

PACS numbers: 06.60.Vz, 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.37.Hk, 81.07.Bc, 81.16.Rf, 81.40.Pq

Вплив мастильно-охолодних рідин на механізм самоорганізації та фізико-механічні властивості зносостійких наддрібнозернистих і наноструктурованих поверхневих шарів тертя хромистих криць

В. В. Тихонович

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

Досліджено вплив мастильно-охолодних рідин (МОР) на механізм самоорганізації на поверхнях тертя зносостійких наддрібнодисперсних покриттів, завдяки яким контактна пара криця 130X17–криця 20X13 переходить у стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя. Показано, що самоорганізовані зносостійкі покриття складаються з шарів тертя, кожен з яких є результатом окремого акту нашарування на робочі поверхні тіл мікрооб'ємів металу адгезійно взаємодійних мікроступів. Введення у воду концентратів МОР змінює хемічний склад і енергію поверхонь тертя, що приводить до нашарування на робочі поверхні більш великих об'ємів металу. Як наслідок, середня товщина шарів тертя збільшується у 7, 6 і 3 рази із застосуванням МОР «Сінтал-2», «Аквол-15П» і «Естераль» відповідно. Також скорочується час приробки пари тертя у 1,8, 1,7 і 1,4 рази відповідно. Показано, що введення у воду концентрату МОР «Естераль» не може істотно зменшити адгезійну взаємодію між тілами, що труться. В цьому випадку поверхні тертя екрануються лише адсорбованими молекулами вуглеводнів і тонкими плівками оксидів. Тому застосування концентрату МОР «Естераль» не усуває під час роботи пари тертя переважний масоперенос криці 130X17 на поверхню криці 20X13. Самоорганізовані зносостійкі покриття обох криць утво-

Corresponding author: Viktor Vadymovych Tykhonovych
E-mail: tvv@imp.kiev.ua

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: V. V. Tykhonovych, Influence of Cutting Fluids on the Mechanism of Self-Organization and Physical and Mechanical Properties of Wear-Resistant Ultra-Fine-Grained and Nanostructured Surface Friction Layers of Chromium Steels, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 2: 151–187 (2023) (in Ukrainian).
DOI: [10.15407/mfint.45.06.0151](https://doi.org/10.15407/mfint.45.06.0151)

рюються переважно з матеріалу криці 130X17. Через це її ваговий знос у 1,5 рази перевищує ваговий знос криці 20X13, що знижує ресурс роботи вузла тертя. Введення у воду концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» з протизадирними й антизноними присадками хемічно модифікує поверхні тертя. В цьому випадку на ділянках контакту тіл, що труться, додатково формуються шари хемічних сполук продуктів розкладання присадок з металом поверхонь. Це знижує адгезійну взаємодію контактувальних мікроступів, зменшує амплітуду циклічних навантажень на самоорганізовані зносостійкі покриття та перешкоджає масопереносу металу між тілами, що труться. Завдяки цьому МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» підвищують зносостійкість пари тертя в 4 і 5 разів відповідно. Також коефіцієнт тертя зменшується приблизно в 2 рази. Водночас формування самоорганізованих зносостійких покриттів переважно відбувається з матеріалу тіла якому вони належать, що робить знос складових вузла тертя більш рівномірним.

Ключові слова: тертя ковзання, зносостійкість, мастильно-охолодні рідини, наноструктурований матеріал, ультрадисперсна структура, пластична деформація, поверхневі шари тертя, масоперенос.

The cutting-fluids' influence on the mechanism of self-organization on the friction surfaces of wear-resistant superfine-dispersed coatings is studied. These coatings cause the transition of the friction pair steel 130X17–steel 20X13 to a stationary mode of operation with minimal wear and friction coefficient. As shown, the self-organizing wear-resistant coatings consist of friction layers, each of which is the result of a separate act of metal microvolumes layering on the working surfaces due to the adhesive interaction of microroughnesses. The introduction of cutting-fluid concentrates into water changes the chemical composition and energy of the friction surfaces; this leads to layering of larger metal volumes on the working surfaces. As a result, the average thickness of the friction layers increases by 7, 6 and 3 times, when using the 'Сінтал-2', 'Аквол-15П' and 'Естераль' cutting-fluid concentrates. The running-in period of the friction pairs is reduced by 1.8, 1.7 and 1.4 times, respectively. As shown, the introduction of 'Естераль' cutting-fluid concentrate into water cannot significantly reduce the adhesive interaction between rubbing bodies. In this case, friction surfaces are shielded only by adsorbed hydrocarbon molecules and thin oxide films. Therefore, the use of cutting-fluid concentrate 'Естераль' does not eliminate the predominant mass transfer of steel 130X17 to the surface of steel 20X13 during the operation of the friction pair. Self-organizing wear-resistant coatings of both steels are formed mainly from the material of steel 130X17. Therefore, its weight wear is 1.5 times higher than the weight wear of steel 20X13 that reduces the service life of the friction unit. The introduction of cutting-fluid concentrates 'Сінтал-2' and 'Аквол-15П' with extreme pressure and antiwear additives into water modifies chemically friction surfaces. In this case, layers of chemical compounds of the decomposition products of the additives are additionally formed at the contact areas of the rubbing bodies. This reduces the adhesive interaction of contacting microprotrusions, reduces the amplitude of cyclic loads on self-organized wear-resistant coatings, and prevents metal mass transfer between rubbing bodies. Thanks to this, the cut-

ting fluids 'Аквол-15П' and 'Сінтал-2' increase the wear resistance of friction pairs by 4 and 5 times, respectively. In addition, the friction coefficient decreases by about 2 times. At the same time, the formation of self-organized wear-resistant coatings occurs mainly from the material of the body, to which they belong, that makes the wear of the components of the friction unit more uniform.

Key words: sliding friction, wear resistance, cutting fluids, nanostructured material, ultradispersed structure, plastic deformation, surface layers of friction, mass transfer.

(Отримано 12 вересня 2023 р.; остаточн. варіант — 2 жовтня 2023 р.)

1. ВСТУП

В багатьох випадках ефективність застосування машин і технологічного обладнання значною мірою визначається характеристиками підшипників ковзання, що входять до їхнього складу. Вони визначають технічні характеристики виробів, коефіцієнт їхньої корисної дії та довговічність. У більшості випадків для виготовлення підшипників ковзання застосовуються пари тертя криця–стопа на основі міді (бронзи або латуні). Проте використання подібних пар тертя обмежується високою вартістю мідних стопів і їхньою нездатністю працювати за високих навантажень в агресивних середовищах. Тому для вузлів тертя важко навантаженого устаткування енергетичної, будівельної, нафто- і гірничодобувної промисловостей було розроблено пари тертя на основі хромистих криць. Високохромисті криці зарекомендували себе як зносостійкі матеріали, що мають комплекс потрібних механічних і спеціальних властивостей. Вибір хемічного складу криць зумовлений умовами експлуатації їх [1–7]. Але трибологічні характеристики цих криць все ж таки поступаються спеціальним бронзам і латуням. У зв'язку з цим актуальними є науковий пошук і обґрунтування технічних рішень, які забезпечать поліпшення антифрикційних властивостей стопів на основі заліза й хрому, що застосовуються в екстремальних умовах роботи.

Практично будь-яка дія на матеріал вузлів тертя передається через робочу поверхню; тому властивості її поверхневих шарів, як правило, визначають поведінку й експлуатаційні характеристики всього виробу. Мікроб'єми металу, що знаходяться біля плям контакту поверхонь тертя, піддаються інтенсивним імпульсним зовнішнім термомеханічним впливам. Тому структурно-фазові перетворення в зоні контакту тіл, що труться, можуть докорінно відрізнятися від традиційних механізмів фізико-хемічних взаємодій металів в умовах, близьких до рівноважних.

У роботах [7–9] було показано, що в умовах тертя ковзання у водно-повітряному середовищі перехід пар тертя з високохромистих

криць у стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя відбувається завдяки самоорганізації на поверхнях контакту обох тіл зносостійких наддрібнодисперсних покриттів, що мають високі в порівнянні з деформованим вихідним металом твердість і пружність і більш стійкі до зовнішніх циклічних термо-механічних навантажень. Вони складаються з якісно нового наддрібнозернистого матеріалу, який може містити до 25% атомів Оксигену та Карбону, більшість з яких не утворюють хемічних сполук з атомами вихідних металів.

Експериментальні та теоретичні дослідження фізико-хемічних процесів, що відбуваються під час деформації поверхневих шарів тертя, свідчать про значний вплив активних хемічних елементів робочого середовища на механізм формування у зносостійких покриттів наддрібнодисперсної структури з унікальними фізико-механічними властивостями.

Під час тертя у водно-повітряному середовищі єдиним активним хемічним елементом робочого середовища є Оксиген [8, 9]. Але, якщо додати у воду концентрати водорозчинних органічних мастильно-охолодних рідин (МОР), активними хемічними елементами робочого середовища, окрім Оксигену, можуть також стати атоми Карбону, Фосфору, Сульфуру та Хлору. Насичення поверхневих шарів тертя цими елементами та зміна поверхневої енергії металів поверхнево-активними речовинами (ПАР) МОР можуть істотно вплинути на пластичну деформацію мікрооб'ємів металу, що нашаровуються на поверхні тертя, з утворенням зносостійких покриттів, завдяки яким вузол тертя переходить у стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя.

Тому комплексне дослідження впливу водних емульсій МОР на хемічний і фазовий склад, мікроструктуру, електронну структуру та характер міжатомових зв'язків, фізико-механічні та трибологічні властивості якісно нового наддрібнозернистого матеріалу, що формується в поверхневих шарах тертя хромистих криць, може мати велике значення як для розвитку наших знань в галузі фундаментальної та прикладної фізики, так і для науково-обґрунтованого вибору хемічних складових МОР, які широко застосовуються під час експлуатації машин і технологічного обладнання. Крім того, це уможливить розробити фізичні основи одержання на поверхнях контакту вузлів тертя якісно нових зносостійких наноструктурованих і ультрадисперсних стопів, які забезпечать в екстремальних умовах експлуатації 2–3-кратне пониження величин зносу та коефіцієнта тертя. Розв'язанню цих питань присвячено дану роботу.

2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом дослідження було обрано контактну пару тертя криця

130X17 (колодка)–криця 20X13 (диск). Її вибір був зумовлений тим, що підшипники ковзання, зроблені з цих криць, добре зарекомендували себе в умовах великих навантажень і агресивних середовищ. Доцільність вибору такого складу криць було обґрунтовано в роботах [4, 6, 10]. Метал для досліджень був одержаний у відкритій індукційній печі місткістю в 12 кг. В якості шихти використовувалися: маловуглецева висічка, електродний бій і ферохром. В якості жужелеутворювальних застосовувалися вапно та плавиковий шпат. Від кожного топлення відбиралися проби металу на хемічну аналіз. Кількість Карбону аналізувалася методом спалювання в потоці кисню, кількість легувальних елементів — на рентгенівському флюоресцентному квантометрі. Результати хемічної аналізи криць наведено в табл. 1. Сума концентрацій інших домішок не перевищувала 0,05% мас.

Досліджувані стопи в литому стані мають металеву матрицю з переважно аустенітною структурою. Відомо [4], що така структура не завжди є оптимальною з точки зору зносостійкості та механічного оброблення різанням. Є широкі можливості шляхом термічного оброблення змінити структуру металевої матриці стопів і, як наслідок, одержати бажані фізико-механічні властивості. Тому одержані після лиття стопи піддавалися додатковому термічному обробленню. Криця 130X17 піддавалася термічному обробленню, яке полягало в наступному: нагрів до температури у 950°C (витримка 2 години), охолодження до температури у 680°C (витримка 2 години), охолодження в печі, гарт у маслі від температури у 1020°C і наступний високотемпературний відпуск за 600°C впродовж 1 години. Термічне оброблення криці 20X13 складалося з: нагріву до температури у 1020°C (витримка 45 хвилин), гартування в маслі та відпуску за 520°C впродовж 1 години.

Випробовування контактної пари криця 130X17 (колодка)–криця 20X13 (диск) на тертя проводилося на стандартній машині тертя 2070СМТ-1 в умовах тертя ковзання за нормального навантаження у $5 \cdot 10^6$ Н/м² та швидкості ковзання у 1 м/с за схемою колодка–диск (рис. 1). Відношення площі колодки до площі диска (коефіцієнт взаємного перекриття) — $\kappa \cong 0,08$. Середньоквадратичні похибки мірянь вагового зносу криць не перевищували $5 \cdot 10^{-6}$ Г/м. Схему випробовувань криць на тертя наведено на рис. 1.

