

**Дворук В.І.**Національний авіаційний університет,  
м. Київ, Україна  
E-mail: dvoruk@voliacable.com**ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ ХРОМОМ  
КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ  
НА ЇЇ АБРАЗИВНУ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ  
ПІСЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ  
ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ (ВТМО)**

УДК 621.891

Встановлено ефект відсутності впливу легування 1 - 5 % хрому на абразивну зносостійкість середньовуглецевої сталі після ВТМО за одночасного істотного підвищення її границі міцності. Показано неможливість застосування уявлень щодо механізмів об'ємного руйнування для аналізу сутності абразивного руйнування. Доведено, що під міцнісним підґрунтям механізму абразивного зношування слід розуміти опір виникненню бокових підповерхневих тріщин.

**Ключові слова:** моноліт, легування хромом, міцність, абразивна зносостійкість, реологічний параметр, аустенітне зерно.

**Вступ**

Тертя ковзання по моноліту (великі шматки гірської породи або абразивні круги, у яких абразиви міцно зв'язані одне з одним за допомогою зв'язки) характеризується високою зовнішньою силовою дією абразиву на контактну сталеву поверхню і супроводжується зношуванням останньої, а також руйнуванням самого абразиву.

Інтенсивність вказаних процесів залежить від співвідношення міцнісних властивостей металу та абразиву. При зміні цього співвідношення на користь абразиву превалює зношування металу; якщо метал виявляється міцнішим – на передній план виходить руйнування абразиву.

Механізм абразивного зношування визначається характером взаємодії абразиву зі зношуваною поверхнею.

Довгий час силова дія на контакті розглядалась як одноактна картина, аналогічна дії індентору під час випробувань на твердість. У зв'язку з цим, уявлення щодо механізму зношування при терті ковзання по закріпленому абразиву базувались, головним чином, на експериментальних даних, що ураховують вплив на зносостійкість лише твердості металевих матеріалів. Цей методичний підхід узагальнено діаграмою «Відносна зносостійкість – твердість» металів, сталей та сплавів [1]. Аналіз вказаної діаграми дозволяє зробити ряд важливих висновків. По-перше, зносостійкість сталей у відпаленому стані прямо пропорційна їх твердості. По-друге, для сталей, зміцнених термічною обробкою зносостійкість підвищується лінійно зі збільшенням твердості. По-третє, зносостійкість металів і сталей, зміцнених холодним деформуванням не залежить від твердості. По-четверте, кожна марка сталі характеризується власною залежністю зносостійкості від твердості, яка зі зміною хімічного складу розташовується на діаграмі вище і під більшим кутом нахилу до горизонтальної вісі координат. По-п'яте, за однієї і тієї самої твердості зносостійкість металів буває різною. По-шосте, одну і ту саму зносостійкість можуть мати метали і сталі різної твердості. По-сьоме, за рівної твердості зносостійкість технічно чистих металів значно вище, ніж зносостійкість загартованих сталей. На підставі цих висновків можна констатувати, що урахування впливу лише твердості не дає адекватних уявлень щодо механізму зношування металевих матеріалів при терті ковзання по закріпленому абразиву. Отже, ототожнення характеру зовнішньосилової дії абразиву на зношувану поверхню з дією індентора під час її випробувань на твердість також слід визнати неадекватним.

Подальші дослідження показали [2, 3], що характер взаємодії абразиву зі зношуваною поверхнею складніший і в ньому можна виокремити два самостійних елементарних етапи: пряме занурення в поверхню і переміщення нею за відносного руху абразиву поверхнею зношування. При переміщенні абразиву уздовж поверхні силове навантаження, продуковане ним, сприяє розвитку напружень, що викликають деформації зминання, відриву та зрізування. Опір руху абразиву поверхнею не вичерпується однією характеристикою механічних властивостей або їх сполученням.

Характер взаємодії абразиву зі зношуваною поверхнею значно ускладнюється тим, що обидва її етапи, як правило, проявляються одночасно.

