

Дворук В.І.Національний авіаційний університет,
м. Київ, УкраїнаE-mail: dvoruk@voliacable.com**ВПЛИВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ
ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ (НТМО) НА
АБРАЗИВНУ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ
ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ**

УДК 621.891

Встановлено ефект відсутності впливу низькотемпературної термомеханічної обробки (НТМО) на абразивну зносостійкість легованої сталі. Показано можливість застосування реологічного параметру як критерію абразивної зносостійкості сталі після НТМО. Обґрунтовано неправомірність ототожнення об'ємного та абразивного руйнування сталі.

Ключові слова: низькотемпературна термомеханічна обробка, абразивна зносостійкість, реологічний параметр.

Завдання дослідження

Абразивне зношування є головним фактором, що обмежує ресурс машин, механізмів та інструменту в різних галузях господарства. Тому підвищення зносостійкості матеріалів, зокрема, легованих сталей складає вельми актуальну проблему, над якою багато років працюють вчені в усіх технічно розвинутих країнах світу.

Уявлення щодо природи та механізму абразивного зношування в умовах тертя ковзання довгий час базувались на експериментальних даних, які ураховують вплив на знос лише твердості сталей [1]. При цьому характер взаємодії одиначної абразивної частинки з поверхнею зношування не аналізувався, а її силова дія на контакт розглядалась, як одноетапна картина, подібна дії одиначного індентора.

Подальші дослідження [2, 3 та ін.] показали неадекватність такої аналогії. Доведено, що взаємодія абразивної частинки зі зношуваною поверхнею складається з двох самостійних елементарних етапів: прямого занурення в поверхню і подальшого переміщення нею за відносного руху частинки поверхнею зношування. При переміщенні частинки силове навантаження на поверхню зношування, продуковане нею, більш складне, ніж при її зануренні. Поблизу частинки можна припустити наявність двох зон деформування: зони стиску та зони розтягу; в межах цих зон діють напруження згинання, відриву та зсуву. Розвиток цих процесів поступово переходить в кінцеву фазу – зону формування та відокремлення продуктів зношування. Характер взаємодії абразивної частинки з поверхнею зношування ускладнюється тим, що вказані два етапи можуть проявитися одночасно.

Опір частинки при її переміщенні поверхнею визначається комплексом механічних властивостей останньої, в якому провідна роль належить міцнісним характеристикам [2]. Отже, в природі та механізмі абразивного зношування лежить міцнісна основа. Тому, з підвищенням міцнісних характеристик можна очікувати позитивних змін у зносостійкості сталей.

Традиційні методи зміцнення останніх, а саме: складне легування, різні види термічної обробки, наклеп поступово вичерпують свої можливості і стають все більш дорогими. Це змушує шукати нові ефективні технологічні процеси, які ґрунтуються на досягненнях сучасної науки.

Стосовно загартовуваних сталей, такі процеси реалізуються в різних схемах комбінованої обробки, зокрема термомеханічної (ТМО) – суміщення операцій термічної обробки та пластичної деформації в єдиному процесі [4]. Ефект зміцнення при ТМО зумовлений сумарною дією зміцнення, отриманого в результаті наклепу високотемпературної фази та зміцнення, що виникає при гартуванні.

Якщо при ТМО наклеп застосовується в температурній області нижче порогу рекристалізації, то її називають низькотемпературною термомеханічною обробкою (НТМО). Принципову схему зміцнення сталі за допомогою НТМО показано на рис.1. Зі схеми випливає, що метод НТМО складається в інтенсивному деформуванні сталі в області відносної стійкості аустеніту за температури вище мартенситної форми, але нижче температури рекристалізації, з наступним фазовим перетворенням. Таким чином, істотною відмінністю НТМО від ВТМО [5] є затримка охолодження аустенізованої сталі в надмартенситній області температур та деформування аустеніту в метастабільному стані. Придатний метод НТМО лише для сталей з широкою зоною стійкості аустеніту.

Результати дослідження [6] показали, що при такій обробці вдається істотно підвищити міцність сталі та зберегти задовільні пластичні властивості.

