

УДК 667.637.22:620.178.16:001.8

МЕХАНОХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ ДАТАЛЕЙ І РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

М. Денисенко, канд. техн. наук,

А. Опальчук, д-р техн. наук,

**Національний університет біоресурсів і природокористування
України**

У статті наведено результати дослідження поверхонь тертя робочих органів сільськогосподарських машин та складу вторинних структур з регулюючим рівнем ентропії. Показано роль кисню у формуванні властивостей поверхневих шарів в умовах абразивного зношування.

Ключові слова: *робочі органи, поверхня тертя, абразивне зношування, вторинна структура, леміш плуга, зносостійкі покриття, окиснений стан поверхневого шару, ентропія.*

Суть проблеми. Основи сучасних уявлень про тертя були закладені такими видатними вченими, як І. Крагельський [1-3], Ф.Боуден і Д.Тейбор [4], котрі значно розширили уявлення про тертя, сформулювавши молекулярно-механічну і адгезійно-деформаційну теорії тертя. Б. Костецьким і Л. Бершадським [5,6,7,8] висунута теорія структурно-енергетичного пристосування під час тертя. Ця теорія припускає, що система сама адаптується до умов тертя шляхом формування вторинних структур з продуктів переносу матеріалів двох поверхонь, з властивостями, що забезпечують мінімум енергетичних витрат на тертя в заданих умовах.

Для багатьох видів контактної взаємодії за зовнішнього тертя абразивні процеси є основними, тому що середовище зони тертя неминуче містить абразивні частки. Процеси абразивного руйнування найбільш характерні для деталей і робочих органів сільськогосподарських машин. За М.Хрущовим і М. Бабичевим, руйнування відбувається шляхом видалення матеріалу зі спрацьованої поверхні у вигляді тонкої стружки або фрагментів попередньо зруйнованого матеріалу, вичавленого в сторони пластично деформованої подряпини, або у вигляді дисперсних часток, що крихко відокремлюються внаслідок однократного і багатократного впливу. [9,10]. Абразивні частинки можуть бути мінерального походження, продуктами окислювання металу, а також наклепаними металевими частинками зношування або твердими структурними складовими одного зі спряжених матеріалів.

За Б. Костецьким [11], руйнування поверхневого шару абразивними частинками здійснюється за умови, коли швидкість руйнування вторинних структур, утворених під час тертя, перевищує швидкість їх утворення.

Аналіз останніх досліджень. Тертя і зношування конструкційних матеріалів в абразивному середовищі – складний багатофакторний вид навантаження, в результаті якого в поверхневих шарах матеріалів відбуваються зміни, безпосередньо поєднані з утворенням сильно деформованого, фрагментованого шару і переходом від нормального механізму зношування до катастрофічного. Абразивне зношування можливо охарактеризувати як різке і безповоротне зростання масштабу руйнування в поверхневих шарах деталі, що зіставлений з розмірами самої деталі.

В процесі роботи по поверхні тертя безперервним потоком переміщуються абразивні частинки ґрунту, деформуючи та збільшуючи вільну енергію мікроб'ємів металу зони контакту. Активованій метал поверхневих шарів миттєво взаємодіє з хімічно активними елементами середовища. На поверхнях тертя робочих органів спонтанно формуються плівки вторинних структур (ВС)- тверді розчини кисню в металі.

В результаті взаємодії поверхневих шарів металу з активними складовими абразивного середовища – пасиваторами (киснем, сіркою, хлором, фосфором та іншими) утворюються нові однофазні або гетерофазні тонкоплівкові структури, що отримали назву вторинних структур [12]. Процеси формування вторинних структур на поверхнях тертя обумовлені зовнішнім механічним впливом, природою матеріалів тертя та складом робочого середовища. У працях Б. Костецького [12,13] показана роль кисню у формуванні властивостей поверхневих шарів при їх деформації тертям та побудована фізична модель окислювального зношування. Одночасне утворення мікропластичної деформації і дифузії кисню у пластично деформовані об'єми металу призводить до утворення особливого виду вторинних структур з локалізацією руйнування в поверхневих шарах матеріалів.