За таких умов механізм силової дії на робочу поверхню відрізняється від механізму силового навантаження металевих матеріалів при статичних та динамічних випробуваннях. Тому для жодної з механічних характеристик не виявлено стійкого кількісного зв'язку з абразивною зносостійкістю. Разом з тим, встановлено [2] якісний закон відповідності між зміною показників міцності та зносостійкістю залежно від термічної обробки сталей різних структурних класів.

Зазначені факти у своїй сукупності, з одного боку, дають підстави для визнання міцнісного підґрунтя в механізмі абразивного зношування, з іншого – вказують на специфічність абразивного руйнування, а, отже, неправомірність його ототожнення з об'ємним руйнуванням і зведення відмінності між ними лише до масштабу прояву, як це запропоновано в [4].

Слід зауважити, що на сьогодні резерви отримання високоміцних сталей із залученням основних методів – термічної обробки, легування, пластичної деформації майже вичерпані. У зв'язку з цим перспективи подальшого підвищення міцності сталі вбачаються у застосуванні сполучення або суміщення в єдиному процесі різних комбінацій вказаних методів. Так, наприклад, практичне застосування знайшло сполучення методів термічної обробки та легування сталі хромом у концентрації 1 – 5%, а також суміщення в єдиному процесі методів термічної обробки та пластичної деформації за температури вище порогу рекристалізації – високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО). Однак, незважаючи на істотне підвищення міцності, вказані схеми обробки практично не чинять впливу на зносостійкість при терті ковзання по моноліту [5, 6].

Слід розрізняти два різних ефекти зміцнення сталей:

1) зміцнення, що складається у збільшенні опору пластичному деформуванню, яке оцінюється за підвищенням міцнісних характеристик;

2) зміцнення, що складається у збільшенні опору руйнуванню, яке оцінюється за підвищенням абразивної зносостійкості [1]. Досліди, присвячені визначенню зносостійкості сталей, оброблених за вказаними схемами, свідчать, що зміцнення в результаті їх проведення відноситься цілком до ефекту першого роду. Оскільки в обох випадках основним структурним фактором зміцнення є подрібнення зерен аустеніту, яке тягне за собою відповідне зменшення розміру кристалів мартенситу [7], можна припустити, що цей фактор впливає лише на ефект першого роду і практично не впливає на ефект другого роду.

### Постановка проблеми

Для перевірки вказаного припущення науковий і практичний інтерес представляє питання щодо впливу легування хромом у сполученні з ВТМО на абразивну зносостійкість конструктивної сталі, вивченню якого присвячено цю статтю.

### Результати дослідження

Для проведення дослідження були виготовлені зразки із середньовуглецевих сталей, легованих хромом, марки та хімічний склад яких представлені в табл. 1

Таблиця 1

#### Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка сталі	Вміст, %						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
45	0,44	0,78	0,35	0,027	0,025	0,05	-
45X	0,44	0,74	0,32	0,025	0,034	0,98	-
45X2	0,44	0,63	0,27	0,027	0,024	2,17	0,07
45X3	0,44	0,59	0,27	0,027	0,024	3,12	0,09
45X4	0,44	0,66	0,26	0,027	0,025	4,18	0,09
45X5	0,44	0,59	0,27	0,030	0,024	4,94	0,09

Зразки сталей піддавали ВТМО за такою схемою (рис. 1): нагрівання до температури вище верхньої критичної точки  $A_{c3}$ , гартування за відповідного режиму (табл. 2) та подальший відпуск за температур 373К, 473К, 673К, 873К.

Таблиця 2

#### Режими гартування досліджуваних сталей

Марка сталі	Температура нагрівання під гартування, К	Тривалість витримування, с	Гартувальне середовище
45	1103	600	Вода
45X	1113	600	Вода
45X2	1123	720	Вода
45X3	1143	720	Олива
45X4	1153	900	Олива
45X5	1173	1080	Олива