Випробовування на тертя відбувались у водно-повітряному середовищі. Також замість води використовувалися 10% -водні розчини концентратів МОР «Аквол-15П», «Сінтал-2», «Естераль».

У концентраті МОР «Аквол-15П» в якості протизадірної та протизносної присадки використовується дітіо-біс-н-бутілксантогенат за ТУ 38101815-80 із вмістом Сульфуру в 40%. Кількість присадки в концентраті — 10%. Роль емульгаторів виконують солі карбонових кислот і алкілсульфоокислот, а також нейногенні ПАР — окси-

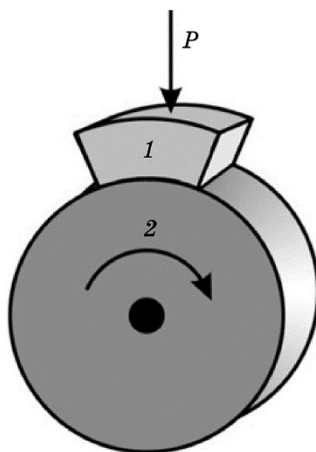
ТАБЛИЦЯ 1. Середній хемічний склад криць 130X17 і 20X13.**TABLE 1.** The average chemical composition of steels 130X17 and 20X13.

	Криця 130X17		Криця 20X13	
	% мас.	ат. %	% мас.	ат. %
Fe	80,47	75,57	86,30	84,37
Cr	17,23	17,37	12,42	13,04
Si	0,36	0,68	0,50	0,97
Mn	0,51	0,49	0,41	0,41
Ti	0,01	0,02	0,01	0,01
Cu	0,06	0,05	0,09	0,08
P	0,02	0,03	0,02	0,04
S	0,02	0,03	0,02	0,04
C	1,32	5,76	0,23	1,04

етильовані жирні спирти.

У концентраті МОР «Сінтал-2» в якості протизадірної та протизносної присадки використовується хлорпарафін ХП-470 за ТУ 601568-76 із вмістом Хлору у 50%. Кількість присадки в концентраті — 25%. В якості емульгаторів використовуються солі й ефіри карбонових кислот.

Концентрат МОР «Естераль» складається з триетаноламінового мила суміші нижчих дикарбонових кислот (13% мас.), триетано-

**Рис. 1.** Схема випробування матеріалів на тертя: 1 — колодка, 2 — диск.**Fig. 1.** Scheme of materials' testing for friction: 1—block, 2—disc.

ламінових ефірів суміші нижчих дикарбонових кислот (60% мас.) і алкілоламідів суміші дикарбонових нижчих кислот (27% мас.), які виготовлялися згідно з патентом України № 48166. Цей концентрат не містить хемічно активних щодо металу елементів у вигляді протизадирних і антизносних органічних присадок з активними атомами Сульфуру та Хлору, але відрізняється достатньо високими мастильними й антикорозійними властивостями.

Морфологія та хемічний склад поверхневих шарів тертя досліджувалися за допомогою сканувального електронного мікроскопа JSM-6490LV компанії JEOL Ltd., який був додатково обладнаний енергодисперсійним спектрометром (ЕДС) INCAEnergy 350 Premium з кремнійовим дрейфовим детектором, спектрометром з хвильовою дисперсією INCAWave 500 і детектором дифракції відбитих електронів HKLChannel 5 EBSD виробництва OXFORD Instruments Analytical Ltd. (Великобританія). Дослідження проводилися за пришвидшувальної напруги у 20 кВ та струму пучка у 7 нА. Для дослідження структури поверхонь тертя реєструвалися зображення у режимі вторинних електронів. Розрахунок концентрацій елементів за одержаними спектрами проводився методом матричних виправлень. Використовувалася найбільш сучасна схема корекції матричних ефектів ХРР компанії OXFORD Instruments Analytical Ltd., розроблена Pouchou і Pichoir. Метод корекції ХРР було обрано завдяки хорошій точності розрахунків, особливо для випадків сильного поглинання, таких як аналіза легких елементів у важкій матриці. Це уможливило підвищити точність визначення концентрації Карбону й Оксигену в поверхневих шарах тертя криць.

Локальний хемічний склад зносостійких поверхневих шарів тертя додатково вимірювався за допомогою рентгенівського мікрозонда MS-46 фірми «САМЕСА» (Франція). Кількісна аналіза хемічного складу робилася на косих шліфах по крапках у режимі зонда із 20 кВ, 13 нА. Для розрахунку концентрацій застосовувалася програма ZOND [11], яка обчислювала поправки на поглинання, флюоресценцію й атомовий номер. Сумарна похибка розрахунку концентрацій металевих компонентів у шарах тертя не перевищувала 0,2% мас.

Металографічні дослідження проводилися на оптичному мікроскопі Neophot-30. Для захисту поверхневого шару тертя від можливих ушкоджень під час приготування торцевих шліфів на поверхні тертя попередньо електролітично осаджувався шар ніклю товщиною близько 300 мкм. Для цього застосовувався сульфаміновий електроліт. Осаджування тривало 6–7 годин за густини струму у 5 А/дм² і температури електроліту у 50–60°C.

Трансмісійні електронно-мікроскопічні дослідження мікроструктури та фазового складу вихідних металів і зон контактної взаємодії криць проводилися на електронному мікроскопі JEM-200CX (JEOL Ltd.) за пришвидшувальної напруги у 200 кВ. Для приготування то-

нких фоль, що уможливають вивчати метал по всій глибині зони контактної взаємодії криць, використовувалася спеціально розроблена методика, докладно описана в роботі [12]. Для виключення забруднення об'єкта вуглецевою плівкою, що є продуктом розкладу пари дифузійної олії, застосовувався охолоджений рідким азотом екран.

Аналіза локального розподілу домішкових атомів у поверхневих шарах тертя проводилася методом Оже-електронної спектроскопії, оскільки з його допомогою можна визначити вміст хемічних елементів у поверхневому шарі товщиною у 1–3 атомарних шари [13].

Дослідження проводилися на приладі LAS-2000 («RIBER»). Для визначення вмісту хемічних елементів на межах зерен безпосередньо в приладі здійснювалося крихке руйнування зразків за температури у -196°C і вакууму у $1,3 \cdot 10^{-8}$ Па. Поверхні руйнування були розташовані перпендикулярно поверхням тертя. Для Оже-аналізи поверхонь зламу спеціально вибиралися ділянки інтеркристалітного руйнування матеріялу, що відповідають межам зерен. Час реєстрації спектрів Оже-електронів був вибраний таким чином, щоб виключити можливість впливу на них адсорбції на поверхню, що аналізується, домішок із залишкових газів або дифузії їх з об'єму тіла.

Вимірювання твердості за Роквеллом проводилися на приладі УТ 5011 відповідно до Держстандарту 9013-59 (ІСО 6508-86); вимірювання мікротвердості — на мікротвердомірі ПМТ-3 відповідно до Держстандарту 2999-75. Використовувався Віккерсів діамантовий наконечник. Навантаження на індентор дорівнювало 0,5 Н.

Мікромеханічні випробування матеріялу зон контактної взаємодії криць проводилися методом динамічного проникнення індентора на приладі УМП-11. Використовувалася методика з реєстрацією діаграм проникнення в координатах навантаження на індентор P –взаємне зближення h індентора та зразка, що одержала розвиток у роботах [14–16]. Взаємне зближення індентора та зразка здійснювалося з постійною швидкістю у 1 м/с. Для можливості порівняння розрахованих з діаграм значень мікротвердості за величиною діагоналі залишкового пластичного відтиску з даними вимірів на приладі ПМТ-3 максимальне навантаження на індентор в обох випадках обиралося рівним 0,5 Н. З відношення площ під гілками розвантаження та навантаження діаграм проникнення індентора визначалася доля роботи пружної деформації $A_{\text{пр}}$ у загальній роботі пружно-пластичної деформації A матеріялу за проникнення індентора.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 2 наведено залежності коефіцієнта тертя контактної пари криця 130X17 (колодка)–криця 20X13 (диск) від шляху тертя

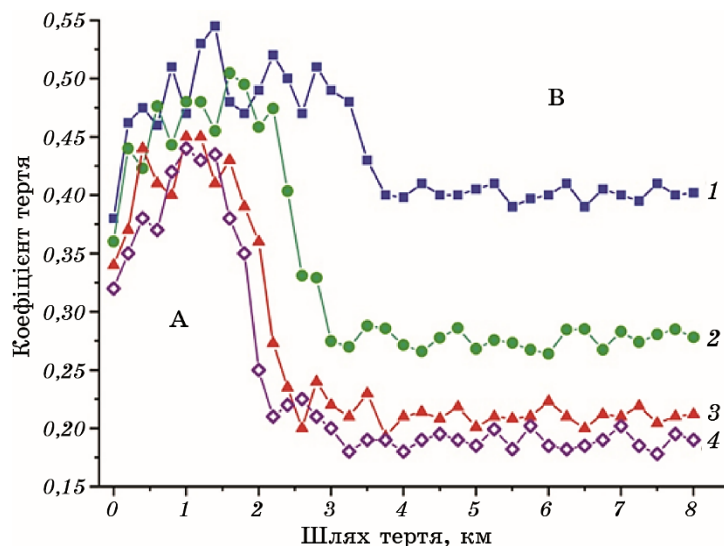


Рис. 2. Залежності коефіцієнта тертя від шляху тертя для контактної пари криця 130X17–криця 20X13, що працює у середовищах: вода–повітря (1), водна емульсія концентрату МОР «Естераль»–повітря (2), водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря (3), водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря (4); А — етап припрацювання вузла тертя, В — етап стаціонарного режиму роботи.

Fig. 2. Dependences of the friction coefficient on the friction path for a contact pair steel 130X17–steel 20X13 working in the environment: water–air (1), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Естераль’–air (2), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air (3), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air (4); А is the stage of breaking-in of the friction unit, В is the stage of stationary mode of operation.

за використання різних технологічних середовищ. Для всіх випадків процес тертя умовно можна розділити на два етапи: початковий етап припрацювання вузла тертя (ділянка А на рис. 2) і етап стаціонарного режиму роботи контактної пари з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя (ділянка В на рис. 2). Видно, що введення у воду концентратів МОР зменшує час припрацювання пар тертя та значення коефіцієнта тертя у стаціонарному режимі роботи. Водночас значення коефіцієнтів тертя на етапі припрацювання контактної пари для різних робочих середовищ істотно не відрізняються. Дія водних емульсій МОР стає ефективною тільки після переходу пари тертя у сталий режим роботи. Максимально понижують коефіцієнт тертя МОР «Сінтал-2» і «Аквол-15П», до складу яких входять протизадирні та протизносні органічні присадки.

Ваговий знос кожного з тіл пари тертя криця 130X17–криця 20X13 на етапі припрацювання і в сталому режимі роботи для різ-

ТАБЛИЦЯ 2. Ваговий знос контактної пари криця 130X17 (колодка)–криця 20X13 (диск) на етапі припрацювання та в сталому режимі тертя.

TABLE 2. Weight wear of contact pair steel 130X17 (block)–steel 20X13 (disc) at the stage of breaking-in and in stationary friction mode.

Робоче середовище	Етап припрацювання пари тертя			Етап стаціонарного режиму роботи пари тертя		
	Ваговий знос 130X17, г/м·10 ⁻⁵	Ваговий знос 20X13, г/м·10 ⁻⁵	Сумарний ваговий знос, г/м·10 ⁻⁵	Ваговий знос 130X17, г/м·10 ⁻⁵	Ваговий знос 20X13, г/м·10 ⁻⁵	Сумарний ваговий знос, г/м·10 ⁻⁵
Вода	60,1	24,8	84,9	8,5	3,9	12,4
МОР «Сінтал-2»	48,7	30,1	78,8	0,9	1,4	2,3
МОР «Аквол-15П»	49,0	28,9	77,9	1,3	1,8	3,1
МОР «Естераль»	44,7	27,0	71,7	4,0	2,7	6,7

них технологічних середовищ наведено в табл. 2. Видно, що введення у воду концентратів МОР починає істотно понижувати знос тіл лише після переходу трибосистеми у стаціонарний режим роботи. У разі використання чистої води ваговий знос криці 130X17 більш ніж у два рази перевищує ваговий знос криці 20X13. Це може зменшувати ресурс роботи вузла тертя. Використання водної емульсії концентрату МОР «Естераль» підвищує зносостійкість тіл майже у два рази, але не усуває нерівномірний знос колодки та диску. Найкраще впливають на трибологічні характеристики контактної пари водні емульсії концентратів МОР «Сінтал-2» і «Аквол-15П» з протизадирними та протизносними органічними присадками. Вони роблять ваговий знос тіл мінімальним і майже рівномірним. Водночас найкращі показники має МОР «Сінтал-2».

