

Особливості формування поверхневого шару сталі в умовах сухого тертя ковзанням

Квасницька Ю. Г., доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу, jul.kvasnitskaja@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>

Григоренко С. Г.*, кандидат технічних наук, завідувач відділу, hryhorenko@paton.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0625-7010>

Шипицин С. Я., доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, chevrtkonata@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6406-5345>

Новицький В. Г., кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, viktornovytskyi@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1496-443X>

Кир'якова Н. В., головний технолог, nat.vas.kir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8220-1209>

Олексенко І. В., науковий співробітник, svs@ptima.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7316-9998>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

Завданням сучасного трибоматеріалознавства є створення матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками, достатніми для роботи в умовах зношування з підвищеним ресурсом надійності і довговічності. Розроблено заевтектоїдну зносостійку сталь мікролеговану ванадієм і азотом та додатково леговану міддю. Зразки дослідної сталі пройшли випробування на машині тертя моделі M22M в умовах сухого тертя ковзанням для визначення зносостійкості. Результати випробувань показали, що інтенсивність зношування для дослідної сталі дорівнює – 0,20 г/км, цей показник на третину нижчий в порівнянні з базовою нелегованою заевтектоїдною сталлю. Отримані результати пояснюються тим, що мікродобавки ванадію та азоту, за рахунок дисперсійного нітридованадієвого зміцнення підвищують зносостійкість сталі в умовах сухого тертя ковзанням, а також підвищений вміст вуглецю та міді в поверхневому шарі зразка сталі відіграють роль твердого мастильного матеріалу, забезпечуючи змащувальний ефект, додатково підвищуючи зносостійкість. Тонкий поверхневий шар зразків сталі після тертя на машині тертя досліджено на Оже рентгеноспектральному мікроаналізаторі на глибину 200 нм. Проведено зйомку Оже спектрограм і побудовано профіль по глибині після іонного травлення іонами аргону зразків дослідної сталі до тертя та після тертя. Проведено порівняльний аналіз, встановлено, що на поверхні зразка після тертя мідиста фаза досягає максимальних значень в 5-7 разів вищих (10-15 ат. %) ніж до тертя, цей прошарок має розмір 8 нм і формується за рахунок дифузійної рухливості міді на поверхню зразка під час процесів зношування.

Також на поверхні зразка після тертя підвищений вміст вуглецю в 2,5 рази, ніж до тертя, за рахунок дифузійної рухливості вуглецю по шару тертя, механізму виокремлення вуглецю в формі графіту, а також дифузійному переміщенню вуглецю з матриці за сприяння локальних надвисоких температур в зоні тертя. Тож мікролегування дослідної заєвтектоїдної сталі азотом і ванадієм та додаткове легування міддю призводить до зменшення зношування пари тертя, збільшення довговічності і надійності пари тертя.

Ключові слова: *сталь, хімічний склад, вуглець, мідь, поверхневий шар, тертя, спектр.*

Зміни властивостей матеріалу поверхневих шарів під час тертя, концентрація хімічних компонентів, наряду з іншими аспектами, що впливають на довговічність поверхонь тертя, залишаються актуальним об'єктом вивчення в сучасній трибології. При вивченні процесів зношування проводяться дослідження структурної модифікації матеріалу поверхневого шару. Проблемою дослідження поверхневих шарів є малі розміри об'єкта дослідження, товщина змінених тертям поверхневих шарів часто менша за мікромметр. Оже рентгеноструктурний аналіз матеріалів після тертя, дозволяє вивчити процеси зношування, зміни структури тонких поверхневих шарів на мікрорівні, цей метод був використаний в даних дослідженнях.