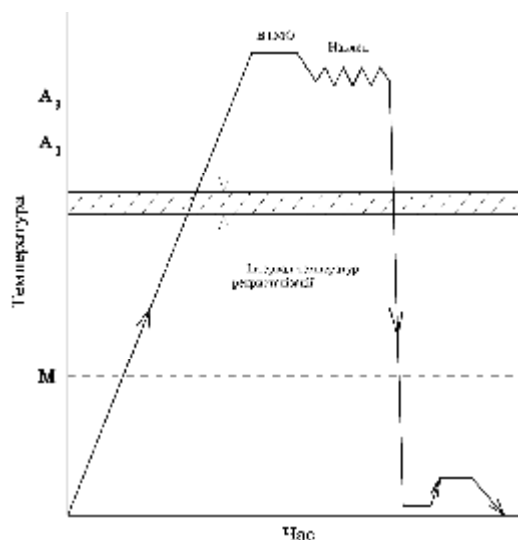


Рис. 1 – Принципова схема ВТМО сталей:  
 $A_1$  – перша критична точка;  $A_3$  – третя критична точка;  
 $M$  – точка мартенситного перетворення.

Після ВТМО зразки сталей піддавали механічним випробуванням на розтяг, удавлювання, тертя ковзання об моноліт.

Випробування на розтяг проводили за допомогою універсальної машини УММ – 50, удавлювання – стаціонарного твердоміру ТШ – 2М, тертя ковзання об моноліт – модернізованого приладу ЛКІ – 3 [8].

В результаті випробувань визначали такі характеристики сталей: границя міцності  $\sigma_e$ , твердість НВ, абразивна зносостійкість  $\epsilon$ , реологічний параметр  $R$ .

Абразивну зносостійкість  $\epsilon$  виражали величиною, зворотною абразивному зносу  $\Delta G$  який вимірювали шляхом зважування на електронних аналітичних терезах "Nagema" (ціна поділки 0,001г).

Реологічний параметр розраховували за формулою [9 - 12]. Необхідні для цього характеристики – в'язкість руйнування  $K_{1c}$  та товщину пластично деформованої зони  $h_p$  у вершинах тріщин визначали за результатами випробувань на тертя із залученням методик [13].

Результати вимірювань трибомеханічних та реологічних властивостей сталей піддавали обробці методами математичної статистики.

Аналіз результатів проведеного дослідження (рис. 2, 3) показує таке.

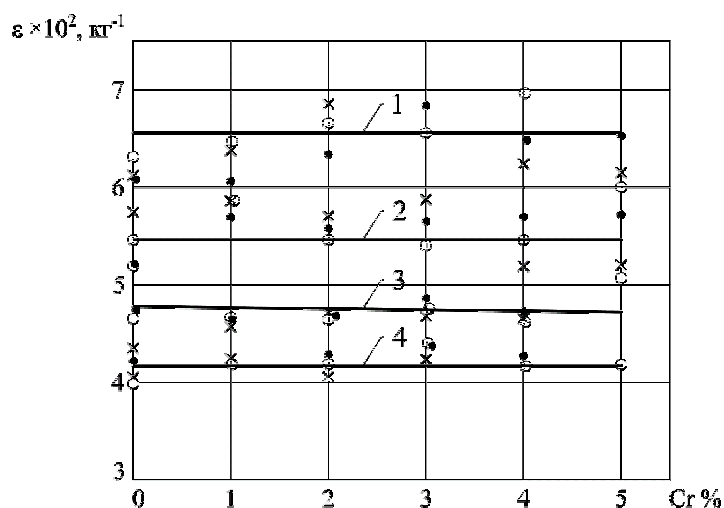


Рис. 2 – Залежність зносостійкості  $\epsilon$  сталей від вмісту в них хрому Cr за температури відпуску  $T$  та ступеня деформації  $\lambda$ :

- 1 –  $T = 375\text{K}$ ,  $\lambda = 15\%$ ,  $\lambda = 30\%$ ,  $\lambda = 45\%$ ;
- 2 –  $T = 473\text{K}$ ,  $\lambda = 15\%$ ,  $\lambda = 30\%$ ,  $\lambda = 45\%$ ;
- 3 –  $T = 673\text{K}$ ,  $\lambda = 15\%$ ,  $\lambda = 30\%$ ,  $\lambda = 45\%$ ;
- 4 –  $T = 873\text{K}$ ,  $\lambda = 15\%$ ,  $\lambda = 30\%$ ,  $\lambda = 45\%$