Динаміку структурно-фазових перетворень у зоні контактної взаємодії пари тертя криця 130X17–криця 20X13 під час роботи у водно-повітряному середовищі докладно досліджено в роботах [8, 9, 17, 18]. Було встановлено, що перехід пари тертя в стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя відбувається завдяки самоорганізації на поверхнях контакту обох тіл зносостійких наддрібнодисперсних покриттів у кількості, достатній для повного екранування в процесі роботи деформованого вихідного металу. Ці покриття утворено з якісно нового ультрадисперсного та наноструктурованого матеріалу, який може містити до 25 ат. % Оксигену та Карбону. Самоорганізовані зносостійкі покриття складаються з окремих шарів і є продуктом багаторазового нашарування на

поверхні тертя мікровиступів металу, які утворюються в результаті адгезійної взаємодії контактувальних тіл під час припрацювання вузлів тертя. Самоорганізовані зносостійкі покриття кожного з тіл можуть складатися з шарів тертя, які сформовані з металу різних криць.

Можна припустити, що для розуміння механізму впливу на ваговий знос і коефіцієнт тертя введення у воду концентратів МОР слід дослідити, як саме вони впливають на процес самоорганізації на поверхнях контакту обох тіл зносостійких наддрібнодисперсних покриттів. А оскільки самоорганізовані зносостійкі покриття складаються з окремих шарів тертя, кожен з яких є результатом окремого акту нашарування металу на робочу поверхню тіл, насамперед, необхідно провести комплексне локальне дослідження впливу МОР на фізико-хімічні процеси, що відбуваються в мікрооб'ємах металу під час нашарування їх на поверхні тертя.

Аналіза структурно-фазових перетворень у зоні контактної взаємодії пар тертя під час роботи в середовищах, де замість води застосовуються водні емульсії концентратів МОР, свідчить про те, що, як і у випадку застосування чистої води, перехід пар тертя в стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя відбувається лише після самоорганізації на поверхнях контакту обох тіл зносостійких покриттів у кількості, достатній для повного екранування в процесі роботи деформованого вихідного металу. Введення у воду концентратів МОР скорочує час, необхідний для цього, приблизно у 2 рази для МОР «Сінтал-2» і «Аквол-15П» і в 1,5 рази для МОР «Естераль» (рис. 2).

Структура зон контактної взаємодії криць за використання концентратів МОР «Сінтал-2», «Аквол-15П» і «Естераль» майже однакова. Тому на рисунку 3 наведено фотографії торцевих шліфів зон контактної взаємодії криць після випробувань на тертя в водноповітряному середовищі й у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2» – повітря. Самоорганізованим зносостійким покриттям на фотографіях відповідають зони А. Вони розташовані над деформованим вихідним металом криць (зони В), мають з ним чітку межу та відрізняються ступенем щавлення. Зонам С на рисунку відповідає недеформований вихідний метал, розташований у глибині тіл. Слід відзначити помітне збільшення середньої товщини самоорганізованих зносостійких покриттів із введенням у воду концентратів МОР.

Більш детальне дослідження структури зносостійких самоорганізованих покриттів (зон А) робилося на косих шліфах зразків під кутом у 30° до поверхні тертя (рис. 4). Незалежно від вибору робочого середовища, ці покриття складаються з окремих шарів тертя з чіткою межею між ними, ступінь щавлення та загальна кількість яких змінюється уздовж робочої поверхні.

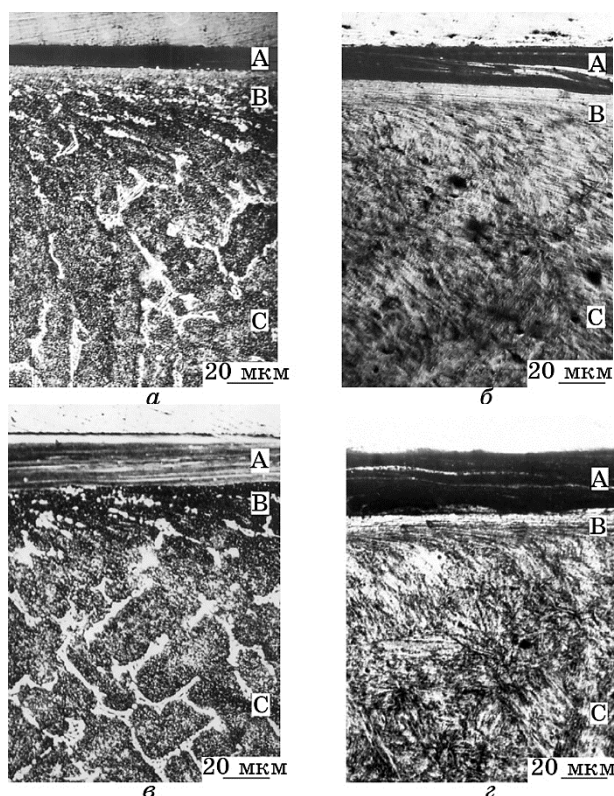


Рис. 3. Структура зони контактної взаємодії криць 130X17 (*а, в*) і 20X13 (*б, г*) після випробувань на тертя у середовищах: вода–повітря (*а, б*), водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря (*в, г*). Торцевий шліф, А — зносостійкі самоорганізовані покриття, В — деформований вихідний метал, С — недеформований вихідний метал.

Fig. 3. The structure of the contact-interaction zone of steels 130X17 (*a, в*) and 20X13 (*б, г*) after friction testing in the environments: water–air (*a, б*), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air (*в, г*). Cross-section, A is wear-resistant self-organizing coatings, B is deformed initial metal, and C is undeformed initial metal.

Після відповідного щавлення косих шліфів сканувальна електронна мікроскопія дає змогу спостерігати зменшення розмірів зерен за руху вздовж окремих шарів у напрямку тертя. Кінцева частина багатьох шарів тертя складається з ділянок, які не піддаються щавленню.

З рисунку 4 видно, що геометричні розміри шарів тертя, з яких складаються зносостійкі самоорганізовані покриття, істотно залежать від вибору робочого середовища. Введення у воду концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» збільшує їхню середню товщину відповідно у 6 і 7 разів, введення у воду концентрату МОР «Есте-

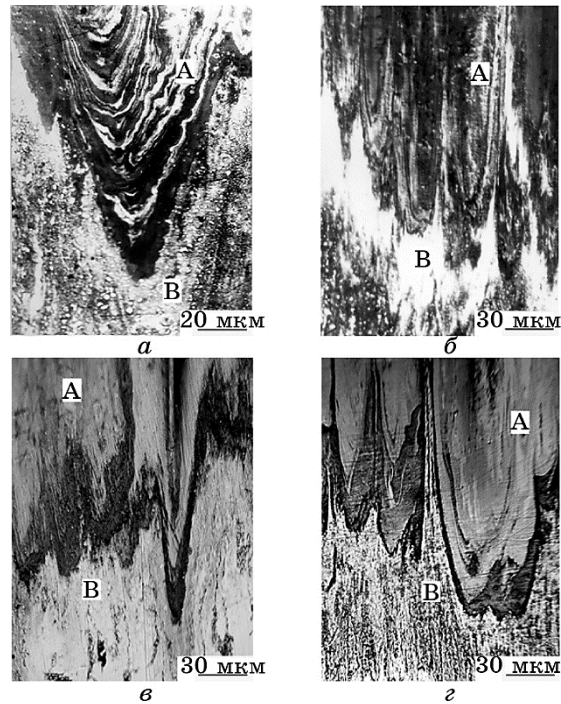


Рис. 4. Структура зони контактної взаємодії криці 130X17 після випробувань на тертя у середовищах: вода–повітря (*a*), водна емульсія концентрату МОР «Естераль»–повітря (*б*), водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря (*в*), водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря (*г*). Косий шліф під кутом у 30°, А — зносостійкі самоорганізовані покриття, В — деформований вихідний метал.

Fig. 4. The structure of the contact-interaction zone of steel 130X17 after friction testing in the environments: water–air (*a*), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Естераль’–air (*б*), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air (*в*), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air (*г*). Oblique section at an angle of 30°, A is wear-resistant self-organizing coatings, B is deformed initial metal.

раль» — у 3 рази. Товщина шарів тертя змінюється вздовж робочої поверхні; тому її середні значення визначалися за допомогою оптичної та сканувальної мікроскопій на п’ятьох ділянках для кожного з робочих середовищ.

Оскільки самоорганізовані зносостійкі покриття складаються з шарів тертя [8, 9, 17, 18], кожен з яких є результатом окремого акту нашарування металу на робочу поверхню тіл, можна припустити, що введення у воду концентратів МОР пластифікує метал мікроступів, які взаємодіють під час тертя. Тому на поверхні контакту нашаровуються більші об’єми металу, що приводить до збільшення

середньої товщини поверхневих шарів тертя та скорочення часу формування їх у кількості, достатній для повного екранування під час роботи деформованого вихідного металу.

Для розуміння механізму впливу введення у воду концентратів МОР на фізико-хімічні процеси, що відбуваються в мікрооб'ємах металу під час нашарування їх на робочі поверхні з утворенням шарів тертя, для кожного з робочих середовищ проводилися комплексні локальні дослідження хімічного та фазового складів, мікроструктури та фізико-механічних властивостей окремих шарів тертя.

Для дослідження мікроструктури та фазового складу матеріалу шарів тертя використовувалася трансмісійна електронна мікроскопія. За допомогою її в роботі [8] було проведено детальну аналізу мікроструктури та фазового складу окремих шарів тертя робочої пари криця 130X17–криця 20X13, що утворюються на поверхнях контакту тіл під час роботи у водно-повітряному середовищі.

Для обох тіл пари тертя характер структурно-фазових перетворень металу вздовж окремих шарів тертя майже однаковий, незалежно від вибору робочого середовища. Тому надалі для виключення повторень зосередимось на описі процесів, які відбуваються в шарах тертя криці 130X17.

В усіх випадках рівень фрагментації структури окремих шарів тертя не є постійним. Він може істотно змінюватися вздовж поверхні тертя та під час переміщення між сусідніми шарами. Менш фрагментовані шари тертя повністю складаються з ультрадисперсної кристалічної структури, утвореної просторово дезорієнтованими зернами з кристалічною ОЦК-ґратницею заліза. Під час тертя в водно-повітряному середовищі розмір зерен цих шарів плавно змінюється в напрямку тертя від 160 до 20 нм. Введення у воду концентратів МОР трохи збільшує максимальний розмір зерен на початку шарів, який дорівнює 170 нм для МОР «Естераль» і 185 нм для МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2». З ростом ступеня фрагментації структури збільшується азимутальне розщеплення рефлексів заліза на мікродифрактограмах, що свідчить про більшу просторову дезорієнтацію зерен. Межі зерен шарів тертя переважно утворені дислокаційними ансамблями та мають просторово протяжну форму. Зі збільшенням ступеня фрагментації структури та просторової дезорієнтації її зерен істотно збільшується об'ємна частка примезових областей.

Більш фрагментовані шари тертя відрізняються від попередніх тим, що їхня кінцева частина складається з наноструктурованого кристалоаморфного матеріалу з розміром зерен у 8–2 нм. Кристалоаморфна наноструктура має чітко окреслену межу з ультрадисперсним матеріалом.

Мікроструктуру й електроннограми ультрадисперсної та наноструктурованої частин шарів тертя робочої пари криця 130X17–криця 20X13, одержаних в різних середовищах, наведено на рис. 5, 6.

