

**Дворук В.І.,
Бєлих С.С.**

Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна

АБРАЗИВНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА СТРУКТУРА ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Завдання дослідження

Абразивне зношування – це руйнування поверхні деталі в результаті її взаємодії з твердими частинками за наявності відносної швидкості. До числа таких частинок відносять жорстко закріплені абразив – великі шматки гірської породи або абразивні круги, у яких абразивні частинки міцно зв'язані одне з одним за допомогою зв'язки (моноліт). Зношуванню об моноліт піддаються деталі сільськогосподарських, дорожньо-будівельних, гірничих, бурових машин тощо. Значна частина цих деталей виготовляється з легованих сталей. Інтенсивність вказаного виду абразивного зношування більш ніж на порядок перевищує інтенсивність інших видів зношування, що не пов'язані з дією абразиву і залежить вона від багатьох факторів: фізико-механічних властивостей сталі та абразиву, режиму навантаження, геометричних характеристик абразиву, агресивності робочого середовища тощо. Вплив зазначених факторів на зносостійкість сталей реалізується, головним чином, через їх структуру. Тому науково обгрунтоване розв'язання проблеми абразивної зносостійкості шляхом керування структурою сталей є актуальним завданням трибології, впоратись з яким можна лише створивши відповідне теоретичне підґрунтя.

У переважній більшості теорій абразивної зносостійкості, що були запропоновані [1 - 6 тощо] визнається провідна роль міцносного фактора у природі та механізмі абразивного зношування. Однак щодо концепції міцності, яку слід застосовувати для інтерпретації впливу цього фактора в умовах абразивного зношування спільної думки немає. Частіше за інші застосовували [1 - 5] загальноприйнятту статичну концепцію міцності [7], відповідно до якої руйнування матеріалу розглядається як критична подія, що настає при досягненні діючою напругою границі міцності. Отже, границя міцності вважається фізичною константою матеріалу. Однак це не відповідає дійсності, оскільки границя міцності залежить від дуже багатьох факторів, а універсальні закони, що описують роботу матеріалів за будь яких умов відсутні і тому зазначений показник є умовною величиною [8]. Інший істотний недолік статичного підходу – це урахування впливу фактора часу на міцність лише через побічні процеси (наприклад, абсорбцію вологи з повітря, деформаційні та релаксаційні процеси тощо), в той час, як пряма дія цього фактора у механізмі руйнування залишається неврахованою.

Недоліків, що вказані вище позбавлена кінетична концепція міцності [7], відповідно до якої руйнування розглядається як термофлуктуаційний процес, який неможна характеризувати границею міцності. Спробу застосувати кінетичний підхід до абразивного руйнування здійснено у роботі [9]. Фактичним підґрунтям для цього були експериментальні данні з вивчення впливу великих питомих навантажень на абразивний знос сталей різних структурних класів в умовах тертя ковзання. Виявилось, що вказана залежність має нелінійний характер і складається з трьох ділянок. Перша і третя ділянки відбивають лінійну залежність між зносом та питомим навантаженням, а друга – характеризується сталістю зносу у деякому інтервалі питомих навантажень. Для пояснення навантажувальної залежності зносу запропоновано фізичну модель, яка, на відміну від класичної кінетичної теорії міцності [7], враховує наявність електронної системи в сталях та її вплив на абразивне руйнування останніх. Хоча міркування щодо цього впливу носять абстрактний характер оскільки в роботі [9] відсутні результати експериментальних досліджень, з яких вони випливають. Відповідно до вказаної моделі, механізм реалізації кінетичної концепції руйнування при абразивному зношуванні залежить від температури у зоні контакту: для області високих температур (поблизу і вище температури Дебая) характерним є термофлуктуаційний механізм розриву між-атомних зв'язків, а за температур нижче температури Дебая можливий перехід від термофлуктуаційного до фонових механізму. Однак, всупереч зазначеному підходу, як фундаментальний, авторами [6] висунуто закон відповідності між показниками статичної міцності та зносостійкістю сталей різних структурних класів, який з ряду причин не відповідає кінетичній концепції руйнування. По-перше, будь який кінетичний процес (термофлуктуаційний, фононний тощо), як це зазначалося вище, неможна характеризувати границею міцності. По-друге, вказаний закон передбачає існування класичного зв'язку між процесами деформування та руйнування, що притаманний статичній концепції міцності, тоді як кінетична концепція міцності ставить це питання по новому [7]. Отже, спробу [9] залучити кінетичний підхід до абразивного руйнування слід визнати непослідовною та суперечливою.