Зносостійкість нелегованої сталі 45, підданої ВТМО в основному визначається її структурним станом, який залежить від температури відпуску після гартування: найвищу зносостійкість показала структура тетрагонального мартенситу (температура відпуску  $T = 373$  К), а найнижчу – структура сорбіту (температура відпуску  $T = 873$  К). Зміна ступеню попередньої пластичної деформації аустеніту в діапазоні  $\lambda = 15 - 45$  % під час ВТМО неістотно впливає на зносостійкість сталі ( $\Delta\epsilon = 0 - 12$  % (рис. 2)). Отже можна зробити висновок, що фактор зменшення розміру зерен аустеніту після ВТМО практично не впливає на опір руйнуванню сталі 45 в будь-якому структурному стані.

Легування сталей 1 - 5 % хрому не вносить принципових кількісних та якісних змін у залежності їх зносостійкості від структурного стану і ступеня обтискування після ВТМО, порівняно зі сталлю 45 ( $\Delta\epsilon = 8 - 16$  % (рис. 2)). Звідки випливає, що фактор зменшення розміру зерен аустеніту в результаті легування хромом у сполученні з ВТМО не змінює опір руйнуванню сталей.

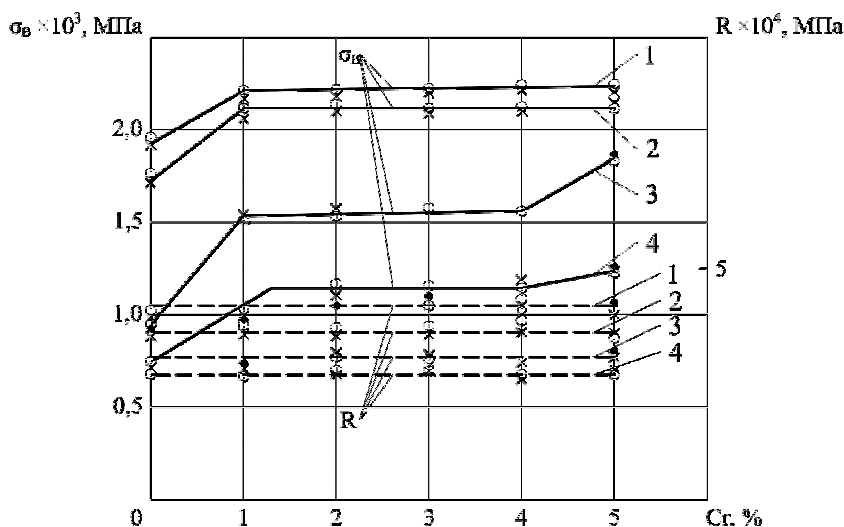


Рис. 3 – Залежність межі міцності  $\sigma_b$  та реологічного параметру  $R$  сталей від вмісту в них хрому  $Cr$  за температури відпуску  $T$  та ступеня деформації  $\lambda$ :  
 1 –  $T = 375$  К,  $\lambda = 15$  %,  $\lambda = 30$  %,  $\lambda = 45$  %;  
 2 –  $T = 473$  К,  $\lambda = 15$  %,  $\lambda = 30$  %,  $\lambda = 45$  %;  
 3 –  $T = 673$  К,  $\lambda = 15$  %,  $\lambda = 30$  %,  $\lambda = 45$  %;  
 4 –  $T = 873$  К,  $\lambda = 15$  %,  $\lambda = 30$  %,  $\lambda = 45$  %

Міцність нелегованої сталі 45, підданої ВТМО також істотно залежить від її структурного стану: найвищу міцність показала структура тетрагонального мартенситу (температура відпуску  $T = 373$  К), а найнижчу – структура сорбіту (температура відпуску  $T = 873$  К) (рис. 3). Зміна ступеню попередньої пластичної деформації аустеніту в діапазоні  $\lambda = 15 - 45$  % під час ВТМО неістотно (в межах 1 - 14 %) впливає на міцність сталі. Причому навіть такий незначний вплив проявляється лише у сталі зі структурою мартенситу, в той час, як у сталі з тростито-сорбітною структурою він практично відсутній. Таким чином можна констатувати, що фактор зменшення розміру зерен аустеніту в результаті ВТМО не чинить істотного впливу на опір пластичному деформуванню сталі 45 в будь-якому структурному стані.