Фізико-хімічна взаємодія металу з киснем повітря або з агресивними компонентами мастила різко активізується під впливом силових факторів тертя. При цьому мастильне середовище не лише затримує надходження кисню в зону тертя, але й змінює склад і властивості поверхневих плівок [13].

Метою досліджень є вивчення механохімічної форми абразивного руйнування зносостійких покриттів та вторинних структур в умовах абразиву робочих органів сільськогосподарських машин.

Результати досліджень. При абразивному руйнуванні поверхонь виділяємо дві ділянки з різним напружено-деформованим станом: ділянку пружнопластичної деформації і ділянку пружної деформації. За даними Б. Костецького [12], глибина першої ділянки не перевищує сотень ангстрем, тимчасом як ділянка пружної деформації може мати товщину кілька сотень мікрометрів. Вторинні структури, будучи об'єктом руйнування, також

виконують екранну функцію, захищаючи основний матеріал від руйнування. При цьому вони самі руйнуються, досягнувши граничної величини.

Швидкість зростання окисних плівок на метали дуже висока [14,15]. Достатньо часток секунди для утворення плівки товщиною 10 Å. При абразивному руйнуванні процес окислювання прискорюється від контактної температури, і в значній мірі – від деформації, котра характеризується підвищеною концентрацією дислокацій і вакансій, особливо в поверхневих шарах. При цьому межа розділу метал – окислювальна плівка є перешкодою для проходження і розрядки дислокацій. Ефективність цієї перешкоди залежить від параметрів решіток основного металу і окислу [16].

П. Назаренко і Ю. Короленко [17] встановили, що окислювальні плівки товщиною до 100 Å, вирощені на монокристалах цинку, не чинять помітного гальмуючого впливу на вихід дислокацій. Але з подальшим зростанням товщини плівки зростає її здатність блокувати вихід дислокацій і ускладнюється утворення смуг ковзання. Напевне, товщини плівок, які не перешкоджають проходженню дислокацій, відрізняються для різних металів. Окислювальна плівка, маючи значну твердість, міцність і теплостійкість [18], в багатьох випадках захищає основний метал від руйнування [16]. Ця особливість визначається поєднанням фізико-механічних властивостей як самої плівки, так і металу, на якому вона утворюється.

Вплив хімічного складу плівок на зносостійкість різна, що особливо підтверджується на прикладі заліза. Так, оксиди заліза Fe_3O_4 і FeO мають кращу адгезію до підкладки, меншу крихкість, твердість та забезпечують більшу зносостійкість, ніж окис заліза Fe_2O_3 , котра утворює крупнозернисту і крихку плівку, яка погано пристосовується до кристалічного рельєфу поверхні тертя і фактично є абразивом [15]. Робочі органи ґрунтообробних, садильних і посівних машин під час експлуатації на різноманітних ґрунтах зазнають абразивного механо-хімічного зношування. Процес руйнування в цих умовах характеризується незначною пластичною деформацією поверхневих шарів металу, хімічною взаємодією з агресивним середовищем (волога, гумус, кисень, вуглекислий газ та ін.), утворенням та руйнуванням плівок оксидів (вторинних структур), товщина яких становить 0,01-0,05 мкм [19].

Вторинні структури виконують захисні функції, обмежуючи розповсюдження взаємодії усередині деталей тертя та зменшуючи інтенсивність цієї взаємодії, тому їх утворення відповідає принципу ЛеШательє [12]. У відповідності з цим принципом вторинні структури необхідні для розсіювання енергії під час її переходу із зони тертя в деталі тертя, причому розсіювання енергії повинно відбуватися з найменшою швидкістю приросту ентропії.

У відповідності з термодинамікою нерівноважених процесів нові упорядковані структури можуть виникати в природі при виконанні чотирьох

необхідних умов, вперше сформульованих І. Пригожиным: 1) система є термодинамічно відкритою, тобто може обмінюватися з середовищем речовиною і енергією; 2) динамічні рівняння системи нелінійні; 3) відхилення від рівноваги перевищують критичні значення; 4) мікроскопічні процеси відбуваються узгоджено.