Аналізу абразивного руйнування металевих матеріалів з позицій енергетичної теорії міцності присвячено роботу [10]. Такий підхід дозволив врахувати вплив енергетичного стану поверхні, що зумовлений внеском поверхневої енергії, теплових флуктуацій та внутрішньої енергії на процес абразивного руйнування металів. Як критерій абразивної зносостійкості розглядається показник HV/γ , де HV – твердість за Віккерсом, γ – питома поверхнева енергія. На думку авторів [10], аналіз залежності від цього показника вказує на прояв силового та енергетичного чинника руйнування у механізмі абразивного

зношування. Реалізація вказаних чинників відбувається за умов, що були визначені Ірвіном [11]. Однак, за таких умов передбачено використання ефективної поверхневої енергії γ_{ef} , тоді як у роботі [10] мова весь час ведеться про питому поверхневу енергію γ , яка на один-два порядки менше ніж γ_{ef} . Оскільки зовнішньо-силова дія абразивної частинки на поверхню тертя при ковзанні складається з її занурення у метал на певну глибину і тангенціального переміщення поверхнею, то у запропонованому критерії твердість відображає опір зануренню, а поверхнева енергія – опір тангенціальному переміщенню абразиву. Отже, зв'язок зносостійкості з характеристиками міцності, при цьому, здійснюється через твердість. Тому підхід, що розглядається за своєю суттю – це подальший розвиток застосування статичної концепції міцності до абразивного зношування за рахунок залучення у неї окремих елементів кінетичного та енергетичного підходу.

Враховуючи відсутність загально визначеної точки зору на підгрунтя природи та механізму абразивного зношування, запропоновано [12, 13] нову концепцію зносостійкості, яка виходить з реолого-кінетичних уявлень у фундаментальному питанні про зв'язок між процесами руйнування та деформування при абразивному зношуванні. Вказана концепція – результат суперпозиції і застосування у діалектичній єдності реологічної та кінетичної концепцій міцності до описання абразивного руйнування.

Реологічна концепція розглядає руйнування не як статичну критичну подію, а як кінетичний процес, що розвивається у часі. З погляду кінетичної концепції явище руйнування – це процес нагромадження у часі активів термофрикційних розривів міжатомних зв'язків. Отже, між цими підходами існує тісна ієрархія на рівні понять, що дає підстави для їх суперпозиції. Згідно запропонованої [8] фізичної моделі, абразивне руйнування – це послідовність активів відокремлення частинки зносу, які утворюються у результаті розвинення первинних бокових горизонтальних тріщин до їх перетину з робочою поверхнею, вторинними боковими тріщинами, вертикальними клиноподібними тріщинами тощо. За таких уявлень як критерій зносостійкості розглядається реологічний параметр:

$$R = \frac{K_{IC}}{\sqrt{h_{II}}},$$

де K_{IC} – в'язкість руйнування металу;

h_{II} – розмір пластичної зони у вершині тріщини. Ця величина є показником чинника взаємозв'язку між процесами руйнування та деформування, який за своєю фізичною суттю характеризує опір утворенню бокових тріщин на межах пластичних зон у вершинах вертикальних клиноподібних тріщин. В'язкість руйнування K_{IC} у зазначеному критерії одночасно є реологічною та енергетичною характеристикою [14], яка інтегрально враховує міцнісні та пластичні властивості металу. Останній факт заслуговує на особливу увагу, оскільки між абразивною зносостійкістю та сполученням міцнісно-пластичних характеристик сталей різних структурних класів встановлено функціональний зв'язок [15]. Однак на відміну від стандартних характеристик міцності та пластичності, які є умовними показниками і враховують усереднені властивості металу при зношуванні, показник K_{IC} оцінює локальні властивості поблизу вершини тріщини і "прив'язаний" до плоско деформованого стану у вказаній зоні. З огляду на це, в'язкість руйнування – фундаментальна характеристика опору металу руйнуванню. Щодо розміру пластичної зони h_{II} у реологічному параметрі R , то, з одного боку ця величина характеризує ступінь локалізації деформації в поверхневому шарі, а з іншого – механічний стан (зміцнення, відпуск, запас пластичності, залишкова напруженість тощо) цього шару. Відповідно до поправки Ірвіна [11], величина h_{II} , а також інтенсивність пластичної деформації всередині зони залежить від в'язкості руйнування K_{IC} і опору металу пластичній деформації σ_T .