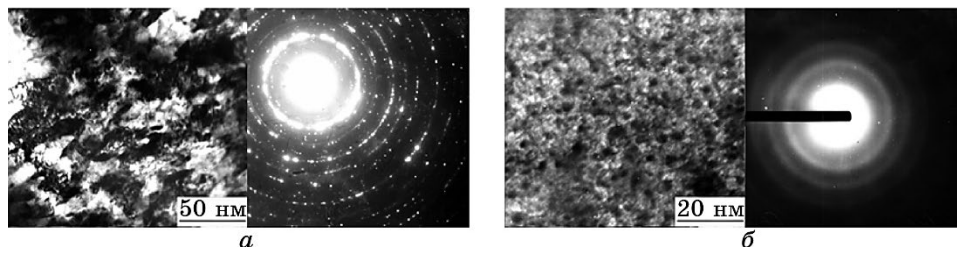


Рис. 5. Мікроструктура й електронограми ультрадисперсної (а) і наноструктурованої (б) частин одного з шарів тертя робочої пари криця 130X17–криця 20X13. Випробовування на тертя відбувалися у водно-повітряному середовищі.

Fig. 5. Microstructure and electron diffraction patterns of the ultradispersed (a) and nanostructured (b) parts of one of the friction layers at the working pair of steel 130X17–steel 20X13. Friction testings took place in a water–air environment.

Контраст світлопільного зображення мікроструктури може мати [19, 20] як дифракційну природу, що залежить від розташування кристалографічних площин, які знаходяться у відбивальному положенні, так і адсорбційну природу, викликану різними густинами сусідніх ділянок зразка. Істотна зміна контрасту, що формується в темному полі за дії різних рефлексів дифракційного кільця, вказує на те, що в цьому випадку він мав дифракційний характер, зумовлений різною просторовою орієнтацією зерен.

З рухом вздовж окремих шарів тертя розмір зерен та їхня просторова дезорієнтація змінюються плавно; водночас ступені фрагмента-

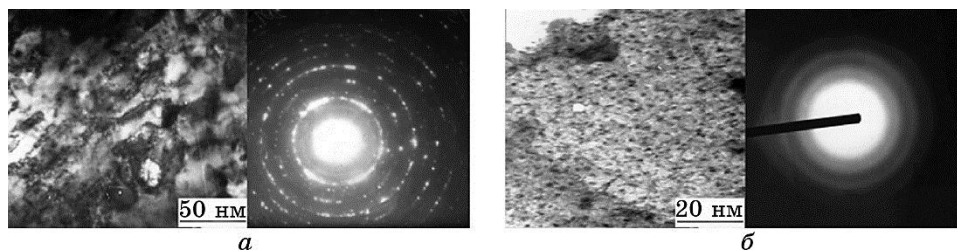


Рис. 6. Мікроструктура й електронограми ультрадисперсної (а) та наноструктурованої (б) частин одного з шарів тертя робочої пари криця 130X17–криця 20X13. Випробовування на тертя відбувались у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря.

Fig. 6. Microstructure and electron-diffraction patterns of the ultradispersed (a) and nanostructured (b) parts of one of the friction layers at the working pair of steel 130X17–steel 20X13. Friction testings took place in the environment water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air.

ції структури сусідніх шарів тертя можуть істотно відрізнятись. Це також підтверджує зроблене раніше припущення про те, що кожен з шарів тертя, що входить до складу самоорганізованих зносостійких покриттів, формується в результаті окремого акту нашаровування мікрооб'єму металу на поверхню контакту взаємодійних тіл.

На мікродифрактограмах (рис. 5 і 6) від шарів тертя самоорганізованих зносостійких покриттів, крім рефлексів, відповідних ОЦК-залізу, присутні також рефлекси карбідів типу Me_7C_3 . Але їхня кількість поступово зменшується з рухом вздовж кожного з шарів у напрямку тертя. Це свідчить про те, що інтенсивна пластична деформація мікрооб'ємів металу за нашарування їх на поверхні тертя приводить до часткового розчинення карбідної фази. Про розчинення карбідної фази в ході розвиненої пластичної деформації заліза під час прокатки свідчать також дані робіт [21, 22].

З рухом вздовж кожного з шарів тертя в напрямку нашарування мікрооб'ємів металу на мікродифрактограмах, окрім рефлексів, відповідних ОЦК-залізу і карбідам типу Me_7C_3 , виникають також рефлекси від ультрадисперсних оксидів типу Fe_2O_3 . У початковій частині шарів тертя вони практично відсутні та з'являються на пізнішій стадії нашарування мікрооб'ємів металу на поверхні контакту. Кількість рефлексів від ультрадисперсних оксидів типу Fe_2O_3 істотно зменшується із введенням у воду концентратів МОР.

У разі застосування концентрату МОР «Аквол-15П», де в якості протизадірної та протизносної органічної присадки використовується дітіо-біс-н-бутілксантогенат із вмістом Сульфуру у 40%, на окремих ділянках шарів тертя присутні дрібнодисперсні включення сульфідів Феруму (FeS). Вони розташовуються в примежових областях зерен у вигляді окремих ланцюжків або входять до складу евтектики $Fe + FeS$. Мікроструктуру однієї з таких ділянок шару тертя наведено на рис. 7.

У концентраті МОР «Сінтал-2» в якості протизадірної та протизносної органічної присадки використовується хлорпарафін ХП-470 із вмістом Хлору у 50%. Однак його застосування не приводить до утворення будь-яких хемічних сполук Хлору в шарах тертя.

Хемічний склад окремих шарів тертя, що входять до складу зносостійких самоорганізованих покриттів, і розташованих під ними деформованого та недеформованого вихідних металів досліджувався методом локальної рентгеноспектральної аналізи.

На приладі ПМТ-3 за допомогою Віккерсового діамантового наконечника робилося маркування різних ділянок косих шліфів шарів тертя деформованого та вихідного металів обох криць. І лише після цього на позначених ділянках проводилися локальна рентгеноспектральна аналіза та мікромеханічні випробування матеріалу. Завдяки цьому хемічний склад і фізико-механічні властивості матеріалу вимірювалися на тих самих ділянках.

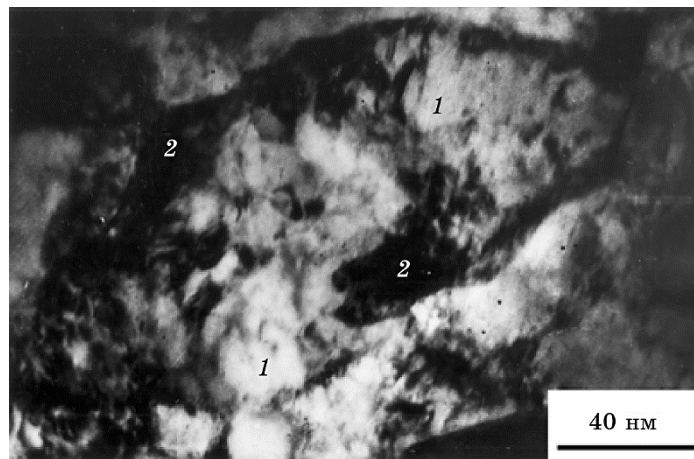


Рис. 7. Мікроструктура ультрадисперсної ділянки шару тертя робочої пари криця 130X17–криця 20X13. Випробовування на тертя відбувались у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря: 1 — ферит, 2 — сульфід Феруму (FeS).

Fig. 7. Microstructure of the ultradispersed area of the friction layer at the working pair of steel 130X17–steel 20X13. Friction testings took place in the environment: water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air: 1—ferrite, 2—iron sulphides (FeS).

В таблиці 3 наведено результати хемічної аналізи металу, розташованого безпосередньо під зносостійкими самоорганізованими покриттями (зони В) і на глибині зразків (зони С). Для криці 130X17 аналіза хемічного складу металу на глибині зразків проводилася на ділянках, розташованих всередині сітки з первинних евтектичних карбідів.

Хемічний склад деформованого та недеформованого вихідних металів для всіх робочих середовищ був однаковим. Тому в таблиці 3 наведено їхні середні значення.

В таблицях 4 і 5 наведено середній хемічний склад шарів тертя, що входять до складу зносостійких самоорганізованих покриттів робочої пари криця 130X17–криця 20X13, після випробувань на тертя в різних робочих середовищах. Масоперенесення металу між тілами, що труться, в стаціонарному режимі роботи та на етапі припрацювання пари тертя може істотно відрізнятися. Тому середній хемічний склад шарів тертя, що входять до складу зносостійких самоорганізованих покриттів, може змінюватися в процесі роботи. Виходячи з цього, аналіза хемічного складу шарів тертя проводилася лише після випробувань контактної пари впродовж 8 годин. Це уможливило одержати хемічний склад шарів тертя, переважно сформованих у сталому режимі роботи.

ТАБЛИЦЯ 3. Хемічний склад (ат.%) вихідного металу криць 130X17 і 20X13 на ділянках, розташованих безпосередньо під зносостійкими самоорганізованими покриттями (зони В) і на глибині зразків (зони С).

TABLE 3. Chemical composition (at.%) of the initial metal of steels 130X17 and 20X13 on the sites located directly under wear-resistant self-organizing coatings (zone В) and in depth of samples (zone С).

	Криця 130X17		Криця 20X13		
	Зона В	Зона С	Зона В	Зона С	
	Fe	76,56	78,07	84,40	84,38
	Cr	16,70	15,62	13,01	13,06
	Si	0,69	0,66	0,92	0,97
	Mn	0,47	0,50	0,44	0,41
Хемічний склад, ат.%	Ti	0,01	0,02	0,01	0,01
	Cu	0,05	0,04	0,08	0,07
	P	0,03	0,03	0,03	0,04
	S	0,02	0,03	0,04	0,04
	C	5,47	5,03	1,07	1,02
$C_i/(C_{Fe} + C_{Cr} + C_{Si} + C_{Mn})$	Fe	0,81	0,82	0,85	0,85
	Cr	0,18	0,17	0,13	0,13

У разі випробувань пари тертя у водно-повітряному середовищі характерною відмінністю хемічного складу шарів тертя є присутність у них великої кількості атомів Оксигену. З рухом вздовж окремих шарів тертя в напрямку нашарування металу концентрація Оксигену в матеріалі істотно збільшується. На ділянках шарів тертя з середнім розміром зерен близько 150 нм концентрація Оксигену не перевищує 3,5 ат.%; разом з тим на ділянках з кристалоаморфною наноструктурою кількість Оксигену досягає 21 ат.%. Хоча в межах окремих шарів тертя хемічний склад металу змінюється, співвідношення кількостей атомів хемічних елементів вихідних криць (Fe, Cr, Si, Mn і C) залишається майже незмінним:

$$C_i/(C_{Fe} + C_{Cr} + C_{Si} + C_{Mn} + C_C) \approx \text{const},$$

де C_i — атомової концентрація i -го хемічного елементу.

Це свідчить про те, що під час утворення шарів тертя інтенсивна пластична деформація мікрооб'ємів металу супроводжується насиченням ультрадисперсної структури атомами Оксигену з робочого середовища за рахунок термомеханічної деструкції молекул води в місцях контакту мікроставів.

Шари тертя можуть відрізнятися співвідношенням кількостей

ТАБЛИЦЯ 4. Середній хемічний склад шарів тертя, що входять до складу зносостійких самоорганізованих покриттів робочої пари криця 130X17–криця 20X13 після випробувань на тертя в робочих середовищах вода–повітря та водна емульсія концентрату МОР «Естераль»–повітря.

TABLE 4. The average chemical composition of the friction layers included in the wear-resistant self-organizing coatings of the working pair steel 130X17–steel 20X13 after friction testings in working environments water–air and water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Естераль’–air.

	Вода–повітря		Водна емульсія концентрату МОР «Естераль»–повітря		
	Криця 130X17	Криця 20X13	Криця 130X17	Криця 20X13	
Хемічний склад, ат. %	Fe	68,29	70,10	68,37	70,15
	Cr	14,51	14,05	13,31	12,81
	Si	0,70	0,79	0,72	0,81
	Mn	0,42	0,39	0,41	0,37
	Ti	0,01	0,01	0,01	0,01
	Cu	0,04	0,05	0,05	0,06
	P	0,02	0,03	0,03	0,02
	S	0,03	0,02	0,03	0,02
	O	12,17	10,96	7,03	6,58
	C	3,81	3,60	10,04	9,17
$C_i/(C_{Fe} + C_{Cr} + C_{Si} + C_{Mn})$	Fe	0,81	0,82	0,82	0,83
	Cr	0,17	0,16	0,16	0,15

атомів хемічних елементів вихідних металів (Fe, Cr, Si, Mn і C). Порівнюючи величини $C_i/(C_{Fe} + C_{Cr} + C_{Si} + C_{Mn} + C_C)$ для кожного з шарів тертя з подібними величинами для вихідних металів обох криць, можна оцінити внесок металу кожного з тіл робочої пари в утворення окремих шарів тертя.