У відповідності з принципами мінімізації ефективного об'єму взаємодії, це повинно призвести до зменшення глибини активованого (деформованого) шару.

Результатом активування є пасивація (взаємодія з киснем) з утворенням вторинних структур. При цьому критерієм товщини вторинних структур може слугувати критична товщина, нижче якої виникають аномалії елементарного складу у порівнянні з «масивним» станом зразка. Метод електронної оптики - спектроскопії (ЕОС) використовували для вивчення розподілу хімічних елементів як на площині поверхні (хімічні карти поверхні), так і вглиб металу (глибинні профілі концентрацій елементів). Об'єктами дослідження були зразки, зміцнені твердим сплавом ПГ-С27 і виготовлені з композиційного матеріалу КХЖ-65 та сталі 65Г. Результати спектрального аналізу представлені на рис. 1; 2, 3, 4, 5. За приведеними даними треба відзначити підвищений вміст в поверхневих шарах кисню, хрому, заліза і, особливо, вуглецю. Вторинні структури I типу також, як і «шари Бейльбі», треба розглядати як перенасичені тверді розчини кисню в пластично деформованих поверхневих об'ємах металу. Ця точка зору у відповідності з сучасними уявленнями фізики кристалічних матеріалів є найбільш достовірною. Із зростанням питомої роботи тертя відбувається перехід від вторинних структур I типу до вторинних структур II типу. Типові концентраційні профілі елементів показано на рис. 1,2. Вони характеризують окиснений стан поверхневого шару матеріалів після тертя, ступінь якого змінюється з відстанню від поверхні вглиб металу. Аналізуючи ці профілі, важливо оцінити структурні відмінності сусідніх прошарків з різним ступенем окиснення. Внаслідок тривалих градієнтних деформацій у контактній зоні, щільність поверхневих прошарків може суттєво змінюватись у напрямку від поверхні до об'єму металу. Час у хвилинали вказує глибину поверхневого шару, з якого знімаємо спектр і елементний склад якого аналізуємо. Елементний аналіз здійснювали з поверхневого прошарку товщиною 2 нм. За своєю будовою наведені структури близькі до структури дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу.

Для кожного металу і сплаву існують певні критичні умови зовнішніх механічних впливів і середовища, при яких на поверхнях тертя утворюються вторинні структури II типу, хімічні з'єднання металу з активними елементами середовища (зокрема, з киснем).

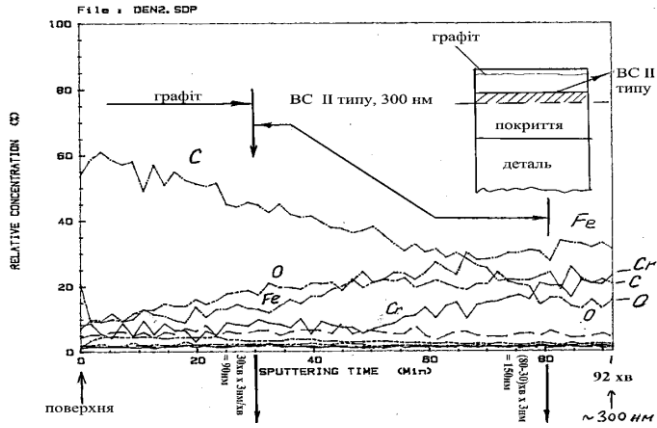


Рисунок 1 - Концентраційний профіль елементів у поверхневому шарі композиційного матеріалу КХЖ-65 товщиною 300 нм=0,3 мкм