При дослідженні абразивної зносостійкості сталі 40X з різною структурою відпуску залежно від реологічного параметру виявлено [16] певну тенденцію, а саме: з підвищенням реологічного параметра зносостійкість сталі зростає. Вивчення впливу іншого структурного фактора – обробки холодним деформуванням на абразивну зносостійкість цієї самої сталі підтвердило [17] зв'язок останньої з реологічним параметром. Ці факти дають підставу для припущення, що абразивна зносостійкість контролюється не стандартними характеристиками міцності, а реологічним параметром R . У зв'язку з цим для оцінки універсальності такої закономірності науковий і практичний інтерес представляє перевірка її правомірності для легованих сталей інших структурних класів. Розв'язанню цієї задачі присвячено дану роботу.

Експериментальна та аналітична частина

Вивчали механічні, реологічні та триботехнічні властивості типових представників легованих сталей різних структурних класів: перлітного – сталь 40X, мартенситного – сталь 95X18, мартенситно-

старіючого – Н18К9М5Т, аустенітного – 110Г13Л, карбідного – Р18. При виборі сталей для проведення досліджень враховувалась необхідність порівняльної оцінки отриманих результатів з відомими закономірностями. Тому зупинилися на тих марках сталей, які в достатній мірі вивчені у інших наукових працях [6, 9, 10, 15 - 18]. З метою розширити діапазон зміни досліджуваних властивостей, зазначені сталі піддавали термічній обробці, яка складалась із гартування за оптимальної для кожної сталі температури та відпуску за температури 493 К, 693 К, 893 К. Це дозволило аналізувати вплив структурного стану після відпуску сталей на їх властивості.

Триботехнічні випробування сталей проводили за методами і методиками, які використовувались у роботі [16]. В таблиці приведені механічні, триботехнічні та реологічні властивості сталей.

Таблиця

Механічні, реологічні та триботехнічні властивості сталей

Марка сталі	Структурний клас	Режим термічної обробки, К		HRC _e	σ _s , МПа	K _{IC} , МПа√М	h _П , м	R·10 ⁴ , МПа	ε·10 ² , кг ⁻¹
		гартування	відпуск						
95Х18	Мартенситний	1293-1343, мастило	493	62	1800	10	9,33·10 ⁻⁹	10,4	16,45
			693	58	1300	12	5,5·10 ⁻⁸	5,1	8
			893	40	800	15	1,4·10 ⁻⁷	4	6,28
40Х	Перлітний	1123-1153, мастило	493	49	1850	9,6	8,29·10 ⁻⁸	3,44	5,4
			693	39	1420	12	1,56·10 ⁻⁷	3,03	4,76
			893	24	850	14	2,84·10 ⁻⁷	2,66	4,16
110Г13Л	Аустенітний	1293-1343, вода	493	18	616	17,2	2,14·10 ⁻⁷	3,72	5,82
			693	17	415	20,7	3,59·10 ⁻⁷	3,45	5,43
			893	16	360	25	5,4·10 ⁻⁷	3,33	5,23
Н18К9М5Т	Мартенситно-старіючий	1113-1133, мастило	493	33	1070	12,9	2,34·10 ⁻⁷	2,66	4,17
			693	49	1400	11,8	1,79·10 ⁻⁷	2,78	4,37
			893	47	1500	14,8	2,92·10 ⁻⁷	2,74	4,3
Р18	Карбідний	1563-1583, мастило	493	59	1150	12,7	3,25·10 ⁻⁸	7,08	10,6
			693	62	1320	11,8	1,6·10 ⁻⁸	9,4	14,5
			893	65	1600	10,8	6,1·10 ⁻⁹	13,8	21,7

Об'єктами дослідження були залежності зносостійкості ε сталей при абразивному зношуванні від їх реологічних характеристик: в'язкості руйнування K_{IC}, розміру пластичної зони у вершинах трищин h_П, реологічного параметру R.