Для підвищення надійності і довговічності вузлів тертя застосовують досконалі композиції мастильних матеріалів з додаванням графіту та міді, які в зоні контакту розподіляються тонкою плівкою. Замість таких композицій мастильних матеріалів перспективним є використання графіту та міді, які містяться безпосередньо в матриці сплавів у вигляді м'яких вкраплень. Відомі дослідження зношування сплавів з різною формою графіту і структурою основи сплаву в умовах сухого тертя ковзанням. Інтенсивність зношування сплавів залежить від форми, кількості та розташування графіту [1]. Дослідження впливу міді на структуру сплавів, показало, що легування міддю сприяє формуванню перлітної складової в структурі, але в великій кількості (>15 %), має антиграфітизуючий ефект. Особлива увага приділяється спільному впливу графіту та міді на зносостійкість сплаву в умовах сухого тертя ковзанням. Надлишкова мідь в твердому розчині заліза виокремлюється на міжфазних поверхнях і відіграє роль твердого мастильного матеріалу, зменшуючи коефіцієнт тертя та зношування пари тертя [2-5].

Досліджувалась заєвтектоїдна сталь з вмістом (мас. %): вуглецю – 1,5, мікролегована ванадієм – 0,15 і азотом – 0,02 та додатково легована 13,0 мас. % міді. Для зручності сприйняття наводимо вміст вуглецю 19,40 та міді 56,83 в ат. %.

Зносостійкість дослідженої сталі в умовах сухого тертя ковзанням визначали на машині тертя моделі M22M за швидкості ковзання 1 м/с, питомого навантаження 50 кг/см², і використання контртіла виготовленого зі сталі 20X13. Результати випробувань показали, що інтенсивність зношування (lg) для дослідженої сталі дорівнює – 0,20 г/км (для контртіла значно менша – 0,07 г/км), цей показник на третину нижчий в порівнянні з базовою нелегованою сталлю. Отримані результати пояснюють те, що мікродобавки

ванадію та азоту, за рахунок дисперсійного нітридованадієвого зміцнення підвищують зносостійкість сталей в умовах сухого тертя ковзанням [6], а також підвищений вміст вуглецю в поверхневому шарі зразка сталі відіграє роль твердого мастильного матеріалу. Додаткове легування міддю, сприятливо впливає на пару тертя, в якій інтенсивність зношування контртіла в п'ять разів менша за рахунок змащувального ефекту мідистою фазою.

Тонкий поверхневий шар зразків сталі після тертя досліджено на Оже рентгеноспектральному мікроаналізаторі на приладі Jamp-9500F Jeol Field Emission Auger Microprobe, в режимі SEI у вторинних електронах після глибокого іонного травлення іонами аргону і без травлення. Травлення здійснено іонами аргону з енергією 1000 eV за швидкості 4 нм/хв. Досліджено зразки після тертя на машині тертя і вихідні без тертя.

Поверхню зразка сталі до тертя і без травлення представлено на рис. 1 а. В структурі сталі на фоні основної матриці спостерігаються виокремлення мідистої фази світлого кольору розміром 1-30 мкм. Досліджувалась ділянка матриці темного кольору зійомкою Оже спектрограм для побудови профілю по глибині після іонного травлення іонами аргону (рис. 2).

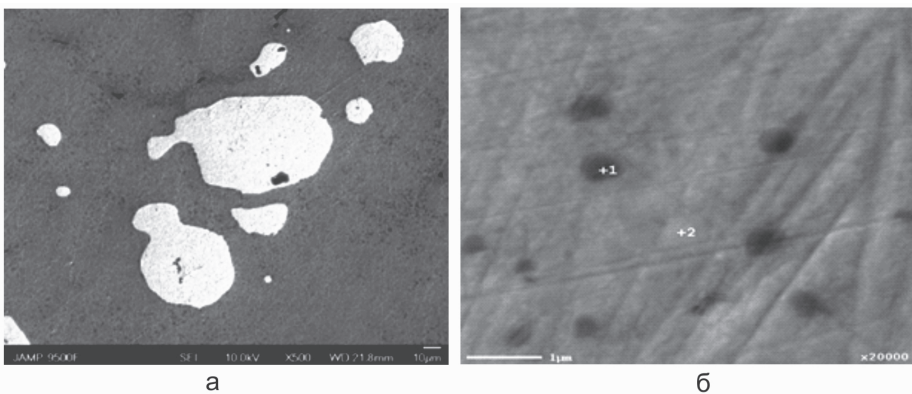


Рис. 1. Розподіл мідистої фази в дослідженій сталі до тертя і без травлення (а, x500) та структура мідистої фази з вказаними місцями зняття спектрів (б, x20000).