Аналіза хемічного складу шарів тертя кожного з тіл контактної пари криця 130X17–криця 20X13 свідчить про те, що у випадку тертя у водно-повітряному середовищі внесок матеріалу криці 130X17 в формування шарів тертя, що входять до складу самоорганізованих зносостійких покриттів обох криць, є переважним (табл. 3 і 4).

Введення у воду концентратів органічних МОР приводить до того, що активними хемічними елементами робочого середовища, окрім атомів Оксигену, стають також атоми Карбону, Сульфуру та Хлору. Завдяки цьому в шарах тертя змінюється кількість атомів Карбону й Оксигену (табл. 4 і 5), а також з’являються атоми Суль-

ТАБЛИЦЯ 5. Середній хемічний склад шарів тертя, що входять до складу зносостійких самоорганізованих покриттів робочої пари криця 130X17–криця 20X13 після випробувань на тертя в робочих середовищах водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря і водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря.

TABLE 5. The average chemical composition of the friction layers included in the wear-resistant self-organizing coatings of the working pair steel 130X17–steel 20X13 after friction testings in working environments water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air and water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air.

	Водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря		Водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря	
	Криця 130X17	Криця 20X13	Криця 130X17	Криця 20X13
Fe	64,74	72,96	64,93	72,41
Cr	14,45	12,29	13,60	12,30
Si	0,64	0,86	0,61	0,82
Mn	0,41	0,33	0,44	0,36
Ti	0,01	0,01	0,01	0,01
Хемічний склад, ат. %				
Cu	0,03	0,05	0,05	0,06
P	0,02	0,02	0,03	0,02
S	1,19	1,01	0,02	0,02
Cl	0,00	0,00	1,08	0,89
O	6,30	4,27	6,35	4,42
C	12,21	8,20	12,88	8,69
$C_i/(C_{Fe} + C_{Cr} + C_{Si} + C_{Mn})$				
Fe	0,81	0,84	0,82	0,84
Cr	0,18	0,14	0,17	0,14

фуру та Хлору, у разі використання концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2».

Кількість атомів Карбону й Оксигену в шарах тертя залежить від вибору концентрату МОР. Мабуть, це пов'язане з тим, що кількість активних хемічних елементів робочого середовища та їхня реакційна здатність залежать від виду та концентрації хемічних сполук, що входять до складу МОР, їхньої хемічної, термо- та механостійкості, а також від того, в якому вигляді знаходяться активні елементи у продуктах розкладу цих хемічних сполук (активні радикали чи поодинокі атоми).

Аналіза хемічного складу поверхневих шарів тертя на етапі при-

працювання робочої пари свідчить про те, що в цьому випадку для будь-якого середовища внесок металу криці 130X17 у формування самоорганізованих зносостійких покриттів обох криць є переважним. Ця тенденція змінюється після переходу пари тертя до сталого режиму роботи. Із застосуванням концентрату МОР «Естераль» внесок металу криці 20X13 у формування шарів тертя на поверхні обох криць збільшується, хоча, як і раніше, поступається криці 130X17. Використання концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» істотно знижує масоперенос металу між тілами, що труться. Тому самоорганізовані зносостійкі покриття обох криць в цьому випадку переважно формуються з металу тієї криці, на поверхні якої знаходяться. Про це свідчать дані останніх рядків табл. 3–5.

За допомогою метода Оже-електронної спектроскопії проводилася аналіза хемічного складу меж зерен поверхневих шарів тертя та вихідного металу. На поверхнях зламу, розташованих перпендикулярно поверхням тертя, спеціально вибиралися ділянки інтеркристалітного руйнування матеріалу, що відповідають межах зерен.

На рисунку 8 наведено спектри Оже-електронів, зняті від шарів тертя та вихідного металу криці 130X17 після випробувань контактної пари в різних середовищах. З рисунка видно, що межі зерен у шарів тертя та вихідного металу криці мають різний хемічний склад. Інтенсивна пластична деформація мікрооб'ємів металу із утворенням шарів тертя приводить до істотного збагачення меж зерен атомами Оксигену та Карбону. А їхня кількість залежить від вибору робочого середовища. Якщо за тертя у водно-повітряному середовищі межі зерен переважно збагачуються атомами Оксигену, то застосування замість води водних емульсій концентратів органічних МОР приводить до першочергового насичення меж зерен атомами Карбону.

Аналіза форми піка Оже-електронів Карбону свідчить про те, що для будь-якого робочого середовища атоми Карбону на межах зерен шарів тертя знаходяться переважно у твердому розчині, хоча у вихідному металі атоми Карбону на межах зерен знаходяться переважно в карбідній фазі.

Останнім часом широке застосування в управлінні фізико-хемічними процесами в зоні контактної взаємодії тіл під час тертя та вальцювання знаходить введення в МОР хемічно активних щодо металу елементів у вигляді протизадирних і антизносних органічних присадок, які містять у молекулі активні атоми Фосфору, Сульфору та Хлору.

Більшість робіт [23–26] обмежує механізм їхньої дії до наступного: адсорбції присадок на робочих поверхнях, хемічного перетворення (як правило, розкладу) присадок за підвищених температур у місцях фактичного контакту взаємодійних поверхонь і хемічної взаємодії найбільш активних продуктів розкладу присадок з мета-

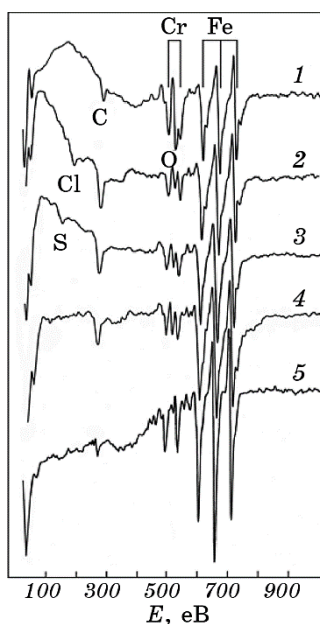


Рис. 8. Спектри Оже-електронів від меж зерен шарів тертя (1–4) і вихідного металу криці 130X17 (5) після випробувань пари тертя у середовищах: вода–повітря (1), водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря (2), водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря (3), водна емульсія концентрату МОР «Естераль»–повітря (4).

Fig. 8. The spectra of Auger electrons from the grain boundaries of the friction layers (1–4) and initial metal (5) of steel 130X17 after friction pair testings in the environments: water–air (1), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air (2), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air (3), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Естераль’–air (4).

лом робочих поверхонь. Водночас вважається, що термомеханічна деструкція молекул ПАР-емульгаторів у зонах температурних спалахів приводить до утворення достатньо великих фрагментів, які не можуть проникати в об’єм металу. Однак, як видно з рис. 8 і даних табл. 4, 5, поверхневі шари тертя насичуються великою кількістю атомів Карбону, Сульфуру та Хлору, що входять до складу водних емульсій концентратів МОР. Це свідчить про те, що в умовах даної роботи термомеханічна деструкція молекул хемічних складових МОР приводить до утворення активних поодиноких атомів Карбону, Сульфуру та Хлору, які здатні не тільки хемічно взаємодіяти з поверхнею металу, а й проникати у його об’єм.

Мікромеханічні дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу зон контактної взаємодії криць проводилися методом динамічного проникнення індентора.

ТАБЛИЦЯ 6. Середні значення фізико-механічних характеристик шарів тертя (зони А), деформованого (зони В) і недеформованого (зони С) вихідних металів криць після випробування пари тертя криця 130X17–криця 20X13 у середовищі вода–повітря.

TABLE 6. Average values of the mechanical characteristics of the friction layers (zones A), the deformed (zones B) and undeformed (zones C) original metals of steels after testing of the friction pair steel 130X17–steel 20X13 in the medium water–air.

	Криця 130X17					Криця 20X13				
	Зона С	Зона В	Шар тертя (зона А)			Зона С	Зона В	Шар тертя (зона А)		
			Початок	Сере-дина	Кі-нець			Початок	Сере-дина	Кі-нець
H_d^i , ГПа	3,5	5,5	6,5	8,4	9,3	4,3	5,9	6,9	8,5	9,8
H_d^p , ГПа	3,6	5,5	6,6	8,3	9,5	4,2	6,0	6,8	8,6	9,9
H_h , ГПа	3,2	4,7	5,5	6,5	7,2	3,7	5,1	5,6	6,9	7,5
$H_d^p - H_h$, ГПа	0,4	0,8	1,1	1,8	2,3	0,5	0,9	1,2	1,7	2,4
A_{np}/A	0,08	0,11	0,16	0,24	0,29	0,09	0,12	0,17	0,25	0,30
$A_{пл}/A$	0,92	0,89	0,84	0,76	0,71	0,91	0,88	0,83	0,75	0,70

В таблицях 6–8 наведено середні значення фізико-механічних характеристик шарів тертя (зони А), деформованого (зони В) і недеформованого (зони С) вихідних металів обох криць після випробувань пар тертя в різних середовищах. У разі застосування концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» фізико-механічні характеристики майже збігаються. Тому з метою економії розміру статті в роботі наведено лише таблицю для МОР «Сінтал-2». Збіг значень мікротвердості по величині діагоналі залишкового пластичного відтиску (H_d^p), розрахованих з діаграм динамічного проникнення індентора, з даними вимірів мікротвердості на приладі ПМТ-3 (H_d^i) підтверджує коректність мікромеханічних випробувань металу.

З даних таблиць 6–8 видно, що пластична деформація вихідного металу обох криць на етапі припрацювання пар тертя приводить до зростання величин мікротвердості H_h і H_d . Водночас також збільшується різниця між ними ($H_d - H_h$). Мікротвердість H_h значно більше відбиває внесок пружної деформації матеріялу з проникненням індентора, ніж мікротвердість H_d . Тому величина різниці ($H_d - H_h$) характеризує внесок пружної деформації в загальну пружньо-пластичну деформацію матеріялу з проникненням індентора. Таким чином, деформований під час припрацювання пар тертя метал (зони В) відрізняється від вихідного не тільки твердістю,

ТАБЛИЦЯ 7. Середні значення фізико-механічних характеристик шарів тертя (зони А), деформованого (зони В) і недеформованого (зони С) вихідних металів криць після випробування пари тертя криця 130Х17–криця 20Х13 у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Естераль»–повітря.

TABLE 7. Average values of the mechanical characteristics of the friction layers (zones A), the deformed (zones B) and undeformed (zones C) original metals of steels after testing of the friction pair steel 130X17–steel 20X13 in the medium water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Естераль’–air.

	Криця 130Х17					Криця 20Х13				
	Зо-на С	Зо-на В	Шар тертя (зона А)			Зо-на С	Зо-на В	Шар тертя (зона А)		
			Поча-ток	Середи-на	Кі-нець			Поча-ток	Середи-на	Кі-нець
H_d^i , ГПа	3,5	5,3	6,4	8,4	11,0	4,2	5,8	6,7	8,8	10,6
H_d^p , ГПа	3,5	5,2	6,3	8,4	11,1	4,2	5,8	6,6	8,7	10,6
H_h , ГПа	3,1	4,5	5,3	6,5	8,5	3,7	5,0	5,5	6,9	8,1
$H_d^p - H_h$, ГПа	0,4	0,7	1,0	1,9	2,6	0,5	0,8	1,1	1,8	2,5
$A_{пр}/A$	0,08	0,10	0,14	0,26	0,31	0,09	0,11	0,16	0,26	0,30
$A_{пл}/A$	0,92	0,90	0,86	0,74	0,69	0,91	0,89	0,84	0,74	0,70

але і пружністю. Це підтверджують наведені в таблицях співвідношення внесків роботи пружної ($A_{пр}/A$) та пластичної ($A_{пл}/A$) деформацій у загальну роботу пружно-пластичної деформації матеріалу з проникненням індентора. Слід відзначити, що застосування замість води водних емульсій концентратів МОР дещо знижує твердість і пружність деформованого на етапі припрацювання пар тертя вихідного металу обох криць (зони В). Особливо це стосується концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2».