Результати дослідження дозволили систематизувати дані про зв'язок реологічних властивостей зі зносостійкістю сталей (рис. 1).

У кожному класі сталей спостерігаються індивідуальні особливості зміни реологічних показників після відпуску. Так, для сталей мартенситного класу з підвищенням температури відпуску K_{IC} і h_П зростають, а R зменшується (рис. 1, а).

Для сталей перлітного класу характер зміни реологічних показників такий самий як для сталей мартенситного класу, але зростання K_{IC}, h_П і падіння R відбувається з помітно меншою інтенсивністю (рис. 1, б).

Подальше зменшення інтенсивності змін K_{IC}, h_П і R при збереженні характеру їх змін спостерігається в аустенітних сталях (рис. 1, в).

Дещо інший характер зміни реологічних властивостей зафіксовано у сталях мартенситно-старіючого класу. По мірі підвищення температури відпуску до 693 К K_{IC} і h_П у них зменшується, а R – дещо зростає. Подальше підвищення температури відпуску призводить до зростання K_{IC} і h_П, у той час, як R проявляє тенденцію до зниження (рис. 1, г).

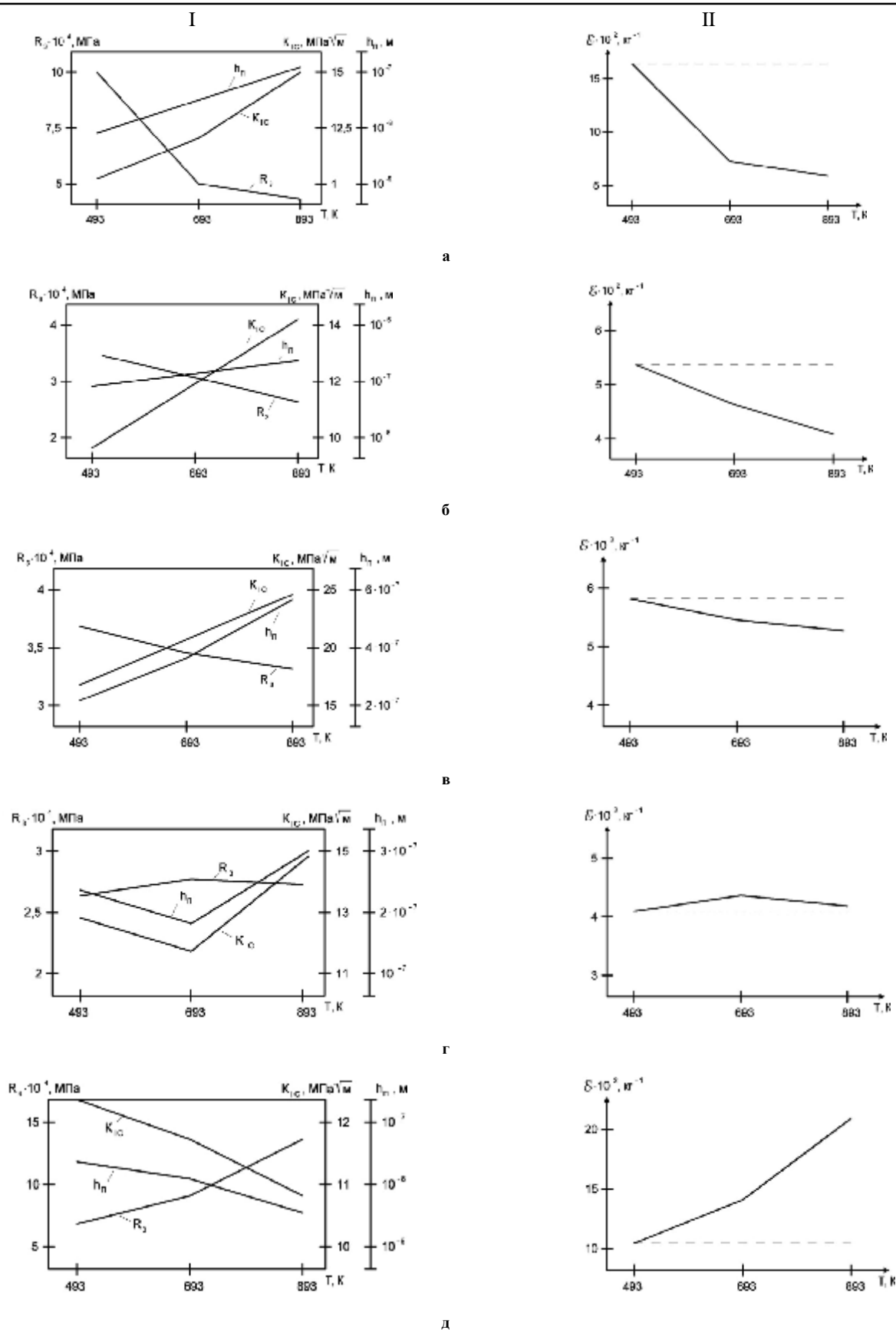


Рис. 1 – Залежність реологічних властивостей (I) та зносостійкості (II) від температури відпуску для сталей: а – 95X18; б – 40X; в – 110Г13Л; г – Н18К9М5Т; д – P18

У сталях карбідного класу по мірі підвищення температури відпуску реологічні показники K_{IC} і h_{II} зменшуюся, а R – зростає (рис. 1, д).

Співставлення залежностей реологічних показників та зносостійкості від температури відпуску (рис. 1) показує їх повну відповідність для сталей усіх класів. Причому між реологічним параметром R та зносостійкістю є спостерігається пряма кореляція, а між в'язкістю руйнування K_{IC} , розміром пластичної зони h_{II} та зносостійкістю ϵ – зворотна. Раніше [16] подібний результат отримано для ферито-перлітної сталі 40X, де він став підґрунтям для такого