Щодо впливу НТМО на абразивну зносостійкість сталей, то до теперішнього часу це питання досліджено недостатньо. Встановлено [7], що всупереч суттєвого підвищення міцності, зносостійкість при терті закріпленим абразивом, як правило, проявляла тенденцію до зниження, незалежно від ступеня деформації та температури відпуску сталі. Зміна зносостійкості при цьому, складала 7 - 20 %, порівняно зі зносостійкістю після звичайної обробки, а, отже, знаходилась в межах похибки вимірювання. Тому її

слід було визнати статистично незначущою. Однак, автори [7], не звернули увагу на цей важливий факт і належного пояснення він не отримав. У зв'язку з цим проведено [8] додаткове вивчення абразивної зносостійкості сталі, зміцненої НТМО з кінцевою структурою відпущеного мартенситу, результати якого співпадають з результатами [7]. Отриманий ефект знайшов задовільне пояснення з позицій реологокінетичної концепції зносостійкості [3].

Метою даної роботи є подальше вивчення впливу НТМО на абразивну зносостійкість легованої сталі в різних структурних станах: мартенситному, тростинному, сорбітному та підходів до його пояснення.

Методичне забезпечення дослідження

Об'єктом дослідження була легована сталь 40ХНМА, хімічний склад якої наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваної сталі

Марка сталі	Вміст, %							
	C	Mn	Si	P	C	Cr	Ni	Mo
40ХНМА	0,40	0,68	0,27	0,03	0,021	0,76	1,50	0,18

Сталь піддавали низькотемпературній термомеханічній обробці (НТМО) за такою технологічною схемою: нагрівання вище верхньої критичної температури A_3 до аустенітного стану, переохолодження до температури 753 - 793 К в проміжну область стійкості аустеніту з тривалим інкубаційним періодом, прокатування на лабораторному стані ДУО-210 за швидкості 0,3 м/с та обтискування 15 %, 30 %, 45 %, гартування (рис. 1) та відпуск за температур 373 К, 473 К, 673 К, 873 К.

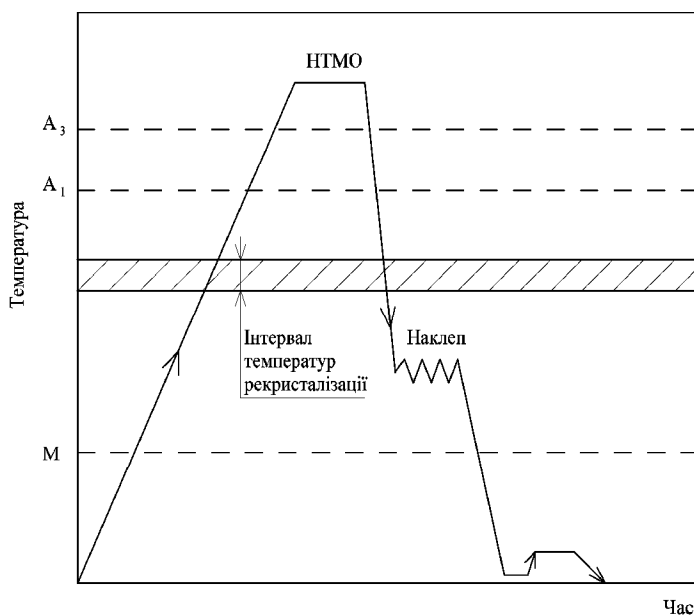


Рис. 1 – Принципова схема НТМО:
 A_1 – перша критична точка;
 A_3 – третя критична точка;
 M – точка мартенситного перетворення

Режим НТМО наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Режим НТМО досліджуваної сталі

Марка сталі	Температура критичної точки A_3 , К	Температура аустенізації, К	Тривалість аустенізації, с	Температура прокатування, К	Гартувальне середовище
40ХНМА	1018	1173	1800	773	Олива

Для виявлення ефекту комбінованої обробки (НТМО) зразки сталі піддавали звичайному гартуванню з наступним відпуском за таких самих температур.

Режим термічної обробки наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Режими термічної обробки досліджуваної сталі

Марка сталі	Температура нагрівання під гартування, К	Тривалість витримування, с	Гартувальне середовище
40ХНМА	1133	900	Олива

Після всіх варіантів обробок зразки сталі випробували на розтяг, твердість та зношування закріпленим абразивом.

