E / \Delta i$  характеризували опір електрохімічній корозії:

$$\Delta E / \Delta i = R_p = K / i_{cor},$$

де  $K = b_a b_k / [2,3 (b_a + b_k)]$ ;  $b_a$  і  $b_k$  – коефіцієнти з рівняння Тафеля відповідно анодної та катодної реакції;  $i_{cor}$  – струм корозії [3].

Для вибраної корозійної системи знімали потенціостатичні поляризаційні криві анодного і катодного процесів в діапазоні потенціалів, близьких до потенціалу корозії ( $\pm 40$  mV) з кроком 5...10 mV. На основі залежності  $E = f(i)$  графоаналітичним способом визначили нахил  $\Delta E / \Delta i$  при  $E \approx E_{cor}$ , який рівний поляризаційному опору системи ( $R_p$ ).

**Результати та їх обговорення.** Після ВВЗО мікротвердість поверхневого зміцненого шару підвищується. При вазі інструменту 35 N зі збільшенням тривалості обробки від 6 до 28 min  $H_u$  і глибина зміцненого шару  $\delta$  одночасно зростають від 5,1 до 7,1 GPa і від 5,8 до 6,7 mm відповідно (рис. 1a). Зі збільшенням ваги інструменту до 45 N мікротвердість зростає від 5,8 до 8,9 GPa, а глибина зміцненого шару – від 6,5 до 6,9 mm при аналогічній тривалості обробки (рис. 1b). Однак з подальшим зростанням ваги обкатника до 75 N мікротвердість не змінюється ( $H_u = 7,1...7,9$  GPa), а  $\delta$  збільшується до 6,9...7,1 mm (рис. 1c). Такий вплив ваги інструменту відповідає літературним даним [1].

Мікротвердість зростає лише за тривалості обробки до 28 min, уже при 36 min ( $P_f = 35$  N) знижується до 4,1 GPa (рис. 1 a) та погіршується чистота поверхні (шелушіння, мікроспотворення, відшарування поверхневого шару тощо). Подібні зміни за цієї ж тривалості при  $P_f = 45$  N, коли  $H_u$  знижується до 7,9 GPa (рис. 1 b). ВВЗО робочим інструментом вагою 75 N за досліджених тривалостей обробки не викликає негативних змін якості поверхні та мікротвердості. Зниження мікротвердості поверхні залежно від технологічних параметрів обробки (тривалості, ваги інструменту тощо) спостерігали й інші автори [4]; зокрема, під час дробоструминної обробки воно отримало назву перенаклепу. Так називатимемо стан поверхні після деяких режимів ВВЗО. Оптимальний режим обробки при даному значенні  $P_f$  можна означити як такий, за якого досягається максимальна глибина зміцненого шару за максимальної поверхневої мікротвердості та задовільної якості поверхні.

Порівнянням корозійно-електрохімічної поведінки нормалізованої сталі 40Х після токарної обробки зі значними припусками й високими швидкостями різання та відпаленої зафіксовано суттєву їх відмінність (рис. 2). Густина струмів анодних віток поляризаційних кривих відрізняються майже на порядок, потенціал корозії  $E_{cor}$  сталі після точіння зміщується

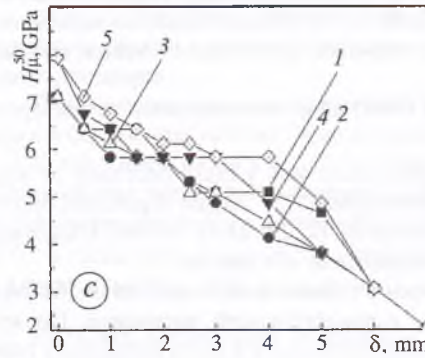
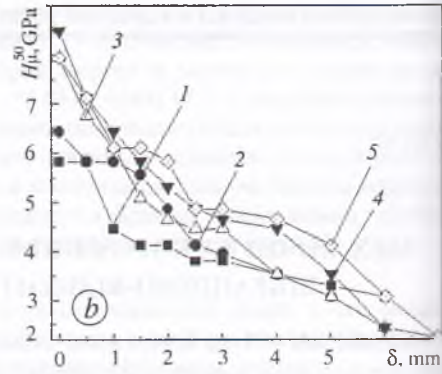
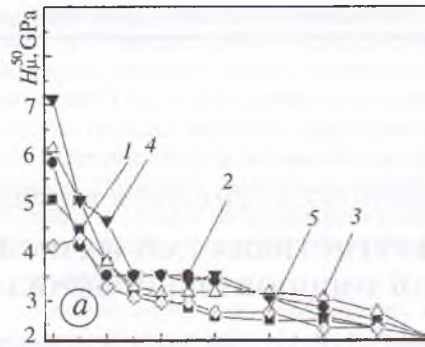