Fig. 1. Distribution of the middle phase in the steel after rubbing and without etching (a, x500) and the structure of the middle phase with indicated places for taking spectra (б, x20000).

Профіль побудовано після іонного травлення до глибини 16 нм, легування міддю не вплинуло на розподіл вуглецю в структур сталі, він рівномірний і знаходиться в межах 15-20 ат. %. Спостерігаємо від 10 до 16 нм рівень досліджених хімічних елементів має сталий характер, тому дані від 16 до 200 нм не наведено.

Мідисте виокремлення (рис. 1 а) досліджено за великого збільшення в 20000 крат і представлено на рис. 1 б. Темна фаза округлої форми виявилась вкрапленнями заліза, виходячи з даних табл. 1. Присутність вкраплень заліза в міді свідчить про те, що очевидно, в кристалічній ґратці Fe та Cu заміщують одне одного.

На експериментальному зразку сталі після тертя на машині тертя виконано Оже рентгеноспектральний мікроаналіз після глибокого іонного

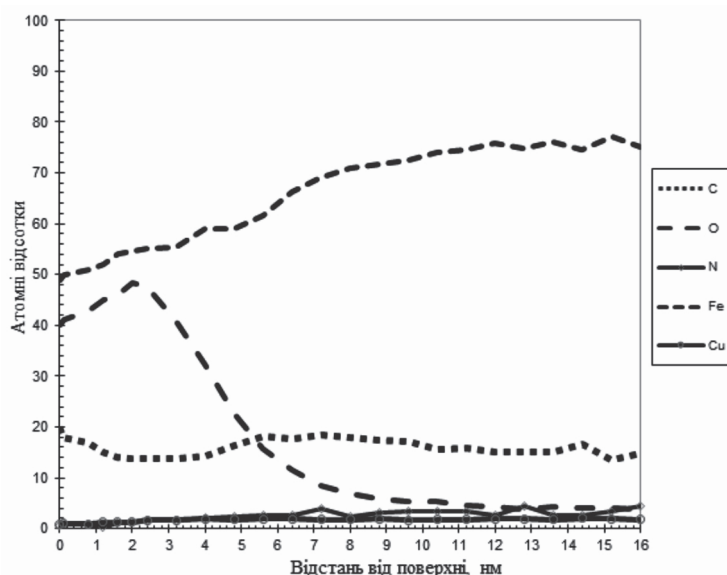


Рис. 2. Профіль по глибині травлення зразка сталі до тертя.

Fig. 2. Profile according to the depth of pickling of steel until rubbing.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджених ділянок в мідистий фазі сталі, в ат. %

Table 1

Chemical composition of the studied areas in the copper phase of steel, in at. %

Спектр	C	O	N	Fe	Cu
1	3.7	1.6	2.3	42.5	49.8
2	8.9	4.3	0.7	1.9	84.2

травлення іонами аргону й без травлення. Поверхню зразка сталі без травлення представлено на рис. 3а, після травлення на рис. 3б, колом окреслено місце зйомки Оже спектрів. За даними спектрів після травлення іонами аргону сформовано профіль до глибини 200 нм (рис. 4).