Випробування на розтяг проводили за допомогою універсальної машини УММ-50, а на твердість за методом Бринеля - стаціонарного твердоміру ТШ-2М. Випробування на зношування закріпленим абразивом, проводили за методикою [9] на лабораторній установці [10], що створена на базі приладу ЛКІ-3 для випробування будівельних матеріалів на стиранність.

За результатами триботехнічних випробувань проводили оцінку реологічних властивостей та зносостійкості сталі. Реологічні властивості – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , розмір пластичної зони h_n у вершині тріщини та реологічний параметр R визначали за методиками [9].

Зносостійкість розраховували як величину зворотну абразивному зносу, який вимірювали методом зважування на електронних терезах "Nagema" (ціна поділки 0,001г).

Результати вимірювань трибомеханічних та реологічних властивостей сталі обробляли методами математичної статистики.

Експериментальна і аналітична частина дослідження

Отримані результати дослідження трибомеханічних та реологічних властивостей сталі (табл. 4) показують таке. Зносостійкість загартованої сталі істотно залежить від температури відпуску: найбільша зносостійкість спостерігається після відпуску за температури 373 К (структура тетрагонального мартенситу), а найменша – 873 К (структура сорбіту) (рис. 2).

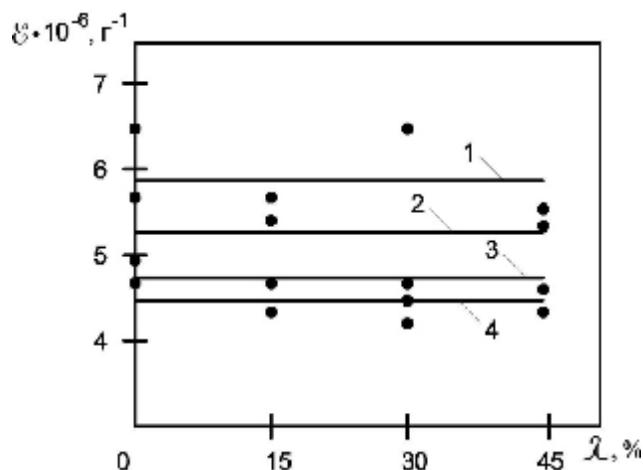


Рис. 2 – Залежність зносостійкості ϵ від ступеня деформації λ після НТМО сталі 40ХНМА за температури відпуску:
1 – 373 К; 2 – 473 К;
3 – 673 К; 4 – 873 К

Під впливом НТМО зносостійкість сталі в різних структурних станах змінюється в межах 7 - 18 % порівняно зі зносостійкістю після звичайної термічної обробки. Такі зміни є незначущими і тому можна констатувати, що НТМО несуттєво впливає на зносостійкість.

Міцність загартованої сталі також істотно залежить від температури відпуску: найбільшу міцність має сталь після відпуску за температури 473 К (структура відпущеного мартенситу), а найменшу 873 К (структура сорбіту) (рис. 3).

Залежність трибомеханічних та реологічних властивостей сталі 40ХНМА від ступеня деформації при НТМО в різних структурних станах

Марка сталі	Температура відпуску T, K	Ступінь обтискування $\lambda, \%$	Трибомеханічні властивості			Реологічні властивості		
			твердість НВ, МПа	границя міцності $\sigma_B, \text{МПа}$	зносостійкість $\varepsilon \cdot 10^6, \text{r}^{-1}$	в'язкість руйнування $K_{TC} \cdot 10^6, \text{Па}\sqrt{\text{м}}$	розмір пластичної зони $h_n \cdot 10^{-7}, \text{м}$	реологічний параметр $R \cdot 10^{10}, \text{Па}$
40ХНМА	373	0	472	1700	6,21	10,33	0,63	3,97
		15	596	2150	5,58	9,21	0,67	3,55
		30	596	2150	6,2	9,21	0,54	3,96
		45	596	2150	5,43	9,21	0,71	3,46
	473	0	486	1750	5,74	10,14	0,77	3,66
		15	513	1850	5,37	9,9	0,84	3,43
		30	513	1850	4,71	9,9	1,09	3
		45	513	1850	5,29	9,9	0,87	3,36
	673	0	403	1370	4,95	11,43	1,32	3,15
		15	432	1470	4,67	11,07	1,39	2,97
		30	432	1470	4,56	11,07	1,45	2,91
		45	432	1470	4,67	11,07	1,39	2,97
	873	0	291	960	4,76	13,5	1,99	3,03
		15	321	1060	4,5	13	2,06	2,86
		30	321	1060	4,42	12,98	2,12	2,82
		45	321	1060	4,5	13	2,06	2,86