Матеріал зносостійких шарів тертя утворюється внаслідок інтенсивної пластичної деформації мікрооб’ємів металу, що нашаровуються на поверхні контакту. Водночас наддисперсна структура шарів тертя насичується активними хемічними елементами робочого середовища. Це приводить до істотного додаткового зміцнення металу шарів тертя, які відрізняються від деформованого вихідного металу обох криць високими твердістю та пружністю. У межах кожного з шарів тертя з ростом ступеня фрагментації структури спостерігається поступове збільшення твердості та пружності матеріалу (табл. 6–8). Ділянки шарів тертя з кристалоаморфною наноструктурою містять максимальну кількість атомів активних хемічних елементів робочого середовища та відрізняються максимальними твердістю й пружністю. Із введенням у воду концентратів

ТАБЛИЦЯ 8. Середні значення фізико-механічних характеристик шарів тертя (зони А), деформованого (зони В) і недеформованого (зони С) вихідних металів криць після випробування пари тертя криця 130X17–криця 20X13 у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря.

TABLE 8. Average values of the mechanical characteristics of the friction layers (zones A), the deformed (zones B) and undeformed (zones C) original metals of steels after testing of the friction pair steel 130X17–steel 20X13 in the medium water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air.

	Криця 130X17					Криця 20X13				
	Зо-на С	Зо-на В	Шар тертя (зона А)			Зо-на С	Зо-на В	Шар тертя (зона А)		
			Поча-ток	Середи-на	Кі-нець			Поча-ток	Середи-на	Кі-нець
H_d^i , ГПа	3,5	5,0	6,1	8,6	12,9	4,2	5,6	6,4	8,9	11,8
H_d^p , ГПа	3,5	5,1	6,1	8,5	13,0	4,2	5,7	6,5	9,0	11,7
H_h , ГПа	3,1	4,4	5,2	6,6	9,9	3,7	4,8	5,4	7,0	9,0
$H_d^p - H_h$, ГПа	0,4	0,7	0,9	1,9	3,1	0,5	0,9	1,1	2,0	2,7
A_{np}/A	0,08	0,10	0,13	0,25	0,33	0,09	0,12	0,15	0,27	0,31
$A_{пл}/A$	0,92	0,90	0,87	0,75	0,67	0,91	0,88	0,85	0,73	0,69

МОР зростають максимальні значення твердості та пружності найбільш фрагментованих ділянок шарів тертя, але їхні середні значення в об’ємі окремих шарів тертя змінюються неістотно.

Шари тертя, що формуються на робочих поверхнях із введенням у воду концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2», мають схожі твердість і пружність. Але, на відміну від МОР «Сінтал-2», використання МОР «Аквол-15П» викликає на окремих ділянках поверхні тертя крихке руйнування зносостійких самоорганізованих покриттів під час динамічного проникнення індентора. Під час мікромеханічних випробувань матеріялу шарів тертя, що формуються у водно-повітряному середовищі й із застосуванням концентрату МОР «Естераль», крихке руйнування зносостійких самоорганізованих покриттів не відбувається. Це добре видно з діаграм проникнення індентора, представлених на рис. 9. Введення у воду концентрату МОР «Аквол-15П» приводить до появи на діаграмі проникнення індентора в самоорганізовані зносостійкі покриття горизонтальної ділянки, яка відповідає руйнуванню цих покриттів і подальшому зсуву їхніх фрагментів в об’єм деформованого вихідного металу. Представлена на рисунку 10 фотографія торцевого шліфа ділянки крихкого руйнування зносостійких самоорганізованих покриттів підтверджує це.

Раніше відзначалося, що концентрат МОР «Аквол-15П» містить

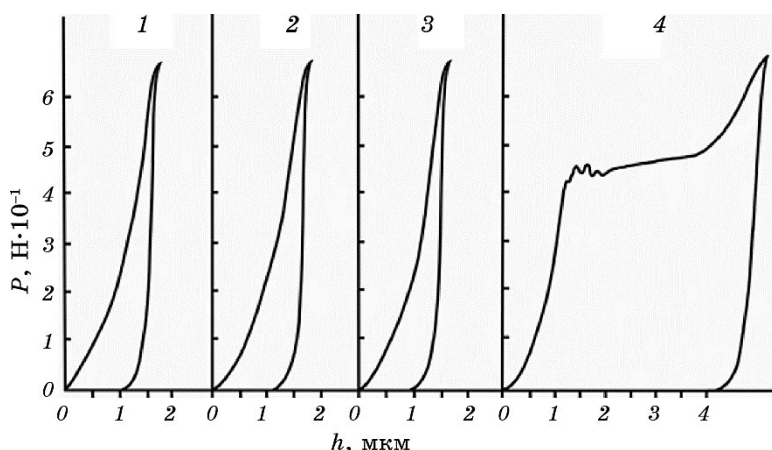


Рис. 9. Діаграми динамічного проникнення індентора в зносостійкі самоорганізовані покриття криці 130X17: P — навантаження на індентор, h — взаємне зближення індентора та зразка. Випробування на тертя проходили у середовищах: вода–повітря (1), водна емульсія концентрату МОР «Естераль»–повітря (2), водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря (3), водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря (4).

Fig. 9. Diagrams of dynamic penetration of the indenter into wear-resistant self-organizing coatings on steel 130X17: P is load on the indenter, h is mutual close in of the indenter and the sample. Friction testings were carried out in the following environments: water–air (1), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Естераль’–air (2), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air (3), water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air (4).

в якості протизадірної та протизносної органічної присадки дітіо-біс-н-бутілксантогенат із вмістом Сульфуру у 40%. Термомеханічна деструкція цієї присадки у плямах контакту поверхонь тертя приводить до появи активних атомів Сульфуру, які проникають у шари тертя й утворюють на окремих ділянках дрібнодисперсні включення сульфідів Феруму (FeS). Вони розташовуються в примежових областях зерен у вигляді окремих ланцюжків і можуть бути концентраторами напружень, впливаючи на процес зародження та втрати стійкості зародкових тріщин. Можна припустити, що саме це є причиною крихкості шарів тертя із введенням у воду концентрату МОР «Аквол-15П».

У концентраті МОР «Сінтал-2» в якості протизадірної та протизносної органічної присадки використовується хлорпарафін ХП-470 із вмістом Хлору у 50%. Однак його застосування не приводить до утворення в шарах тертя будь-яких хемічних сполук атомів Хлору. Тому введення у воду концентрату МОР «Сінтал-2» не робить самоорганізовані зносостійкі покриття більш крихкими.

Аналіза морфології поверхонь тертя після роботи контактної па-

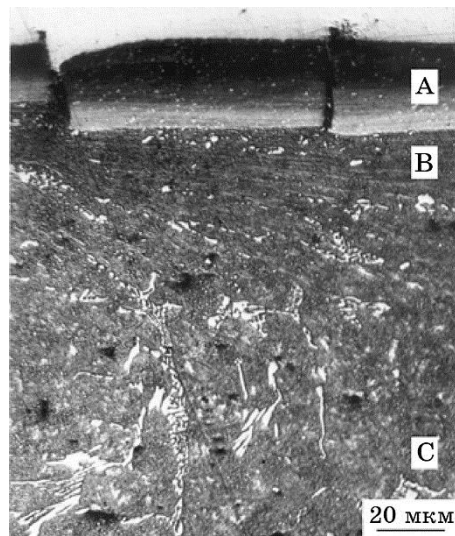


Рис. 10. Структура зони контактної взаємодії криці 130X17 після випробувань пари тертя у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря. Торцевий шліф, А — зносостійкі самоорганізовані покриття, В — деформований вихідний метал, С — недеформований вихідний метал.

Fig. 10. The structure of the contact-interaction zone of steel 130X17 after testing of the friction pair in the environment water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air. Cross-section, A is wear-resistant self-organizing coatings, B is deformed initial metal, C is undeformed initial metal.

ри в різних середовищах також свідчить про те, що введення у воду концентрату МОР «Аквол-15П» понижує стійкість самоорганізованих зносостійких покриттів до руйнування в умовах циклічних термомеханічних ударних навантажень. Фотографію ділянки поверхні тертя, де відбувається таке руйнування, наведено на рис. 11. Аналіза морфології робочих поверхонь свідчить про те, що максимальна кількість таких ділянок зустрічається у парі тертя після роботи з водними емульсіями концентрату МОР «Аквол-15П».

Наведені вище дані уможливають описати механізм впливу органічних МОР з антизносними та протизадирними присадками, що містять активні хемічні елементи, на процес самоорганізації на поверхнях тертя зносостійких покриттів. Пояснити їхній вплив на фізико-механічні властивості цих покриттів, коефіцієнт тертя та знос тіл під час роботи вузлів тертя.

Характер розподілу залишкової пластичної деформації в зоні контактної взаємодії кожного з тіл пари тертя (рис. 3) свідчить про те, що в умовах даної роботи фізико-механічні властивості обох криць неспроможні забезпечити під час припрацювання пари тертя пруж-

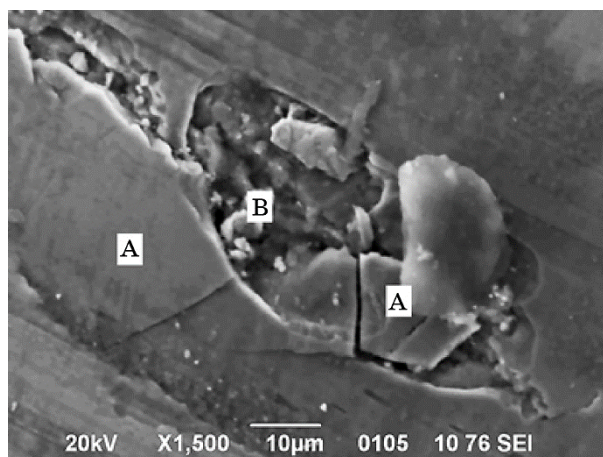


Рис. 11. Структура поверхні тертя робочої пари криця 130X17–криця 20X13 після випробувань у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Аквол-15П»–повітря, А — зносостійкі самоорганізовані покриття, В — деформований вихідний метал.

Fig. 11. The structure of the friction surface at the working pair of steel 130X17– steel 20X13. Friction testings took place in the environment water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Аквол-15П’–air, A is wear-resistant self-organizing coatings, and B is deformed initial metal.

жній контакт взаємодійних поверхонь. Інтенсивна пластична деформація тіл на початковому етапі тертя викликає руйнування поверхневих плівок оксидів Fe_2O_3 , адсорбованих молекул вуглеводнів МОР і хемічних сполук Сульфуру та Хлору, які з’являються в плямах контакту поверхонь тертя внаслідок термомеханічної деструкції молекул присадок. Утворення внаслідок цього на поверхнях тертя криць безпосереднього контакту їхніх ювенільних поверхонь викликає появу сильних адгезійних зв’язків. Це приводить до нашарування на поверхні тертя мікрооб’ємів металу, прилеглих до плям контакту, або викликає локальне руйнування металу та його перенесення між тілами з подальшим багаторазовим прокатуванням між колодкою та диском. Внаслідок цього утворюються шари тертя, з яких складаються самоорганізовані зносостійкі покриття.

Раніше було показано, що геометричні розміри шарів тертя істотно залежать від вибору робочого середовища. Введення у воду концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» збільшує їхню середню товщину у 6 і 7 разів відповідно; введення у воду концентрату МОР «Естераль» — у 3 рази. Оскільки самоорганізовані зносостійкі покриття складаються з шарів тертя [8, 9, 17, 18], кожен з яких є результатом окремого акту нашарування металу на робочу поверхню тіл, можна зробити висновок, що введення у воду концентратів МОР пластифі-

кує метал взаємодійних під час тертя мікровиступів. Тому на поверхні контакту нашаровуються більші об'єми металу, що приводить до збільшення середньої товщини поверхневих шарів тертя.

У роботах [8, 9 і 18] було показано, що у випадку тертя контактної пари у водно-повітряному середовищі під час нашарування на поверхні тертя мікрооб'ємів металу спостерігається накопичення в примежових областях зерен метастабільних атомових кластерів Fe–O–C і ультрадисперсної оксидної фази α -Fe₂O₃. Метастабільні атомові кластери Fe–O–C являють собою октапору, в центрі якої знаходиться Оксиген, а два атоми Феруму у вершинах заміщено атомами Карбону. Ці кластери та навколишні атоми металу розділяють області з пониженою електронною густиною. Наслідком цього є обмежена участь валентних електронів у формуванні зв'язків між атомами кластерів і атомами металу, що оточують їх, і відносно легке їхнє руйнування із зсувом зерен вздовж меж. Легкому зсуву зерен вздовж меж також сприяє нестійкість до зовнішніх деформацій міжатомових зв'язків, сформованих валентними *3d*-електронами атомів Феруму кластерів. Це дестабілізує структуру меж зерен і може сприяти виникненню в мікрооб'ємах металу під час нашарування на поверхні тертя динамічних систем, які пластифікують метал.