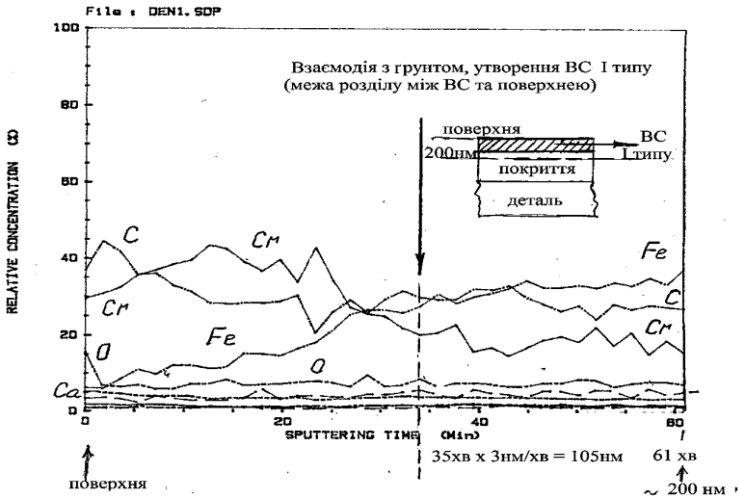


Рисунок 2 - Концентраційний профіль елементів у поверхневому шарі покриття товщиною 200 нм=0,2 мкм. Сталь - 65Г + твердий сплав ПГ –С27 (лапа культиватора, леміш плуга)

Fe – 12,3 ат.

Cr – 1,4

Zn – 3,9

Ca – 1,1

O – 28,6

C – 48,2

N – 2,7

S – 1,8

Fe – 15,6 ат.