НТМО з обтискуванням $\lambda = 15 \%$ сприяє підвищенню міцності в межах 5 - 25 % порівняно з міцністю після звичайної термічної обробки. Досягнутий при цьому рівень міцності зберігається після НТМО з обтискуваннями $\lambda = 30 \%$ і $\lambda = 45 \%$. Отже, вплив НТМО на міцність сталі слід визнати незначущим.

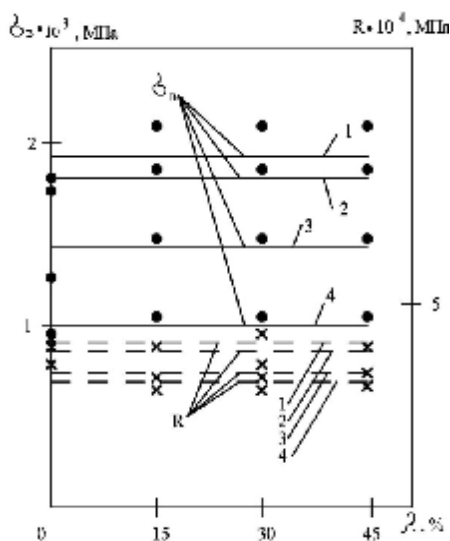


Рис. 3 – Залежність границі міцності σ_B та реологічного параметру R від ступеня деформації λ сталі 40ХНМА за температури відпуску:
 1 – 373 К; 2 – 473 К;
 3 – 673 К; 4 – 873 К

Від температури відпуску істотно залежить реологічний параметр загартованої сталі: найбільший реологічний параметр проявляється після відпуску за температури 373 К (структура тетрагонального мартенситу), а найнижчий – 873 К (структура сорбіту) (рис. 3). Після впливу НТМО реологічний параметр змінюється немонотонно в межах 7 - 14 % порівняно з реологічним параметром після звичайної термічної обробки. Тому вплив НТМО на реологічний параметр сталі також є несуттєвим.

Співставлення залежності зносостійкості від ступеня деформації при НТМО сталі (рис. 2) з аналогічними залежностями міцності та реологічного параметру (рис. 3) показують їх однакову форму, що свідчить про наявність якісного кореляційного зв'язку між ними. Щодо кількісної кореляції, то вона спостерігається лише між зносостійкістю та реологічним параметром і має такий характер: чим більше реологічний параметр, тим вище зносостійкість сталі. Кількісний зв'язок зносостійкості з міцністю простежується не завжди. Наприклад, найбільшою зносостійкістю володіє сталь зі структурою тетрагонального мартенситу (рис. 2, крива 1) в той час як найбільшою міцністю – сталь зі структурою відпущеного мартенситу (рис. 3, крива 2). Звідки випливає, що для критеріальної оцінки абразивної зносостійкості сталі, зміцненої НТМО, реологічний параметр є більш адекватним показником, ніж міцнісні характеристики.

Як відомо [3], реологічний параметр визначається відношенням (1):

$$R = \frac{K_{IC}}{h_n}, \quad (1)$$

де K_{IC} – в'язкість руйнування сталі,

h_n – розмір пластичної зони у вершині тріщини.

В'язкість руйнування K_{IC} тут одночасно є реологічною та енергетичною характеристикою [11], яка інтегрально урахує міцнісні та пластичні властивості сталі. Останній факт заслуговує на особливу увагу, оскільки між абразивною зносостійкістю та сполученням міцнісно-пластичних характеристик сталей різних структурних класів встановлено [2] функціональний зв'язок. Однак на відміну від стандартних характеристик міцності та пластичності, які є умовними показниками [12] і ураховують усереднені властивості сталі при зношуванні, показник K_{IC} оцінює її локальні властивості поблизу вершини тріщини і прив'язані до плоскодеформованого стану у вказаній зоні. З огляду на це, в'язкість руйнування K_{IC} – фундаментальна характеристика опору сталі руйнуванню, зокрема, абразивному. Щодо розміру h_n пластичної зони у параметрі R то він є реологічною характеристикою яка, з одного боку описує ступінь локалізації деформації в поверхневому шарі, а з іншого – механічний стан (зміцнення, відпуск, запас пластичності, залишкова напруженість тощо) цього шару.