Рис. 1. Зміна мікротвердості зразків сталі 40X після ВВЗО вагою робочого інструменту 35 (а), 45 (b) та 75 N (c) при тривалості обробки 6 min (1); 12 (2); 20 (3); 28 (4) та 36 min (5).

Fig. 1. Variation of microhardness of 40X steel after vibration centrifugal treatment (VCT) by the weight of the working tool 35 (a) 45 (b) and 75 N (c), for process duration – 6 min (1); 12 (2); 20 (3); 28 (4) and 36 min (5).

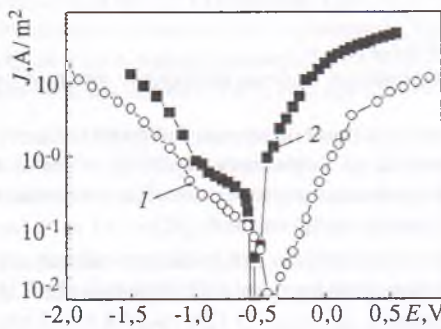


Рис. 2. Поляризаційні криві сталі 40X після відпалу (1) та токарної обробки (2).

Fig. 2. Polarization curves of 40X steel after annealing (1) and turning treatment (2).

хімічну поведінку (рис. 3). Зокрема, при ВВЗО з вагою робочого органу 35 N (рис. 3 а) не спостерігається суттєвої відмінності характеру поляризаційних кривих залежно від тривалості обробки.

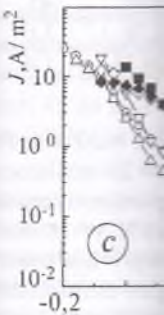
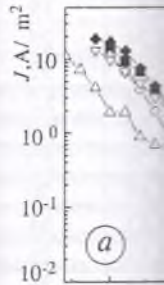
Під час ВВЗО з вагою робочого органу 45 N (рис. 3b) спостерігається відмінність корозійно-електрохімічних характеристик залежно від тривалості обробки (див. таблицю). Зіставленням поляризаційних кривих за різних тривалостей ( $\tau$ ) ВВЗО (6...20 min) за даного  $P_i$  (рис. 3b) виявлено відчутну зміну їх характеру, зокрема анодних віток. За тривалості 20 min густини анодних струмів зменшуються майже на порядок, а поляризаційний опір становить  $72 \text{ M}\Omega / \text{m}^2$ , що перевищує не лише  $R_p$  сталі після різання ( $47 \text{ M}\Omega / \text{m}^2$ ), але й у нормалізованому стані ( $64 \text{ M}\Omega / \text{m}^2$ ). Величина  $E_{cor}$  майже така, як нормалізованій (див. таблицю). Це зумовлено тим, що ВВЗО формує залишкові напруження стиску по всій глибині зміцненого шару, тоді як після механічної обробки виникають значні розтягальні напруження. Як бачимо (рис. 3b і таблиця), збільшення тривалості обробки до 28 min (при  $P_i = 45 \text{ N}$ ) забезпечує максимальну мікрос-

у від'ємну сторону (від  $-0,47$  до  $-0,52 \text{ V}$ ), поляризаційний опір знижується від  $62$  до  $47 \text{ M}\Omega / \text{m}^2$ . Оскільки, крім обробки різанням, матеріал не зазнавав іншого впливу, наведені відмінності зумовлені точнінним з силовими режимами різання.