Легування сталей 1 - 2 % хрому сприяє принциповим кількісним та якісним змінам залежностей їх міцності від структурного стану порівняно з нелегованою сталлю 45. Найбільше зміцнення отримали сталі з тростито-сорбітною структурою (65 - 67 %), в той час як у сталей з мартенситною структурою воно значно менше і складає 23 - 29 %. Збільшення вмісту хрому до 3 - 5 % призводить до подальшого зміцнення сталей з троститною структурою, яке сягає 99 %. У сталях з мартенситною структурою воно залишається на рівні, досягнутому після легування 1 - 2 % хрому. Ці результати дають підстави стверджувати, що фактор зменшення розміру зерен аустеніту в результаті легування 1 - 5 % хрому у сполученні з ВТМО істотно впливає на опір пластичному деформуванню сталей у всіх структурних станах. Найбільшою мірою вказаний вплив проявляється при легуванні 1 - 2 % хрому сталей з троститною структурою. Отже, зміцнюючий ефект комбінованої обробки, що складається в сполученні методів легування хромом та ВТМО досягається, головним чином, за рахунок легування хромом.

Співставлення залежностей зносостійкості (рис. 2) і межі міцності (рис. 3) від вмісту хрому в сталях після ВТМО показує відсутність корелятивного зв'язку між ними, що свідчить про неможливість застосування фізико-механічних уявлень щодо механізмів об'ємного руйнування для аналізу сутності

руйнування в умовах абразивного зношування. Пояснити це можна наявністю принципових відрізнявальних особливостей останнього, які стосуються морфології поверхневих тріщин, умов їх виникнення та розповсюдження. Тому аналіз сутності абразивного руйнування доцільніше проводити на підґрунті механіки контактної руйнування [14]. В результаті такого аналізу створено [3] реолого-кінетичну концепцію зносостійкості, показовим критерієм якої є реологічний параметр  $R$ . Фізичний сенс реологічного параметру – це опір утворенню бокових підповерхневих тріщин. Такі тріщини значною мірою визначають процеси поверхневого руйнування, закрема, абразивного і ніколи не виникають в умовах об'ємного навантаження.

Так саме як зносостійкість та міцність, реологічний параметр істотно залежить від структурного стану нелегованої сталі 45: найбільшу величину реологічного параметру показала структура тетрагонального мартенситу, а найнижчу – сорбіту. Зміна ступеня попередньої пластичної деформації аустеніту в діапазоні  $\lambda = 15 - 45 \%$  під час ВТМО неістотно впливає на реологічний параметр сталі ( $\Delta R = 0 - 11 \%$ ) (рис. 3). Отже, фактор зменшення розміру зерен аустеніту після ВТМО не впливає на опір виникненню бокових тріщин сталі 45 незалежно від її структурного стану.

Легування сталей 1 - 5 % хрому не вносить кількісних та якісних змін у залежності їх реологічного параметру від структурного стану і ступеня обтискування після ВТМО, порівняно зі сталлю 45 ( $\Delta R = 2 - 13 \%$ ) (рис. 3). Таким чином, фактор зменшення розміру зерен аустеніту в результаті сполучення методів легування хромом та ВТМО не змінює опір виникненню бокових тріщин.

Отримані закономірності реологічного параметру добре збігаються із закономірностями зносостійкості сталей (див. вище). Співставлення вказаних закономірностей показує наявність тісного корелятивного зв'язку між ними, що дає підстави для такого висновку: відсутність впливу даної комбінованої обробки на опір абразивному руйнуванню пояснюється відсутністю її впливу на опір виникненню бокових тріщин.