Cr – 4,5

Zn – 1,6

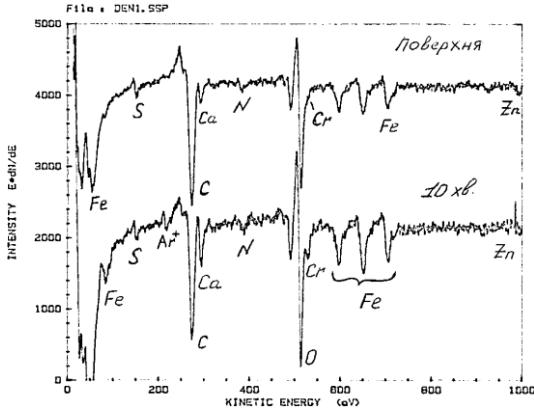
Ca – 2,4

O – 34,8

C – 38,1

N – 1,7

S – 1,3



%

%

Рисунок 3 - Оже-спектри поверхні тертя покриття ПГ-С27

Fe – 8,6 ат. %

ат. %

Co – 1,7

Ni – 1,1

Zn – 2,7

Ca – 0,6

O – 20,6

C – 62,9

N – 1,8

Fe – 8,8 ат. %

Cr – 2,0

Zn – 1,7

Ca – 1,7

O – 27,5

C – 56,2

N – 1,4

S – 0,7

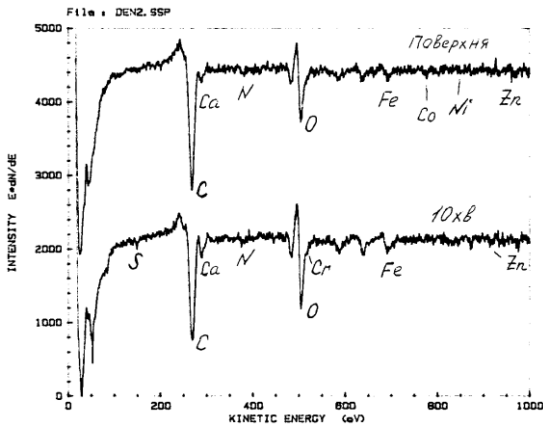


Рисунок 4 - Оже-спектри поверхні тертя покриття КХЖ-65

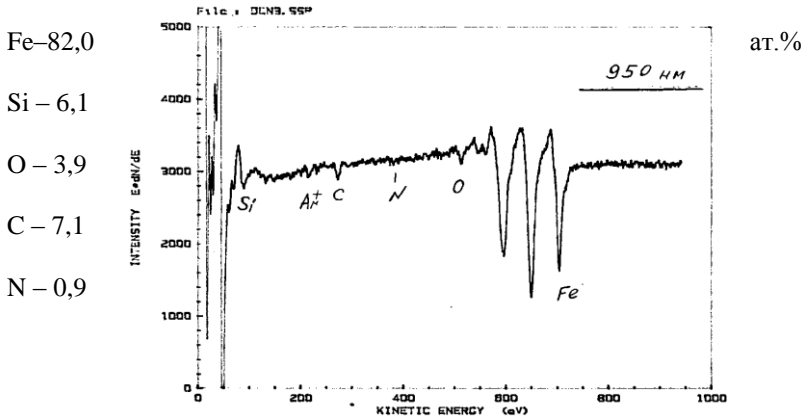


Рисунок 5 - Оже-спектри поверхні тертя сталі 65Г на глибині 950 нм

Гradient концентрацій за глибиною кисню і вуглецю спостерігаємо збагачений, в об'ємному стані цього елемента немає. Кисень накопичується з навколишнього середовища, де існує перехідна дільниця: покриття – вторинні структури – основа. Вимірювали інтенсивність характеристичних спектральних ліній і використовували коефіцієнти відносної чутливості електронів в оже- електронах. Аналіз рис. 5 свідчить, що в напрямку від поверхні до об'єму стрибком збільшується концентрація заліза, а концентрація кисню зменшується. В межах критичної товщини характерна також стабільна величина концентрації кисню. Внаслідок дискретності контакту, неоднорідності епюри навантаження в часі і за просторовими координатами, на різних ділянках поверхні тертя одночасно протікають різні фази локально циклічних процесів. Коли кисню багато (рис. 3, 4,) згідно зі структурно-енергетичною теорією утворюється вторинна структура II типу. В ній на поверхні тертя присутня сегрегація кремнію і азоту, меншою мірою кальцію та сірки. Зростання концентрації кремнію в поверхневому шарі товщиною 180 нм призводить до утворення оксидної плівки в поверхневому шарі товщиною близько 510 нм=0,51 мкм. Поряд з вказаними елементами виявлені компоненти домішок, концентрація яких значно менша і стабілізована. В межах критичної товщини характерна також стабільна величина концентрації кисню. Це ілюструється наведеними нижче даними елементного складу поверхні тертя. В поверхневому шарі покриття ПГ-С27 утворюється ВС I типу товщиною 105 нм (рис. 2). Поверхня тертя композиційного матеріалу КХЖ-65 (рис.4) вкрита плівкою графіту товщиною 90 нм, що утримується адгезійними силами на поверхні вторинними структурами ВС II типу товщиною 150 нм. Графіт слугує як тверде мастило, що полегшує умови тертя для залізної основи. В поверхневому шарі сталі 65Г

(рис.85) утворюється ВС II типу товщиною 570 нм, яка переходить у ВС I типу товщиною 330 нм.

Повна товщина антифрикційної структури конструкційних матеріалів наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 - Параметри антифрикційної структури конструкційних матеріалів

Товщина в (НМ) антифрикційної структури				
Захисні покриття	Адгезійний шар	ВС II типу	ВС I типу	Повна товщина антифрикційної структури
ПГ-С27	2	0	103	105
КХЖ-65	90	150	0	240
Сталь-65Г	60	510	330	900

Якщо обидві поверхні тертя вкриті плівками I типу, в зоні контакту утворюється граничний шар, що має малу товщину, і тому чинить ефективний опір зсуву та спрацюванню. На поверхнях тертя, вкритих плівками вторинних структур II типу, утворюється граничний мастильний шар з високим значенням роботи адгезії.

Концентраційний профіль елементів у поверхневому шарі композиційного матеріалу товщиною 300 нм = 0,3 мкм показано на рис. 1. На поверхні тертя утворюється плівка карбіду хрому. Вуглець за відношенням до кисню є елементом, що відновлює металеві зв'язки і перешкоджає процесам окислення металу та процесам утворення вторинних структур II типу. У зв'язку з цим ці вторинні структури можна віднести до вторинних структур I типу. Це усталений стаціонарний процес динамічної рівноваги руйнування і відновлення плівок (вторинних структур), екрануючих основний метал поверхні деталей від пошкодження. Для зразка (рис. 3) між концентраціями хрому та заліза (в ат. %) виконується залежність типу $C_{Cr} = 0,8 C_{Fe} - 4,8$ в діапазоні концентрацій заліза 6-58 ат. %. Для зразка (рис. 4) – відповідна залежність типу $C_{Cr} = 1,25 C_{Fe} - 4,5$ в діапазоні концентрацій заліза 4-46 ат. %. Гальмування пластичної деформації включеннями карбіду хрому ілюструється фотографіями фрагментів поверхні тертя. Пластична деформація матричного матеріалу локалізована поблизу включення і отримує максимальний розвиток на межі розділу «матриця-включення». Включення карбіду хрому гальмують розвиток пластичної деформації у напрямку дії сили тертя. Як показують результати визначення ступеня наклепу і вмісту

кисню в поверхневих шарах, гетерогенізація структури призводить до зниження деформації матричного матеріалу.