Такі особливості впливу попередньої обробки різанням на електрохімічні характеристики, зокрема  $E_{cor}$ , відомі [5], подібно, як і вплив попередньої пластичної деформації на хід поляризаційних кривих [6]. Характер цих змін залежить від ступеня пластичної деформації, який визначає рівень механічної активації поверхні.

Зміна технологічних параметрів обробки (вага робочого органу, тривалість тещо) по-різному впливає і на ступінь деформації сталі 40X, і на її корозійно-електро-

твердість при оптичесько погіршуються а хід поляризаційних кривих можна вважати електрохімічним вищеньням  $\tau$  до 36 min (див. таблицю) тривалості. ВВЗО пластично-електрохімі-



Оскільки зміна напружень стиску і пов'язана з цим (рис. 4.) Вона порівняно з електрохімічною поведінкою пластичної обробки чітко під впливом переміщення дислокацій, які ст-

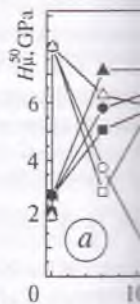


Рис. 4. Взаємозв'язок

Fig. 4. Correlation

твердість при оптимальній глибині зміцненого шару, але електрохімічні характеристики суттєво погіршуються:  $R_p$  знижується до  $32 \text{ M}\Omega / \text{m}^2$ ,  $E_{cor}$  зміщується у від'ємну сторону ( $-0,49 \text{ V}$ ), а хід поляризаційних кривих такий, як і після механічної обробки (рис. 3b). Отже, даний режим можна вважати оптимальним для одержання максимальної мікротвердості, але щодо корозійно-електрохімічних змін поведінки його можна віднести до несприятливих. З подальшим підвищенням  $\tau$  до 36 min починають проявлятися перші ознаки перенаклепу – зниження мікротвердості (див. таблицю), поява зародків відшарувань металу, різке погіршення електрохімічних властивостей. ВВЗО під навантаженням 75 N в діапазоні досліджених тривалостей не змінює корозійно-електрохімічну поведінку сталі (див. рис. 3c та таблицю) і стан перенаклепу (див. рис. 1c).