Той факт, що вказана обробка істотно впливає на опір пластичному деформуванню і майже не впливає на опір абразивному руйнуванню сталей вказує на необхідність перегляду існуючих уявлень [2] щодо міцнісного підґрунтя в механізмі абразивного зношування. Оскільки характеристики об'ємного руйнування не ураховують специфіку абразивного руйнування, то вони не завжди адекватно відбивають закономірності зношування, чого не спостерігається з характеристиками контактної міцності. Тому під міцнісним підґрунтям механізму абразивного зношування слід розуміти опір виникненню бокових підповерхневих тріщин.

На підставі результатів проведеного дослідження комбінована обробка, що складається в сполученні методів легування хромом в кількості 1 - 5 % з ВТМО може бути рекомендована для практичного застосування як ефективний засіб підвищення міцності сталей, в той час як для підвищення зносостійкості в умовах тертя по моноліту її застосування є недоцільним.

## Висновки

1. Легування сталей 1 - 5 % хрому не впливає на їх зносостійкість після ВТМО тому, що зменшення розміру зерен аустеніту не змінює опір руйнуванню сталей.
2. Вказана комбінована обробка істотно підвищує опір пластичному деформуванню сталей. Найбільше зміцнення спостерігається у сталях з троститною структурою. Отже, фактор зменшення розміру зерен аустеніту сприяє суттєвому підвищенню міцності сталей. Зміцнення сталі в даному структурному стані сягає максимального значення після легування 1 - 2 % хрому. При подальшому збільшенні вмісту хрому до 5% зміцнюючий ефект залишається незмінним.
3. Фізико - механічні уявлення щодо механізмів об'ємного руйнування сталей не можуть бути застосовані для аналізу сутності руйнування в умовах абразивного зношування. Для цього необхідно залучати механіку контактної руйнування.
4. Легування сталей 1 - 5 % хрому не впливає на їх реологічний параметр тому, що зменшення розміру зерен аустеніту не змінює опір виникненню бокових тріщин.
5. Під міцнісним підґрунтям механізму абразивного зношування слід розуміти опір виникненню бокових підповерхневих горизонтальних тріщин.
6. Комбінована обробка, що складається в сполученні методів легування 1 - 5 % хрому та ВТМО може бути рекомендована для практичного застосування як ефективний засіб підвищення міцності сталей, але як засіб підвищення зносостійкості в умовах тертя ковзання по моноліту її застосовувати не рекомендується.

---

**Література**

1. Хрущов М.М. Исследование изнашивания металлов / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: АН СССР, 1960. – 352 с. – 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 працездатністю механічних трибосистем: Автореф. дисертації доктора техн. наук. – К.: НАУ, 2007. – 40 с.
4. Сорокин Г.М. Новые критерии повышения долговечности машин / Г.М. Сорокин // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 19 - 23.
5. Дворук В.І. Вплив високотемпературної термомеханічної обробки (ВТМО) на абразивну зносостійкість легованої сталі / В.І. Дворук, С.С. Белих // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 1(60). – С. 97 - 103.
6. Dvoruk V.I. Effect of doping chromium structural steel at its abrasive wear resistance after heat treatment / V.I. Dvoruk, K.V. Borak, S.S. Dobransky // Problems of Tribology. – 2014. - № 2. – P. 21 - 27.
7. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.
8. Дворук В.І. Фізична природа абразивної зносостійкості технічно чистих металів / В.І. Дворук, М.В. Кіндрачук // Проблеми трибології. – 2011. – № 2. – С. 79 - 85.
9. Дворук В.І. Абразивна зносостійкість легованих сталей / В.І. Дворук, С.С. Белих // Проблеми трибології. – 2012. – № 1. – С. 14 - 19.
10. Дворук В.І. Вплив низькотемпературної термомеханічної обробки (НТМО) на абразивну зносостійкість легованої сталі // В.І. Дворук // Проблеми трибології. – 2013. – № 4. – С. 40 - 50.
11. Дворук В.І. Вплив вихідного структурного стану на абразивну зносостійкість легованої сталі при обробці холодним деформуванням / В.І. Дворук, С.С. Белих, С.С. Горда // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 59. – С. 23 - 29.
12. Дворук В.І. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі / В.І. Дворук, О.В. Герасимова // Проблеми тертя та зношування. – К.: НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 82 - 94.
13. Колесников Ю. В. Механика контактного разрушения / Ю. В. Колесников, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1989. – 224 с. – Библиогр.: С. 183 – 219.