Висновки. 1. Установлено прямим кількісним аналізом елементного складу поверхонь тертя існування механо-хімічної форми, як основного виду зношування деталей і робочих органів сільськогосподарських машин.

2. Аналіз поверхонь пар тертя підтверджує постійну присутність у структурі кисню та сірки, причому на хімічний склад суттєво впливають контактне навантаження та швидкість тертя.

3. Результати досліджень створюють підґрунтя для нової методології оже-спектрального дослідження вторинних структур (ВС) поверхонь тертя.

Література

1. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ /И.В.Крагельский., М.Н.Добычин., В.С.Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977.– 525 с.
2. Крагельский И.В. Трение и износ в машинах/И.В. Крагельский. –М.: Машиностроение, 1971.–384 с.
3. Крагельский И.В. О расчете трущихся сопряжений на износ при микрорезании, пластическом и упругом контактах. – В сб.: Трение твердых тел. М.: Наука, 1964. – С. 100-110.
4. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 С.
5. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. – 1985. – Т.6. – №2. – С. 201-212.
6. Бершадский Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем.– К.: Общество «Знание» УССР, 1984.–20 с.
7. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем / Л.И.Бершадский. – Киев: Знание, 1990. – 253 с.
8. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И.Костецкий. – К.: Техника, 1970. – 395 с.
9. Хрущов М.М. Закономерности абразивного изнашивания /М.М.Хрущов// Износостойкость. – М.: Наука, 1975.
10. Хрущов М.М. Исследование изнашивания металлов /М.М.Хрущов, М.А.Бабичев. – М.: Наука, 1960. –351 С.
11. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении /Б.И.Костецкий, И.Г.Носовский, А.К.Караулов., Л.И.Бершадский., Н.Б.Костецкая., В.А.Ляшко., М.Ф.Сагач.– К.: Техника, 1976. – 296 с.
12. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий.– К.: Техника, 1970. – 395 С.
13. Костецкий Б.И. Нормальное трение и явления повреждаемости в машинах /Б.И.Костецкий., Л.И.Бершадский. – М: Машиноведение, 1970, №1.

14. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на долговечность и надежность деталей машин /Ю.А.Розенберг. – М.: Машиностроение. – 1970.
15. Андреева В.В. Измерение толщин тонких пленок на металлах оптическим поляризационным методом /В.В.Андреева// Новые методы физико-химических исследований. – №2. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 79 С.
16. Крамер И. Влияние среды на механические свойства металлов / И.Крамер., Л.Демер. – М.: Металлургия, 1968.
17. Назаренко П.В. Влияние окисных пленок на изменение дислокационной структуры и силы внешнего трения /П.В.Назаренко., Ю.И.Короленко.– ФХММ, 1970. – №2. – 75 С.
18. Зазимко О.В. Закономерности механохимических процессов при абразивном изнашивании сталей / О.В.Зазимко: автореф. дис. ... канд.техн.наук. –К, 1988. – 20 С.
19. Гречкосей В.Д. Изнашивание и повреждаемость деталей почвообрабатывающих, посевных и посадочных машин /В.Д.Гречкосей., М.Ф.Сагач// Научные труды УСХА. – Вып. 35.– К, 1973.

Аннотация

В статье выполнены исследования поверхностей трения рабочих органов сельскохозяйственных машин и состава вторичных структур с регулирующим уровнем энтропии. Показана роль кислорода в формировании свойств поверхностных слоев в условиях абразивного изнашивания.

Summary

The agricultural machines working bodies surface friction and composition of secondary structures with the regulatory level of entropy study results are cited. The role of oxygen in the formation of properties of the surface layers in abrasion wear conditions is shown.