Виходячи з фізичного сенсу реологічного параметру на макрорівні [13], факт його адекватності абразивній зносостійкості сталі після НТМО, встановлений в даній роботі дозволяє інтерпретувати міцнісну основу механізму абразивного зношування як опір утворенню та розвитку бокових горизонтальних тріщин на межі пластичних зон біля вершин вихідних клиноподібних тріщин в поверхневому шарі. Відомо [14], що саме ці тріщини значною мірою визначають процеси поверхневого руйнування, особливо абразивне зношування, і є однією з його головних відрізнявальних особливостей. Тому існуючу точку зору [15] щодо механізму абразивного зношування, як звичайного об'ємного руйнування, що відрізняється лише своїм масштабом слід визнати неправомірною.

Висновки

На підставі результатів проведеного дослідження можна констатувати таке:

1. НТМО, незалежно від ступеня деформації, не впливає на трибомеханічні властивості сталі при всіх температурах відпуску, порівняно зі звичайною термічною обробкою. Тому вказане зміцнення є не придатним для підвищення абразивної зносостійкості сталі.
2. Для критеріальної оцінки абразивної зносостійкості сталі, зміцненої НТМО, реологічний параметр є більш адекватним показником, ніж характеристики об'ємної міцності.
3. Міцнісну основу механізму абразивного зношування слід інтерпретувати як опір утворенню та розвитку бокових горизонтальних тріщин на межі пластичних зон біля вершин вихідних клиноподібних тріщин в поверхневому шарі сталі.
4. Абразивне зношування сталі є процесом контактного руйнування, який відрізняється від звичайного об'ємного руйнування не лише своїм масштабом, але також морфологією поверхневих тріщин та закономірностями їх розповсюдження.

Література

1. Хрущов М.М. Исследование изнашивания металлов / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: АН СССР, 1960. – 352с. – Библиогр.: – С. 337-342.
2. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов / Г.М. Сорокин. – М.: Недра, 2000. – 316 с. – Библиогр.: С. 237-245.
3. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатності механічних трибосистем: Автореф. дисертації доктора техн. наук / - К.: НАУ, 2007-40 с.
4. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов: В 2т. / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1968. – Т.2. – 1171 с.: ил., табл. – Библиогр.: С.1165.
5. Новые пути повышения прочности металлов: (Монография) / В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко. – М.: Наука, 1964. – 18 с.: ил., табл. – Библиогр.: С.111-117.
6. Бернштейн М.Л. Прочность стали / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1974. – 199 с. – Библиогр.: С.196-199.
7. Жарков В.Я. Абразивная износостойкость сталей в зависимости от термомеханической обработки ВТМО и НТМО / В.Я. Жарков, М.М. Кантор // Износ и антифрикционные свойства материалов (Трение и износ в машинах): Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1968. – Вып.20. – С. 65-71.
8. Дворук В.І. Абразивна зносостійкість теплодеформованої сталі / В.І. Дворук, С.С. Белих // Проблеми тертя та зношування: наук. тех. зб. – К.: НАУ 2012. – Вип.58. – С. 41-48.
9. Дворук В.І. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі / В.І. Дворук, О.В. Герасимова // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2007. – Вип. №47. – С. 82-94.
10. Шевеля В.В. Обеспечение триботехнических свойств композиционных материалов при абразивную изнашивании / В.В. Шевеля, В.И. Дворук, В.Е. Довжок, А.В. Радченко // Проблеми трибології. – 2000. – №1. – С. 67-72.
11. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения / К. Хеккель. – М.: Металлургия, 1974. – 64с. – Библиогр.: С.92-93.
12. Латишенко В.А. Диагностика жесткости и прочности материалов / В.А. Латишенко. – Рига: Зинатне, 1968. – 320 с.: Библиогр.: С. 274-299.
13. Дворук В.І. Абразивна зносостійкість та структура легованих сталей / В.І. Дворук, С.С. Белих // Проблеми трибології – 2012. – №1. – С. 14-19.
14. Механика контактного разрушения: (Монография) / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1989. – 224 с. – Библиогр.: С.183-219.
15. Сорокин Г.М. Новые критерии повышения долговечности машин / Г.М. Сорокин // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 19-23.