Аналізуючи профіль по глибині сталі видно, що на поверхні зразка мідиста фаза досягає максимальних значень 10-15 ат. %, в 5-7 разів вищих ніж до тертя, цей прошарок має розмір 8 нм, поступово зменшується до глибини 50 нм, формується за рахунок дифузійної рухливості міді на поверхню зразка під час процесів зношування. Далі вміст міді стабілізується і на глибині 100-200 нм має показник 5 ат. %. Необхідно зазначити, що на поверхні зразка відбувається розмазування мідистої складової і через це окремих мідистих виокремлень не спостерігається [7]. Також на поверхні зразка після тертя підвищений вміст вуглецю в 2,5 рази, ніж до тертя за рахунок дифузійної рухливості вуглецю по шару тертя, механізму виокремлення вуглецю в формі графіту, а також дифузійному переміщенню вуглецю з матриці за сприяння локальних надвисоких температур в зоні тертя. Підвищений вміст вуглецю в поверхневому шарі зразка сталі відіграє

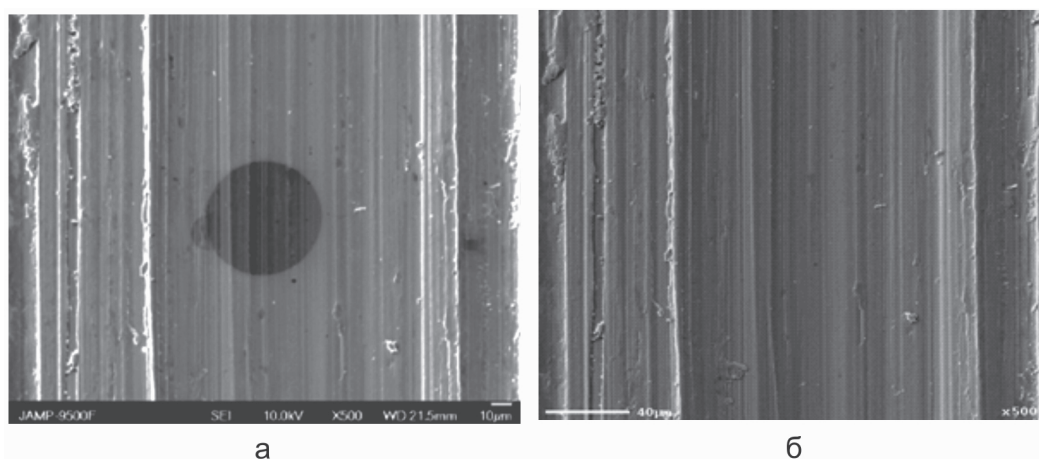


Рис. 3. Поверхня зразка сталі після тертя на машині тертя, до (а) і після (б) іонного травлення, x500.

Fig. 3. The surface of the steel after rubbing on a machine, before (a) and after (б) ion etching, x500.

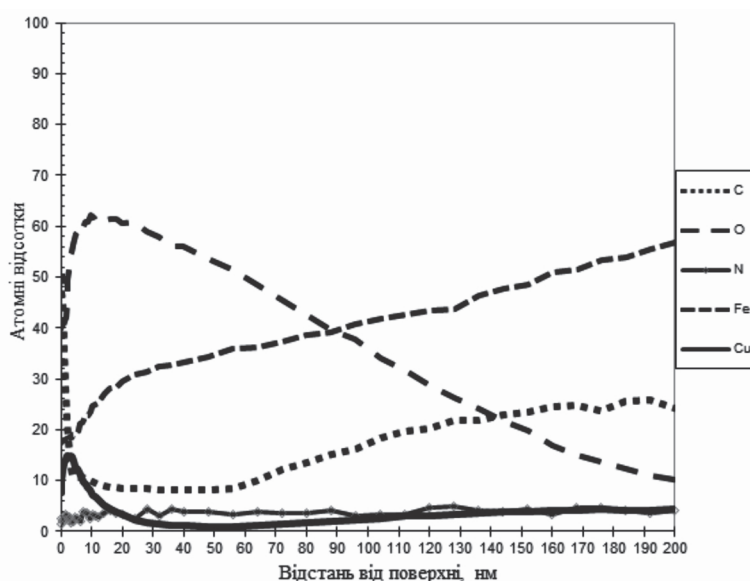


Рис. 4. Профіль по глибині травлення зразка сталі після тертя на машині тертя.