Поступила в редакцію 18.09.2014

**Dvoruk V.I. Influence of doping chromium structural steel abrasive wear resistance in her after high thermomechanical processing (HTMP).**

Effect was found no effect of doping on 1 - 5 % chromium steel abrasive wear resistance medium carbon steel after HTMP a simultaneous significant increase of boundary strength. Showing impossibility of ideas on mechanisms for the destruction of the bulk analysis of the nature of the abrasive damage. It is proved that under strength basis abrasive wear mechanism should understand the emergence of resistance to lateral subsurface cracks.

**Keywords:** monolith, doping chromium, strength, abrasive wear, rheological parameters, austenite grain.

**References**

1. Hrushhov M.M. Issledovanie iznashivaniya metallov / M.M. Hrushhov, M.A Babichev. – M.: AN SSSR, 1960. – 352 s. – Bibliogr.: - S. 337 – 342.
2. Sorokin G.M. Tribologija stalej i splavov / G.M. Sorokin. – M.: Nedra, 2000. – 316 s. – Bibliogr.: S. 237 – 245.
3. Dvoruk V.I. Reologo – kinetichna koncepcija abrazivnoi znosostijkosti ta її realizacija v keruvanni pracezdatnistju mehanichnih tribosistem: Avtoref. disertacii doktora tehn. nauk / - K.: NAU, 2007. – 40 s.
4. Sorokin G.M. Novye kriterii povshenija dolglvechnosti mashin / G.M. Sorokin // Vestnik mashinostroeniya. – 2008. - № 5. – S. 19 – 23.
5. Dvoruk V.I. Vpliv visokotemperaturnoi termomehanichnoi obrobki (VTMO) na abrazivnu znosostijkist' legovanoi stali / V.I. Dvoruk, S.S. Belih // Problemi tertja ta znoshuvannja. – 2013. - № 1(60). – S. 97 – 103.
6. Dvoruk V.I. Effect of doping chromium structural steel at its abrasive wear resistance after heat treatment / V.I. Dvoruk, K.V. Borak, S.S. Dobransky // Problems of Tribology. – 2014. - № 2. – R. 21 – 27.
7. Guljaev A.P. Metallovedenie: Uchebnik. – M.: Metallurgija, 1978. – 647 s.
8. Dvoruk V.I. Fizichna priroda abrazivnoi znosostijkosti tehnicno chistih metaliv / V.I. Dvoruk, M.V. Kindrachuk // Problemi tribologii. – 2011. - № 2. – S. 79 – 85.
9. Dvoruk V.I. Abrazivna znosostijkist' legovanih stalej / V.I. Dvoruk, S.S. Belih // Problemi tribologii. – 2012. - № 1. – S. 14 – 19.
10. Dvoruk V.I. Vpliv niz'kotemperaturnoi termomehanichnoi obrobki (NTMO) na abrazivnu znosostijkist' legovanoi stali // V.I. Dvoruk // Problemi tribologii. – 2013. - № 4. – S. 40 – 50.
11. Dvoruk V.I. Vpliv vihidnogo struktornogo stanu na abrazivnu znosostijkist' legovanoi stali pri obrobci holodnim deformuvannjam / V.I. Dvoruk, S.S. Belih, S.C. Gorda // Problemi tertja ta znoshuvannja. – 2013. - № 59. – S. 23 – 29.
12. Dvoruk V.I. Vpliv struktornogo stanu na abrazivne rujnuvannja stali / V.I. Dvoruk, O.V. Gerasimova // Problemi tertja ta znoshuvannja. – K.: NAU, 2007. – Vip. 47. – S. 82 – 94.
13. Kolesnikov Ju. V. Mehanika kontaktnogo razrushenija / Ju. V. Kolesnikov, E.M. Morozov. – M.: Nauka, 1989. – 224 s. – Bibliogr.: - S. 183 – 219.