висновку: величина реологічного параметру R визначається співвідношенням інтенсивності зміни показників K_{IC} і h_{II} за даної температури відпуску. Якщо результати, що отримані в даній роботі проаналізувати з цієї точки зору, то можна констатувати, що вона поширюється на сталі решти структурних класів.

Таким чином, вперше встановлено закон відповідності між зміною реологічного параметру та абразивної зносостійкості, залежно від температури відпуску сталей.

Для кожного класу сталі, незалежно від характеру зміни взаємозв'язку показників в'язкості руйнування та розміру пластичної зони, визначальним для абразивної зносостійкості є реологічний параметр. Між зміною реологічного параметру та зносостійкістю сталей у всьому інтервалі температур відпуску простежується повна відповідність вказаних залежностей.

Реологічний параметр у кожному структурному класі сталі визначає рівень і тенденцію зміни її зносостійкості при відпуску.

Величина реологічних властивостей, а отже зносостійкості, зумовлена, головним чином, хімічним складом сталі.

Відомості про числові значення реологічних властивостей, що забезпечують максимальну зносостійкість у кожному структурному класі сталі можна отримати з таблиці.

Найвищу зносостійкість показала карбідна сталь Р18. Досягнуто це за рахунок найбільшої величини реологічного параметру.

Мартенситно-старіюча сталь Н18К9М5Т володіє низьким реологічним параметром, тому не високою є її зносостійкість. Таке саме можна сказати про аустенітну сталь І10Г13Л, зносостійкість якої майже не відрізняється від зносостійкості сталі Н18К9М5Т. Найбільше зменшення реологічного параметру після відпуску за температури 893 К по відношенню до його величини після відпуску за температури 493 К спостерігається у мартенситної сталі 95Х18 (зменшення у 2,6 рази), що супроводжується відповідним зниженням її зносостійкості.