У разі роботи пари тертя у водно-повітряному середовищі насичення Карбоном примежових областей ультрадисперсних систем, що нашаровуються на поверхні тертя, відбувається виключно внаслідок розчинення дрібнодисперсної карбідної фази. Водночас кількість атомів Карбону в поверхневих шарах тертя втричі менша за кількість атомів Оксигену (табл. 4), які проникають у метал з робочого середовища. Це перешкоджає утворенню в примежових областях зерен значної кількості метастабільних атомових кластерів Fe–O–C, що пластифікують метал. Тому за взаємодії мікрровиступів у водно-повітряному середовищі на поверхні тертя нашаровуються невеликі об'єми металу, що робить шари тертя тонкими (рис. 3 і 4), а час припрацювання робочої пари більш тривалим (рис. 2).

Але, якщо у воду додати концентрати водорозчинних органічних МОР, активними хемічними елементами робочого середовища стають, окрім атомів Оксигену, також атоми Карбону, Сульфур та Хлору. В цьому випадку насичення Карбоном примежових областей металу, що нашаровується на поверхні тертя, відбувається не тільки внаслідок розчинення карбідної фази, але й шляхом проникнення атомів Карбону в об'єм металу з робочого середовища. З даних таблиці 5 видно, що введення у воду концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» робить співвідношення кількостей атомів Карбону й Оксигену у шарах тертя оптимальним для формування на межах зерен максимальної кількості метастабільних атомових кластерів Fe–O–C, здатних робити метал більш пластичним. Введення у

воду концентрату МОР «Естераль» також сприяє цьому, але менш ефективно (табл. 4). Ці дані дуже добре корелюють з величинами середньої товщини поверхневих шарів тертя, що формуються в різних середовищах. Тому можна припустити, що зміна хемічного складу деформованого на поверхнях тертя металу внаслідок введення у воду концентратів МОР може бути однією з причин пластифікації металу в плямах контакту тіл і збільшення величини мікрооб'ємів металу, з яких формуються шари тертя під час акту нашарування металу на робочі поверхні тіл.

Слід відзначити, що до складу МОР входять ПАР, які здатні змінити поверхневу енергію металу в плямах контакту поверхонь тертя. Це також може привести до пластифікації поверхневих шарів металу та зростання величини мікрооб'ємів металу, з яких формуються шари тертя, що збільшить їхню товщину. Але визначити як саме МОР змінюють поверхневу енергію мікрооб'ємів металу, що нашаровуються на поверхні тертя, в умовах даної роботи не можливо. Тому оцінити ступінь впливу ПАР на середню товщину шарів тертя за застосування різних МОР дуже важко.

Таким чином, зміна МОР хемічного складу й енергії поверхонь тертя приводить до нашарування на робочі поверхні більш великих об'ємів металу, що збільшує середню товщину поверхневих шарів тертя та скорочує час, потрібний для самоорганізації на поверхнях тертя зносостійких покриттів у кількості, достатній для повного екранування під час роботи деформованого вихідного металу та переходу пар тертя у стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя (рис. 2).

Під час припрацювання пар тертя інтенсивна пластична деформація тіл викликає руйнування поверхневих плівок оксидів Fe_2O_3 , адсорбованих молекул вуглеводнів МОР і хемічних сполук продуктів розкладу протизадирних і антизносних присадок. Внаслідок цього виникає безпосередній контакт металевих поверхонь обох тіл. Твердість за Роквеллом термічно оброблених вихідних металів криць 130X17 і 20X13 дорівнює 36,9 і 40,7 *HRC* відповідно. Також з даних таблиць 6–8 видно, що у криці 20X13 деформований під час припрацювання метал більш твердий і пружний, аніж у криці 130X17. Тому на етапі припрацювання пари тертя спостерігається переважний масоперенос криці 130X17 на поверхню криці 20X13. А самоорганізовані зносостійкі покриття обох криць утворюються переважно з матеріалу криці 130X17. Знос тіл під час тертя відбувається внаслідок викришування окремих ділянок самоорганізованих зносостійких покриттів через утворення втомних тріщин. Після цього на цих ділянках можуть знову формуватися нові покриття. Тому на початковому етапі тертя введення у воду концентратів МОР істотно не впливає на коефіцієнт тертя та знос тіл (рис. 2, табл. 2), а знос криці 130X17 для будь-якого середовища значно сильні-

ший, ніж криці 20X13.

Шари тертя відрізняються високими твердістю та пружністю в порівнянні з деформованим вихідним металом (табл. 6–8). Тому утворені ними самоорганізовані зносостійкі покриття локалізують процеси пластичної деформації у тонкому поверхневому шарі. Вони є більш твердою та пружною (в порівнянні з вихідним металом обох криць) підкладкою для розташованих на поверхнях тертя плівок адсорбованих молекул вуглеводнів МОР і хемічних сполук продуктів розкладу протизадирних і антизносних присадок. Завдяки цьому самоорганізація на поверхнях тертя зносостійких покриттів сприяє ефективній дії МОР. З даних рис. 2 і табл. 2 видно, що в сталому режимі роботи МОР істотно зменшують знос обох тіл і коефіцієнт тертя.

Концентрат МОР «Естераль» не містить у своєму складі протизадирних і антизносних присадок. В цьому випадку поверхні тертя екрануються переважно завдяки адсорбованим молекулам вуглеводнів. Це зменшує адгезійну взаємодію між тілами, що труться, але не може усунути її. Тому із введенням у воду концентрату МОР «Естераль» переважний масоперенос криці 130X17 на поверхню криці 20X13 зменшується, але все ж залишається істотним. А самоорганізовані зносостійкі покриття обох криць, як і раніше, утворюються переважно з матеріалу криці 130X17 (табл. 3 і 4). Через це в цьому випадку у сталому режимі роботи ваговий знос криці 130X17 в 1,5 рази перевищує ваговий знос криці 20X13. Водночас нерівномірне зношування тіл, що утворюють вузол тертя, понижує ресурс його роботи.

До складу концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» входять протизадирні й антизносні органічні присадки, що містять у молекулі активні атоми Сульфуру та Хлору. Введення їх у воду приводить до адсорбції присадок на поверхнях тертя, розкладу присадок за підвищених температур у місцях фактичного контакту взаємодійних поверхонь і хемічній взаємодії найбільш активних продуктів розкладу присадок з поверхнями тертя [23]. Водночас відбувається хемічне модифікування поверхонь тертя, в результаті якого на ділянках контакту тіл, що труться, формуються шари хемічних сполук продуктів розкладу присадок з металом поверхонь. Ці хемічні сполуки екранують металеві поверхні в місцях контакту мікроступів, що перешкоджає адгезійній взаємодії тіл. Фотографію торцевого шліфа зони контактної взаємодії криці 130X17 після випробувань пари тертя з МОР «Сінтал-2» наведено на рис. 12. Зображення одержано за допомогою сканувальної електронної мікроскопії в режимі електронів, що поглинаються. Світлий шар (зона D), що лежить на поверхні тертя, відповідає хемічним сполукам атомів Хлору й Оксигену з атомами криці. Його товщина змінюється вздовж поверхні тертя та може сягати 6 мкм. Видно, що цей шар екранує самоорганізовані зносостійкі покриття (зона А) і деформований ви-



Рис. 12. Структура зони контактної взаємодії криці 130X17 після випробувань пари тертя у середовищі водна емульсія концентрату МОР «Сінтал-2»–повітря. Торцевий шліф, А — самоорганізовані зносостійкі покриття, В — деформований вихідний метал, D — хемічні сполуки продуктів розкладу МОР з металом поверхонь, що труться.

Fig. 12. The structure of the contact-interaction zone of steel 130X17 after testings of the friction pair in the environment water emulsion of cutting-fluid concentrate ‘Сінтал-2’–air. Cross-section, A is wear-resistant self-organizing coatings, B is deformed initial metal, and D is chemical compounds of decomposition products of lubricating-cooling liquid with the metal of rubbing surfaces.

хідний метал криці (зона В), перешкоджаючи контакту ювенільних металевих поверхонь тіл і адгезійній взаємодії між ними. Для фільтрування було обрано ділянку поверхні тертя з втомною тріщиною, що проходить крізь самоорганізоване зносостійке покриття (зона А). Через утворення таких тріщин окремі ділянки покриття руйнуються, після чого на цьому місці формуються нові покриття.

У випадку введення у воду концентрату МОР «Аквол-15П» структура зони контактної взаємодії криці 130X17 не відрізняється від описаної вище (рис. 12), але світлий шар (зона D), що лежить на поверхні тертя, відповідає хемічним сполукам атомів Сульфуру й Оксигену з атомами криці.

Пониження протизадирними й антизносними органічними присадками МОР адгезійної взаємодії в місцях контакту мікровиступів зменшує амплітуду циклічних навантажень на самоорганізовані зносостійкі покриття та перешкоджає масопереносу металу між тілами, що труться. Завдяки цьому відбувається істотне зменшення величин зносу та коефіцієнта тертя (рис. 2, табл. 2). Водночас самоорганізовані зносостійкі покриття кожного з тіл робочої пари формуються переважно з матеріялу даного тіла (табл. 5), що робить їх-

ній знос більш рівномірним (табл. 2).

Характер впливу МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» на структурно-фазові перетворення металу в зонах контактної взаємодії криць майже однаковий, але застосування МОР «Аквол-15П» знижує стійкість самоорганізованих зносостійких покриттів до руйнування в умовах циклічних термомеханічних навантажень. Це збільшує знос криць і робить застосування їх менш ефективним.

4. ВИСНОВКИ

Незалежно від вибору мастильно-охолодної рідини (МОР) перехід пари тертя криця 130X17 (колодка)–криця 20X13 (диск) в стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя відбувається завдяки самоорганізації на поверхнях контакту обох тіл зносостійких наддрібнодисперсних покриттів у кількості, достатній для повного екранування під час роботи деформованого вихідного металу. Ці покриття утворено з якісно нового ультрадисперсного та наноструктурованого матеріалу, який може містити до 25 ат. % активних хемічних елементів робочого середовища.

Самоорганізовані зносостійкі покриття складаються з шарів тертя, кожен з яких є результатом окремого акту нашарування мікрорівнів металу на робочу поверхню тіл в результаті їхньої адгезійної взаємодії. Виникнення на окремих ділянках робочих поверхонь сильних адгезійних зв'язків може призводити до локального руйнування металу та його перенесення між тілами, які утворюють вузол тертя. Тому мікрооб'єми металу, нашарування яких на поверхні контакту приводить до утворення зносостійких шарів тертя, можуть формуватися з матеріалу різних тіл. А самоорганізовані зносостійкі покриття будуть складатися з окремих шарів тертя, сформованих з металу різних криць.

Шари тертя відрізняються високими твердістю та пружністю в порівнянні з деформованим вихідним металом. Тому утворені ними самоорганізовані зносостійкі покриття локалізують процеси пластичної деформації у тонкому поверхневому шарі. Вони є більш твердою і пружною (в порівнянні з вихідним металом обох криць) підкладкою для розташованих на поверхнях тертя плівок адсорбованих молекул вуглеводнів МОР, оксидів і хемічних сполук продуктів розкладу протизадирних і антизносних присадок. Тому ефективною дія МОР стає лише після самоорганізації на поверхнях тертя зносостійких покриттів.

Зміна мастильно-охолодними рідинами хемічного складу й енергії поверхонь тертя приводить до нашарування на робочі поверхні більших об'ємів металу, що збільшує середню товщину поверхневих шарів тертя та скорочує час, потрібний для самоорганізації на поверхнях тертя зносостійких покриттів у кількості, достатній для

повного екранування під час роботи деформованого вихідного металу та переходу пар тертя у стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя. Введення у воду концентратів МОР «Сінтал-2» і «Аквол-15П» збільшує середню товщину шарів тертя у 7 і 6 разів відповідно; введення у воду концентрату МОР «Естераль» — у 3 рази. Також у разі застосування МОР «Сінтал-2», «Аквол-15П» і «Естераль» скорочується час припрацювання пари тертя у 1,8, 1,7 і 1,4 рази відповідно.