Поступила в редакцію 28.10.2013

Dvoruk V.I. Effect of low-temperature thermomechanical treatment (LTMT) on the abrasive wear resistance of stainless steel.

Found no effect of the impact of stainless steel to low-temperature thermomechanical treatment (LTMT) on the abrasive wear resistance of stainless steel. The possibility of application of rheological parameters as a criterion of abrasive wear resistance of steel after LTMT. Proved illegality identification and abrasive bulk fracture of steel.

Key words: low-temperature thermomechanical treatment, abrasive wear resistance and rheological parameters.

References

1. Hrushchov M.M., Babichev M.A. Issledovanie iznashivaniya metallov, M.: AN SSSR, 1960. 352 p. Bibliogr. P. 337-342.
2. Sorokin G.M. Tribologiya stalej i splavov. M.: Nedra, 2000. 316 p. Bibliogr.: pp. 237-245.
3. Dvoruk V.I. Reologo-kinetichna koncepcija abrazivnoї znosostijkosti ta її realizacija v keruvanni pracezdatnosti mehanichnih tribosistem: Avtoref. disertacii doktora tehn. nauk, K. NAU, 2007-40 p.
4. Bernshtejn M.L. Termomehanicheskaja obrabotka metallov i splavov: V 2t, M.: Metalurgija, 1968. T.2. 1171 p.: il., tabl. Bibliogr.: pp. 1165.
5. Ivanova V.P., Gordienko L.K. Novye puti povysheniya prochnosti metallov: (Monografija), M.: Nauka, 1964. 18 p.: il., tabl. Bibliogr.: pp.111- 117.
6. Bernshtejn M.L. Prochnost' stali, M.: Metalurgija, 1974. 199 p. Bibliogr.: pp. 196-199.
7. Zharkov V.Ja., Kantor M.M. Abrazivnaja iznosostojkost' stalej v zavisimosti ot termomehanicheskoj obrabotki VTMO i NTMO, Iznos i antifrikcionnye svojstva materialov (Trenie i iznos v mashinah): Sb. nauch. tr. M.: Nauka, 1968. Vyp.20. pp. 65-71.
8. Dvoruk V.I., Belih P.P. Abrazivna znosostijkost' teplodeformovanoї stali, Problemi tertja ta znoshuvannja: nauk. teh. zb. K.: NAU 2012. Vip.58. pp. 41-48.
9. Dvoruk V.I., Gerasimova O.V. Vpliv strukturnogo stanu na abrazivne rujnuvannja stali, Problemi tertja ta znoshuvannja: nauk. tehn. zb. K.: NAU, 2007. Vip. No47. pp. 82-94.
10. Shevelja V.V., Dvoruk V.I., Dovzhok V.E., Radchenko A.V. Obespechenie tribotekhnicheskikh svojstv kompozicionih materialov pri abrazivnuju iznashivanii, Problemi tribologii. 2000. - No1. pp. 67-72.
11. Hekkel' K. Tehnicheskoe primenenie mehaniki razrusheniya, M.: Metallurgija, 1974. 64p. Bibliogr.: pp. 92-93.
12. Latishenko V.A. Diagnostika zhostkosti i prochnosti materialov, Riga: Zinatne, 1968. 320 p.: Bibliogr.: pp. 274-299.
13. Dvoruk V.I., Belih P.P. Abrazivna znosostijkost' ta struktura legovanih stalej, Problemi tribologii: - 2012. - No1. pp.14-19.
14. Kolesnikov Ju.V., Morozov E.M. Mehanika kontaktnogo razrusheniya: (Monografija), M.: Nauka, 1989. 224 p. Bibliogr.: pp. 183-219.
15. Sorokin G.M. Novye kriterii povysheniya dolgovechnosti mashin, Vestnik mashinostroeniya. 2008. - No5. pp. 19-23.