Fig. 4. Profile by depth of etched steel after rubbing on a machine.

роль твердого мастильного матеріалу, зменшуючи інтенсивність зношування [1]. Далі спостерігається ділянка з меншим вмістом вуглецю на рівні 10 ат. % протяжністю 50 нм. Поступово вміст вуглецю підвищується і на відстані від краю зразка 150 нм досягає значень близьких до 25 ат. %. Тобто вміст вуглецю на поверхні зразка сталі після тертя значно вищий ніж до тертя.

Розподіл заліза в поверхневому шарі змінюється в межах 20-50 ат. %. Що до кисню, підвищений вміст на поверхні пояснюється присутністю окисної плівки, тенденція розподілу однакова, але знижується не так стрімко як до тертя і має дещо вищий показник на 10 ат. % (рис. 4,



Рис. 5. Поверхня зразка сталі після тертя та після іонного травлення, з вказаними ділянками зйомки Оже спектрів, x7000.

Fig. 5. The surface of the glass became after rubbing and after ion etching, with the indicated sections for taking Auger spectra, x7000.

рис. 2). В структурі сталі після тертя та після іонного травлення з'являються вкраплення темного кольору (рис. 5, ділянки +1, +2). Аналізом результатів наведених в табл. 2 встановлено, що ці вкраплення є складними оксидами, містять в своєму складі до 50 ат. % кисню, мають чіткі границі, розмір 1,0-1,5 мкм. В матриці дослідженої сталі по всьому полю зору спостерігаються комплексні карбонітридні сполуки з вмістом вуглецю 20 ат. %, сформовані за рахунок мікролегування сталі азотом (табл. 2, спектр 3). Вміст азоту в структурі сталі після тертя на тому ж рівні, що і до тертя 5 ат. %. Мідь розподіляється по всій поверхні, її вміст на рівні 5,1 ат. %.

Таблиця 2
Хімічний склад (ат. %) ділянок зйомки (рис. 5) в структурі сталі після тертя та після іонного травлення

Table 2
Chemical composition (at. %) of the analyzed areas (Fig. 5) in the steel structure after friction and ion etching

Спектр	C	O	N	Fe	Cu
1	7.9	47.7	6.7	35.4	2.3
2	5.9	50.3	4.9	36.7	2.3
3	20.9	12.1	5.5	56.4	5.1

Як відзначалось, на поверхні зразка сталі після тертя виокремлення мідистої фази не спостерігаються, за рахунок дифузійної рухливості міді на поверхню зразка під час процесів зношування та розмазування її по поверхні зразка. Але в процесі іонного травлення мідисті виокремлення витравлюються і мають світлий колір та округлу форму, розмір до 1 мкм (рис. 6 а, б).

Розташування комплексних карбонітридних сполук в поверхневому шарі зразка сталі після тертя представлено на рис. 6 в. За великих збільшень спостерігається рівномірний розподіл комплексних карбонітридних сполук в структурі сталі, вони вміщують вуглецю до 20 ат. % , заліза 56 ат. %, азоту та міді порядку 5 ат. %, їхній розмір мікродисперсний 0,05 мкм, мають світлий колір з відтінками до сірого з меншим вмістом вуглецю.