При переході від сталі мартенситного класу до сталей інших структурних класів – перлітного, аустенітного та мартенситно-старіючого вказаний ефект спочатку поступово зменшується до практично нульового рівня у мартенситно-старіючої сталі, після чого, при переході до карбідної сталі відбувається його інверсія – величина реологічного параметру після відпуску за температури 893 К зростає по відношенню до його значення після відпуску за температури 493 К. Ці результати дозволили розкрити загальну картину зміни зносостійкості та реологічного параметру сталей різних структурних класів, показати тенденцію зміни їх триботехнічних та реологічних властивостей за різних температур відпуску, співставити переваги та недоліки сталей кожного класу з урахуванням їхньої максимальної зносостійкості та реологічного параметру.

Виявлений закон відповідності зносостійкості та реологічного параметра може бути корисним у орієнтуванні металознавців та металологіків на створення нових зносостійких металевих матеріалів.

Висновки

У результаті цієї роботи встановлено таке:

1. Леговані сталі різних структурних класів підлягають такому закону відповідності: з підвищенням реологічного параметру зносостійкість сталі зростає. Отже, для інтерпретації міцнісного фактора у природі та механізмі абразивної зносостійкості слід застосовувати реолого-кінетичний підхід.

2. Тенденція зміни реологічних показників при відпуску залежить від структурного класу сталі. З підвищенням температури відпуску вона може мати зростаючий, немонотонний або спадаючий характер.

3. Величина реологічного параметру та зносостійкості сталей різних структурних класів визначається співвідношенням інтенсивності зміни в'язкості руйнування і розміру пластичної зони за даної температури відпуску.

Література

1. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание / М.: Наука, 1970. – 251с. – Библиогр.: С. 242-247.
2. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. / М.: Наука, 1970. – 247 с. – Библиогр.: С. 237-245.
3. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.: Машиностроение, 1976. – 270 с. – Библиогр.: С. 263-268.
4. Брыков Н.Н. К вопросу о закономерностях сопротивляемости сталей и сплавов абразивному изнашиванию // Проблемы трибології. – 1997. – № 4. – С. 13-20.
5. Брыков М.Н. Основы теории износостойкости железоуглеродистых сплавов при абразивном изнашивании // Проблемы трибології. – 2007. – № 2 – С. 46-56.
6. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников: – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.: ил., табл. – Библиогр.: С. 217-219.
7. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский: – М.: Наука, 1974. – 560 с.: ил., табл. – Библиогр.: С. 536-560.
8. Латипенко В.А. Диагностика жест кости и прочности материалов / Рига: Зинатне, 1968. – 320 с.: – Библиогр.: С. 274-299.
9. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание бурильного інструмента / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, В.А. Доценко: – М.: Надра, 1980. – 206 с.: ил., табл. – Библиогр.: С. 198-203.
10. Медеяев И.А., Албагачиев А.Ю., Сорокин Г.М. Физическая природа разрушения материалов при абразивном изнашивании // Трение и износ. – Т. 25, № 2. – С. 148-154.
11. Ирвин Д., Парис П. Основы теории роста трещин и разрушение // Разрушение. Инженерные основы и воздействие внешней среды. – М.: Мир, 1976. – Т. 3 – С. 17-66.
12. Дворук В.И. Научные основы повышение абразивной износостойкости деталей машин / К.: КМУГА, 1997. – 101 с. – Библиогр.: С. 95-99.
13. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем: Автореф. дис. доктора техн. наук / НАУ. – К., 2007. – 40 с.
14. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения / М.: Metallurgiya, 1974. – 64 с. – Библиогр.: С. 92-93.
15. Сорокин Г.М., Малышев В.Н. Аспекты металловедения в природе механического изнашивания // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 6. – С. 598-607.
16. Дворук В.І., Герасимова О.В. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі // Проблеми тертя та зношування: Зб. наук. праць. – К., 2007. – № 47. – С. 82-94.
17. Дворук В.І., Кіндрачук М.В. Абразивна зносостійкість холоднодеформованої сталі // Проблемитрибології. – 2011. – № 3. – С. 24-28.
18. Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю., Медеяев И.А. Некоторые аспекты выбора и создание износостойких металлических материалов для условий абразивного изнашивания // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 5. – С. 773-781.

Надійшла 30.11.2011