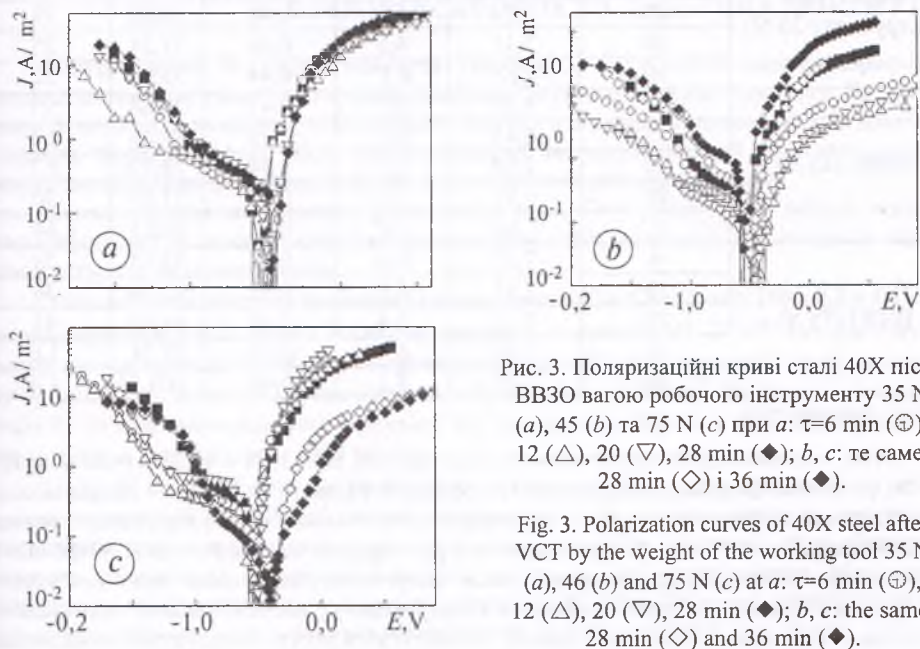


Рис. 3. Поляризаційні криві сталі 40X після ВВЗО вагою робочого інструменту 35 N (a), 45 (b) та 75 N (c) при a:  $\tau=6 \text{ min}$  ( $\oplus$ ), 12 ( $\Delta$ ), 20 ( $\nabla$ ), 28 min ( $\blacklozenge$ ); b, c: те саме, 28 min ( $\diamond$ ) і 36 min ( $\blacklozenge$ ).

Fig. 3. Polarization curves of 40X steel after VCT by the weight of the working tool 35 N (a), 46 (b) and 75 N (c) at a:  $\tau=6 \text{ min}$  ( $\oplus$ ), 12 ( $\Delta$ ), 20 ( $\nabla$ ), 28 min ( $\blacklozenge$ ); b, c: the same, 28 min ( $\diamond$ ) and 36 min ( $\blacklozenge$ ).

Оскільки зміцнення залежить від орієнтації зерен, густини дислокацій, залишкових напружень стиску, які впливають на активацію поверхні, то можна стверджувати, що з цим і пов'язана певна симбатність електрохімічної поведінки металу та рівня зміцнення (рис. 4.). Вона порушується за великих тривалостей обробки (за настання перенаклепу). Такі результати узгоджуються з літературними. Існує певний зв'язок між корозійно-електрохімічною поведінкою сталей та ступенем їх деформування внаслідок поверхнево-пластичної обробки чи механообробки [5–7]. Такі зміни в електрохімічних характеристиках під впливом першої пов'язують з перенаклепом та ефектом виходу на поверхню металу дислокацій, які стають центрами розчинення [6].

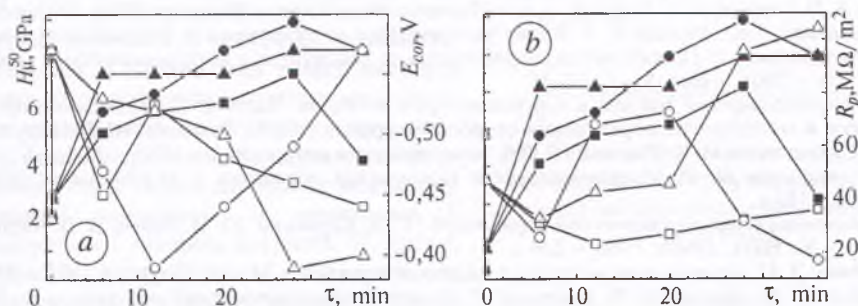


Рис. 4. Взаємозв'язок технологічного режиму ВВЗО з мікротвердістю, потенціалом корозії (a) та поляризаційним опором (b).

Fig. 4. Correlation between conditions of VCT and microhardness, corrosion potential (a) and polarization resistance (b).

Механічні та електрохімічні характеристики сталі 40X після ВВЗО

Стан зразка		$H_{\mu}^{50}$ , GPa	$\delta$ , mm	$-E_{cor}$ , V	$R_p$ , M $\Omega$ /m <sup>2</sup>	$I_a^{max}$ , A/m <sup>2</sup>
Обробка	$\tau$ , min					
Нормалізація	–	2,25	–	0,43	64,23	20
Те ж після обробки різанням	–	2,8	0,12	0,57	47,13	55
ВВЗО (вага інструменту 35 N)	6	5,08	5,8	0,45	30,92	20
	12	5,83	6,5	0,525	23,14	17
	20	6,12	6,5	0,48	26,85	19
	28	7,13	6,5	0,46	32,24	25
	36*	4,12*	6,7*	0,44	35,87	32
ВВЗО (45 N)	6	5,83	6,5	0,47	25,66	5,7
	12	6,43	6,5	0,39	68,06	2,4
	20	7,94	6,9	0,44	72,79	2,7
	28	8,91	6,5	0,49	31,69	30
	36*	7,94*	6,9*	0,57	16,83	64
ВВЗО (75 N)	6	7,13	6,9	0,53	32,67	28
	12	7,13	6,9	0,52	42,74	26
	20	7,13	6,9	0,50	45,89	45
	28	7,94	6,9	0,39	95,78	3,6
	36	7,94	7,1	0,40	104,28	1,4

\*Стан перенаклепу.