Концентрат МОР «Естераль» не містить у своєму складі протизадирних і антизносних присадок. В цьому випадку поверхні тертя екрануються переважно завдяки адсорбованим молекулам вуглеводнів і тонкій плівці оксидів. Це зменшує адгезійну взаємодію між тілами, що труться, але не може істотно усунути її. Тому введення у воду концентрату МОР «Естераль» не усуває під час роботи пари тертя переважний масоперенос криці 130X17 на поверхню криці 20X13. А самоорганізовані зносостійкі покриття обох криць, як і раніше, утворюються переважно з матеріялу криці 130X17. Через це в цьому випадку у сталому режимі роботи ваговий знос криці 130X17 в 1,5 рази перевищує ваговий знос криці 20X13, що знижує ресурс роботи вузла тертя.

Введення у воду концентратів МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» з протизадирними й антизносними присадками, що містять активні атоми Сульфуру та Хлору, хемічно модифікує поверхні тертя. В цьому випадку на ділянках контакту тіл, що труться, додатково формуються шари хемічних сполук продуктів розкладу присадок з металом поверхонь. Пониження протизадирними й антизносними органічними присадками МОР адгезійної взаємодії поверхонь в місцях контакту мікровиступів зменшує амплітуду циклічних навантажень на самоорганізовані зносостійкі покриття та перешкоджає масопереносу металу між тілами, що труться. Завдяки цьому МОР «Аквол-15П» і «Сінтал-2» підвищують зносостійкість пари тертя в 4 і 5 разів відповідно. А коефіцієнт тертя зменшується приблизно у 2 рази. Водночас самоорганізовані зносостійкі покриття кожного з тіл робочої пари формуються переважно з матеріялу даного тіла, що робить їхній знос більш рівномірним.

Насичення поверхневих шарів тертя атомами Сульфуру за застосування МОР «Аквол-15П» викликає появу на окремих ділянках меж зерен дрібнодисперсних включень сульфідів Феруму (FeS). Це знижує стійкість самоорганізованих зносостійких покриттів до руйнування в умовах циклічних термомеханічних навантажень, що збільшує знос криць і робить застосування даної МОР менш ефективним.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Т. С. Скобло, Н. М. Можарова, *Литейное производство*, **4**, № 1: 2 (2008).
2. Ю. С. Бобро, М. Ф. Баранов, О. И. Коваленко, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **4**, № 1: 112 (1975).
3. В. А. Игнатов, В. К. Соленый, В. Л. Жук, А. И. Туяхов, *Металл и литье Украины*, **10**, № 11: 31 (2001).
4. В. П. Гаврилюк, В. И. Тихонович, И. А. Шалевская, Ю. И. Гутько, *Абразивостойкие высокохромистые чугуны* (Луганск: Ноулидж: 2010).
5. Е. В. Рожкова, В. В. Румянцев, О. М. Романов, А. В. Трещалин, *Металлургия машиностроения*, **1**, № 4: 19 (2002).
6. Б. А. Кириевский, Л. Г. Смолякова, Т. К. Изюмова, *Литые износостойкие материалы* (Киев: ИПЛ АН УССР: 1978), с. 45.
7. В. В. Тихонович, О. М. Грипачевський, В. Г. Новицький, *Металофіз. новітні технол.*, **43**, № 7: 853 (2021).
8. В. В. Тихонович, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 12: 1595 (2022).
9. В. В. Тихонович, *Металофіз. новітні технол.*, **45**, № 1: 15 (2023).
10. В. И. Тихонович, *Повышение износостойкости литых материалов* (Киев: ИПЛ АН УССР: 1983), с. 3.
11. Н. С. Цикунов, В. А. Батырев, А. Н. Грипачевский, В. В. Тихонович, *Пакет программ для обработки результатов количественного рентгеноспектрального микроанализа методом ZAF на мини-ЭВМ* (Киев: 1981) (Препринт Института металлофизики АН УССР, 1981).
12. В. В. Немошкаленко, В. В. Горский, В. В. Тихонович, И. А. Якубцов, *Металлофизика*, **6**, № 6: 93 (1984).
13. Д. Бриггс, М. П. Сих, *Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии* (Москва: Мир: 1987) (пер. з англ.).
14. С. И. Булычев, В. П. Алехин, А. П. Терновский, *ФиХОМ*, **2**: 58 (1976).
15. М. Х. Шоршоров, С. И. Булычев, В. П. Алехин, *Методические рекомендации по исследованию физико-механических свойств материалов непрерывным вдавливанием наконечника* (Москва: ИМет АН СССР: 1980).
16. В. А. Галанов, О. Н. Григорьев, Ю. В. Мильман, *Проблемы прочности*, **11**: 93 (1983).
17. В. В. Тихонович, *Металлофіз. новейшие технол.*, **33**, № 12: 1671 (2011).
18. В. В. Тихонович, В. Н. Уваров, *Успехи физ. мет.*, **12**, № 2: 209 (2011).
19. Л. М. Утевский, *Дифракционная электронная микроскопия в металлургии* (Москва: Металлургия: 1973).
20. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков, *Рентгенографический и электроннооптический анализ* (Москва: Металлургия: 1970).
21. В. В. Немошкаленко, В. В. Тихонович, В. В. Горский, Л. М. Шелудченко, А. И. Ковалев, *Металлофизика*, **15**, № 4: 45 (1993).
22. В. В. Тихонович, *Металофіз. новітні технол.*, **43**, № 1: 59 (2021).
23. Ю. М. Виноградов, *Трение и износ модифицированных металлов* (Москва: Наука: 1972).
24. А. А. Гуреев, П. П. Заскалько, И. Э. Виноградова, Н. М. Муминджанов, В. Х. Корсунский, *Химия и технология топлив и масел*, № 7: 61 (1980).
25. Р. М. Маивиевский, Д. К. Шульце, И. А. Буняковский, *Исследование смазочных материалов при трении. О связи между термической стабильностью химически активных присадок к смазочным маслам и их триботехническими свойствами при трении* (Москва: Наука: 1981).
26. Л. М. Роев, Л. М. Артюховская, В. Я. Скляр, Л. А. Редько, Р. А. Свищук,

Украинский химический журнал, **44**, № 12: 1290 (1978).

REFERENCES

1. T. S. Skoblo and N. M. Mozharova, *Liteynoe Proizvodstvo*, **4**, No. 1: 2 (2008) (in Russian).
2. Yu. S. Bobro, M. F. Baranov, and O. I. Kovalenko, *Physicochemical Mechanics of Materials*, **4**, No. 1: 112 (1975) (in Russian).
3. V. A. Ignatov, V. K. Solenyy, V. L. Zhuk, and A. I. Tuyakhov, *Metall i Lit'yo Ukrainy*, **10**, No. 11: 31 (2001) (in Russian).
4. V. P. Gavrilyuk, V. I. Tikhonovich, I. A. Shalevskaya, and Yu. I. Gut'ko, *Abrazivostoykie Vysokokhromistyye Chuguny* [Abrasion-Resistant High-Chromium Cast Irons] (Lugansk: Noulidzh: 2010) (in Russian).
5. E. V. Rozhkova, V. V. Rumyantsev, O. M. Romanov, and A. V. Treshchalin, *Metallurgiya Mashinostroeniya*, **1**, No. 4: 19 (2002) (in Russian).
6. B. A. Kirievskiy, L. G. Smolyakova, and T. K. Izyumova, *Lityye Iznosostoykie Materialy* [Molded Wear-Resistant Materials] (Kiev: IPL AN UkrSSR: 1978), p. 45 (in Russian).
7. V. V. Tykhonovych, O. M. Grypachevs'kyy, and V. G. Novyts'kyy, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 7: 853 (2021) (in Ukrainian).
8. V. V. Tykhonovych, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 12: 1595 (2022) (in Ukrainian).
9. V. V. Tykhonovych, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 1: 15 (2023) (in Ukrainian).
10. V. I. Tikhonovich, *Povyshenie Iznosostoykosti Litykh Materialov* [Improving the Wear Resistance of Cast Materials] (Kiev: IPL AN UkrSSR: 1983), p. 3 (in Russian).
11. N. S. Tsikunov, V. A. Batyrev, A. N. Gripachevskiy, and V. V. Tikhonovich, *Paket Programm dlya Obrabotki Rezul'tatov Kolichestvennogo Rentgenospektral'nogo Mikroanaliza Metodom ZAF na Mini-EVM* [Software for Processing the Results of Quantitative X-Ray Spectral Microanalysis Using the ZAF Method on a Minicomputer] (Kiev: 1981) (Prepr./A.S. of UkrSSR. Inst. for Metal Physics, 1981) (in Russian).
12. V. V. Nemoshkalenko, V. V. Gorskiy, V. V. Tikhonovich, and I. A. Yakubtsov, *Metallofizika*, **6**, No. 6: 93 (1984) (in Russian).
13. *Analiz Poverkhnosti Metodami Ozhe- i Rentgenovskoy Fotoelektronnoy Spektroskopii* [Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy] (Eds. D. Briggs and M. P. Seah) (Moskva: Mir: 1987) (Russian translation).
14. S. I. Bulychev, V. P. Alekhin, and A. P. Ternovskiy, *FiKhOM*, **2**: 58 (1976) (in Russian).
15. M. Kh. Shorshorov, S. I. Bulychev, and V. P. Alekhin, *Metodicheskie Rekomendatsii po Issledovaniyu Fiziko-Mekhanicheskikh Svoystv Materialov Nepreryvnym Vdavlivaniem Nakonechnika* [Methodological Recommendations for Studying the Physical and Mechanical Properties of Materials by Continuous Indentation of the indenter] (Moskva: IMet AN SSSR: 1980) (in Russian).
16. V. A. Galanov, O. N. Grigor'ev, and Yu. V. Mil'man, *Problemy Prochnosti*, **11**: 93 (1983) (in Russian).
17. V. V. Tikhonovich, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 12: 1671 (2011) (in

- Russian).
18. V. V. Tikhonovich and V. N. Uvarov, *Usp. Fiz. Met.*, **12**, No. 2: 209 (2011) (in Russian).
 19. L. M. Utevskiy, *Difraktsionnaya Ehlektronnaya Mikroskopiya v Metallovedenii* [Diffraction Electron Microscopy in Metal Science] (Moskva: Metallurgiya: 1973) (in Russian).
 20. S. S. Gorelik, L. N. Rastorguev, and Yu. A. Skakov, *Rentgenograficheskiy i Ehlektronnoopticheskiy Analiz* [X-Ray and Electrooptical Analysis] (Moskva: Metallurgiya: 1970) (in Russian).
 21. V. V. Nemoshkalenko, V. V. Tikhonovich, V. V. Gorskiy, L. M. Sheludchenko, and A. I. Kovalev, *Metallofizika*, **15**, No. 4: 45 (1993) (in Russian).
 22. V. V. Tykhonovych, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 1: 59 (2021) (in Ukrainian).
 23. Yu. M. Vinogradov, *Trenie i Iznos Modifitsirovannykh Metallov* [Friction and Wear of Modified Metals] (Moskva: Nauka: 1972) (in Russian).
 24. A. A. Gureev, P. P. Zaskal'ko, I. E. Vinogradova, N. M. Mumindzhanov, and V. Kh. Korsunskiy, *Khimiya i Tekhnologiya Topliv i Masel*, No. 7: 61 (1980) (in Russian).
 25. R. M. Maivievskiy, D. K. Shul'tse, and I. A. Bunyakovskiy, *Issledovanie Smazochnykh Materialov pri Trenii. O Svyazi Mezhdue Termicheskoy Stabil'nost'yu Khimicheskimi Aktivnykh Prisdok k Smazochnym Maslam i Ikh Tribotekhnicheskimi Svoystvami pri Trenii* [Study of Lubricants during Friction. On the Relationship between the Thermal Stability of Chemically Active Additives for Lubricating Oils and their Tribological Properties during Friction] (Moskva: Nauka: 1981) (in Russian).
 26. L. M. Roev, L. M. Artyukhovskaya, V. Ya. Sklyar, L. A. Red'ko, and R. A. Svishchuk, *Ukrainskiy Khimicheskii Zhurnal*, **44**, No. 12: 1290 (1978) (in Russian).