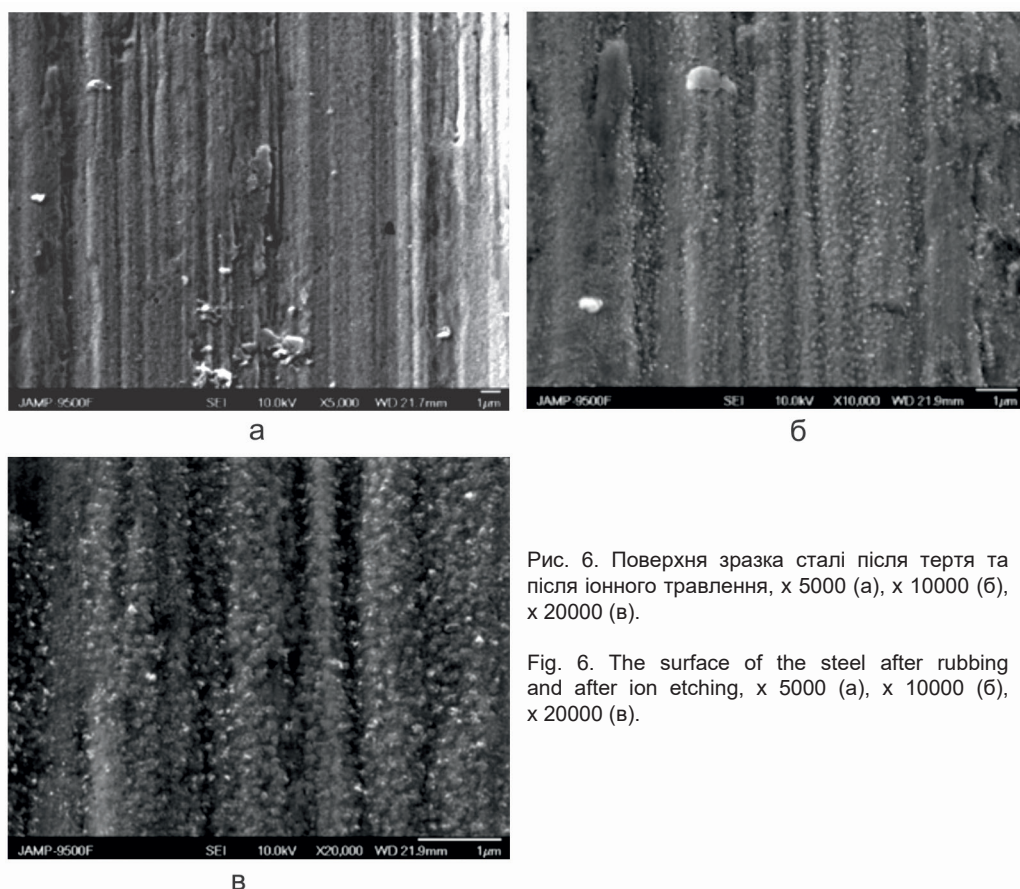


Рис. 6. Поверхня зразка сталі після тертя та після іонного травлення, x 5000 (а), x 10000 (б), x 20000 (в).

Fig. 6. The surface of the steel after rubbing and after ion etching, x 5000 (a), x 10000 (б), x 20000 (в).

Висновки

Проведені експерименти дозволили дослідити структуру тонкого поверхневого шару на мікрорівні сформованого в процесі тертя ковзанням на глибину 200 нм. Встановлено, вміст вуглецю в поверхневому шарі зразка сталі після тертя в 2,5 рази перевищує цей показник в зразку до тертя, за рахунок дифузійної рухливості вуглецю по шару тертя, механізму виокремлення вуглецю в формі графіту, а також дифузійному переміщенню вуглецю з матриці за сприяння локальних надвисоких температур в зоні тертя. Підвищений вміст вуглецю в поверхневому шарі зразка сталі відіграє роль твердого мастильного матеріалу, покращуючи показники зношування. Легування міддю, під час тертя дозволяє мідистій фазі на поверхні зразка досягти максимальних значень, ця зона формується за рахунок дифузійної рухливості міді на поверхню зразка під час процесів зношування, сприяє механізму масоперенесення мідистої фази між контактними поверхнями пари тертя, теж відіграє роль твердого мастильного матеріалу, разом з вуглецем на третину зменшує зношування пари тертя, збільшуючи довговічність і надійність пари тертя.