Отже, оптимальними можна вважати такі режими ВВЗО:  $P_i = 45$  N,  $\tau = 20$  min;  $P_i = 75$  N,  $\tau = 36$  min. Обробка за режимами  $P_i = 35$  N,  $\tau = 28$  min;  $P_i = 45$  N,  $\tau = 28$  min можлива для деталей зі значною твердістю та за відсутності технологічного корозійного середовища. Режим  $P_i = 35$  N,  $\tau = 28$  min можна використовувати замість  $P_i = 75$  N,  $\tau = 36$  min за технологічних обмежень на збільшення маси інструменту, які в свою чергу пов'язані зі зростанням вібраційного навантаження на конструкцію установки. Завдяки оптимальним режимам ВВЗО, залежно від умов роботи, підвищується ресурс експлуатації важкоавантажених деталей машин і механізмів.

**РЕЗЮМЕ.** Исследовано изменение механических свойств поверхностного слоя и электрохимическое поведение стали 40X, предварительно подвергнутой вибрационно-центробежному упрочнению (ВЦУ). Определены оптимальные режимы ВЦУ для повышения коррозионно-электрохимической стойкости и твердости упрочненного слоя: вес инструмента 45 и 75 N, время обработки 20 и 36 min.

**SUMMARY.** The changes of the mechanical properties of the surface layer and electrochemical behaviour of 40X steel after vibration centrifugal treatment (VCT) have been investigated. The optimum conditions for improvement of the corrosion-electrochemical behaviour and hardness of the layer after VCT are determined: the weight of tool was 45 and 75N, process duration – 20 and 36 min.

1. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням / І. С. Афтаназів, А. П. Гавриш, П. О. Киричок та ін. // Навчальний посібник. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 516 с.
2. Афтаназів І. С., Киричок Я. Б. Вплив умов обробки на ефективність вібраційно-відцентрового зміцнення // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів. – 2001. – Вип. 5. – С. 16–18.
3. Электрохимические методы в коррозиометрии металлов. Часть 1: Теоретические предпосылки и методология определения скорости коррозии / О. Н. Романив, А. Т. Цирульник, А. С. Крыськив, И. Ч. Рончевич // Физ.-хим. механика материалов. – 1989. – № 1. – С. 3–15.
4. Болховитинов Н. Ф. Металловедение и термическая обработка. – М.: Машиностроение, 1965. – 350 с.
5. Упрочнение стали механической обработкой / Г. В. Карпенко, Ю. И. Бабей, И. В. Карпенко и др. – К.: Наук. думка, 1966. – 204 с.
6. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981. – 271 с.
7. Бабей Ю. И., Бутаков Б. И., Сысоев В. Г. Поверхностное упрочнение металлов. – К.: Наук. думка, 1995. – 253 с.

Національний університет "Львівська політехніка";  
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка  
НАН України, Львів

Одержано  
15.06.2001

ЗАКОН

Електроіонопроміюючи шись, вони пер і швидко тверд вальні залишк

Вивчали електроіокрове температурних

Твердосп

та циліндричні тверді сплави т су була: 0,28;

сталі 45 до нае тягом 1 h при 1

Нанесені випромінювані залишкових на вказаним режи напруження ст ідентором ме

Залишков електролітичні

Після еле них режимах в товщиною 30

16...20 GPa та жения з макс

значення яких енергії імпуль енергією E =

максимумом 5 зростанням в

E = 7,5 J стано ся тим, що зі

зростає об'єм і кість охолоджу

лідок самовідв для зменшуєтьс

релаксації на збільшується і

отримані зі сп часі обробки 30

Відпуск з них залишкові температура в зразках (~ 250