Література

1. Акимов І. В. Підвищення зносостійкості графітізованої сталі // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 25-30.
2. Novytskyy V. Wear rate of Fe-Cr-C-Mn steels under sliding friction // Proceedings of 4th AIMETA International Tribology Conference. – Rome, 2004. – P. 45-54.
3. Novytskyy V. G., Havryliuk V. P., Tikhonovich V. I. Effect of copper on wear rate of stainless Fe-Cr-C-Cu steels for power industry under sliding friction // Proceedings of 4th European Stainless Steel Science and Market Congress. – France, 2002. – P. 380-385.
4. Локтіонов-Ремізовський В. А., Шипицин С. Я., Новицький В. Г., Кир'якова Н. В. Ефективність впливу легування міддю на зношування заевтектоїдних сталей // Металознавство та обробка металів. – 2022. – № 4. – С. 33-38. <https://doi.org/10.15407/mom2022.04.030>
5. Новицкий В. Г., Гаврилюк В. П., Лахненко В. Л. Влияние углерода и меди на структуру литых сплавов системы Fe-Cr-Cu-C и их трибологические характеристики в условиях трения скольжения // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 1. – С. 70-80.
6. Шипицин С. Я., Степанова Т. В., Лиховій Д. И., Кучеренко П. М. Вплив дисперсійного нітридного зміцнення на параметри $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення у високовуглецевих сталях // Процеси лиття. – 2017. – № 6. – С. 38-44.
7. Квасницька Ю. Г., Тарасевич М. І., Григоренко С. Г. Особливості структуроутворення заевтектоїдних сталей, легованих міддю // Металознавство та обробка металів. – 2024. – № 3. – С. 50-60. <https://doi.org/10.15407/mom2024.03.011>

References

1. Akimov, I. V. (2013). Pidvyshchennia znosostiikosti hrafitizovanoi stali [Increasing the wear resistance of graphitized steel]. *Nauka ta progres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, (6 [48]), 25-30. [in Ukrainian].
2. Novytskyy, V. (2004). Wear rate of Fe-Cr-C-Mn steels under sliding friction. In *Proceedings of 4th AIMETA International Tribology Conference* (pp. 45-54). Rome.
3. Novytskyy, V. G., Havryliuk, V. P., & Tikhonovich, V. I. (2002). Effect of copper on wear rate of stainless Fe-Cr-C-Cu steels for power industry under sliding friction. In *Proceedings of 4th European Stainless Steel Science and Market Congress* (pp. 380-385). France.
4. Loktionov-Remizovskiy, V. A., Shypitsyn, S. Ya., Novytskyi, V. H., & Kyr'iakova, N. V. (2022). Efektyvnist vplyvu lehuвання middiu na znoshuvannia zaevtektoidnykh stalei [Effectiveness of copper alloying on wear of hypereutectoid steels]. *Metaloznnavstvo ta obrobka metaliv*, (4), 33-38. <https://doi.org/10.15407/mom2022.04.030> [in Ukrainian].
5. Novitskii, V. G., Gavrilyuk, V. P., & Lakhnenko, V. L. (2015). Vliianie ugleroda i medi na strukturu litykh splovov sistemy Fe-Cr-Cu-C i ikh tribologicheskie kharakteristiki v usloviakh treniia skolzheniia [Influence of carbon and copper on the structure of cast alloys of the Fe-Cr-Cu-C system and their tribological characteristics under sliding friction]. *Trenie i iznos*, 36(1), 70-80. [in Russian].

6. Shypitsyn, S. Ya., Stepanova, T. V., Lykhovii, D. I., & Kucherenko, P. M. (2017). Vplyv dyspersijnoho nitrydnoho zmitsnennia na parametry $\gamma \rightarrow \alpha$ peretvorennia u vysokovuhletsevykh staliakh [Influence of dispersion nitride strengthening on $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation parameters in high-carbon steels]. *Protsesy lyttia*, (6), 38-44. [in Ukrainian].
7. Kvasnytska, Yu. H., Tarasevych, M. I., & Hryhorenko, S. H. (2024). Osoblyvosti strukturoutvorennia zaevtektoidnykh stalei, lehovanykh middiu [Features of structure formation in hypereutectoid steels alloyed with copper]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (3), 50-60. <https://doi.org/10.15407/mom2024.03.011> [in Ukrainian].

Одержано 22.05.25

Features of formation of the surface layer of steel under conditions of dry sliding friction

Yu. G. Kvasnitska, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, jul.kvasnitskaja@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>

S. G. Grigorenko*, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, hryhorenko@paton.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0625-7010>

S. Ya. Shipitsyn, Doctor of Technical Sciences, Head of Scientific Cooperation; chevrtkonata@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6406-5345>

V. G. Novitskyi, Candidate of Technical Sciences, Head of Scientific Collaboration; viktornovytskyi@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1496-443X>

N. V. Kiryakova, Chief Technologist, nat.vas.kir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8220-1209>

I. V. Oleksenko, Scientific Collaboration, svs@optima.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7316-9998>

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Institute of Electric Welding named after E. O. Paton of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

The task of modern tribomaterials science is to create materials with high performance characteristics, sufficient for operation in wear conditions with increased reliability and durability. A hypereutectoid wear-resistant steel microalloyed with vanadium and nitrogen and additionally alloyed with copper has been developed. Samples of the experimental steel were tested on a friction machine model M22M under dry sliding friction conditions to determine wear resistance. The test results showed that

the wear intensity for the experimental steel is -0.20 g/km , this figure is one third lower compared to the base unalloyed hypereutectoid steel.

The obtained results are explained by the fact that microadditives of vanadium and nitrogen, due to dispersion nitride vanadium strengthening, increase the wear resistance of steel under conditions of dry sliding friction, and the increased content of carbon and copper in the surface layer of the steel sample plays the role of a solid lubricant, providing a lubricating effect, additionally increasing wear resistance. The thin surface layer of steel samples after friction on a friction machine was examined on an Auger X-ray spectral microanalyzer to a depth of 200 nm. Auger spectrograms were recorded and a depth profile was constructed after ion etching with argon ions of the experimental steel samples before friction and after friction. A comparative analysis was conducted, it was found that on the surface of the sample after friction, the copper phase reaches maximum values 5-7 times higher than before friction (10-15 at. %), this layer has a size of 8 nm and is formed due to the diffusion mobility of copper to the surface of the sample during wear processes. Also, on the surface of the sample after friction, the carbon content is increased by 2.5 times than before friction due to the diffusion mobility of carbon along the friction layer, the mechanism of carbon separation in the form of graphite, as well as the diffusion movement of carbon from the matrix with the assistance of local ultra-high temperatures in the friction zone. Therefore, microalloying of the experimental hypereutectoid steel with nitrogen and vanadium and additional alloying with copper leads to a decrease in friction pair wear, an increase in the durability and reliability of the friction pair.

Keywords: steel, chemical composition, carbon, copper, surface layer, friction, spectrum.

Metalozn. obrobka met. 2025, vol. 31 (115), 22-34
<https://doi.org/10.15407/mom2025.03.022>

УДК 629.4.077:629.4.027.51

Вплив гальмівних колодок на утворення дефектів поверхні кочення коліс залізничного транспорту і рейок

Мазур В. Л., член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник, prof.vlm@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

Сіренко К. А., кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу, thermoexp.metal@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

Розглянуто результати досліджень причин, механізму і наслідків утворення дефектів на поверхні кочення коліс залізничного рухомого складу і залізничних рейок під впливом гальмівних колодок. Акцентовано увагу, що в Україні під назвою «композиційні гальмівні колодки» застосовують колодки із композиційної (композитної) гумосуміші на