

УДК 669.15-194:539.378.6:620.17.002.61

С.Я. Шипицин, докт. техн. наук, пров. наук. співроб.;

e-mail: chevrtkonata@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-6406-5345>

В.Г. Новицький, канд. техн. наук, пров. наук. співроб.;

e-mail: viktornovytskyi@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-1496-443X>

Г.Є. Федоров, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.;

e-mail: odus@ptima.kiev.ua

Т.В. Степанова, наук. співроб.; e-mail: stept@ukr.net;

<https://orcid.org/0009-0002-5489-9595>.

Н.В. Кир'якова, головн. техн.; e-mail: nat.vas.kir@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0000-8220-1209>

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

ВПЛИВ ДИСПЕРСІЙНОГО НІТРИДВАНАДІЄВОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗАЕВТЕКТОЇДНИХ СТАЛЕЙ

Підвищення зносостійкості матеріалів пари тертя можна досягти застосуванням більш досконалих композицій мастильних матеріалів, таких, як тверді мастила, які надзвичайно стабільні у важких умовах експлуатації. Поєднання кількох компонентів із фізико-механічними властивостями, що різко відрізняються, дозволяє створювати композиції з необхідними властивостями. У таких матеріалах на ділянках твердої складової формуються плівки з пластичного матеріалу, що утворені або за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення антифрикційної і твердої складових при нагріванні пари тертя, або в результаті механічного намазування. До таких сплавів належать заевтектоїдні сталі, які містять у матриці включення графіту та мідисті включення. У дослідженні визначено механізми та закономірності впливу легування заевтектоїдних сталей азотом і ванадієм на ефективність підвищення їх зносостійкості в різних умовах зношування в результаті «твердого змащування» графітом і мідистою фазою із збереженням та підвищенням рівня їх конструкційної міцності й зносостійкості. Досліджено три групи сталей: перша стандартна із вмістом вуглецю 1,5 мас. %; друга також стандартна з 1,5 мас. % вуглецю, легована 13 мас. % міді; третя зі зниженням до 1,2 мас. % вмістом вуглецю. Установлено, що дисперсійне нітридванадієве зміцнення знижує інтенсивність зношування у всіх трьох групах сталей. Також у всіх випадках досягається зниження коефіцієнта тертя на 15 – 27 %. Це результат твердого змащування вуглецем і міддю, які накопичуються на поверхні тертя та формують третє тіло на поверхні пари тертя. Спостерігається підвищена майже в три рази ефективність «твердого змащування графітом» сталі №2, пов'язана, головню, з підвищенням кількості та диспергуванням графіту в структурі перетворення модифікуючої дії твердорозчинного азоту під час кристалізації й фазових перетворень сталей та диспергування дендритної мікро- й субструктури нітридованадієвою фазою.

Ключові слова: зносостійка сталь, дисперсійне нітридванадієве зміцнення, триботехнічні, механічні властивості, легування.

Вступ

Підвищення надійності та довговічності машин і механізмів безпосередньо пов'язане з підвищенням трибологічних характеристик вузлів тертя. Це можна досягти за рахунок підвищення зносостійкості матеріалів пари тертя та застосуван-

ня більш досконалих композицій мастильних матеріалів. Однак, вимога підвищення потужності, що передається через вузли тертя, спричиняє необхідність використання також сплавів із твердим мастилом, яке безпосередньо розташовано в матриці сплаву — матричне мастило. Перевагою твердих мастил, порівняно з мастилами звичайних типів, є те, що вони антифрикційні властивості, підвищують їх демпфінгуючу здатність, потрібно дуже стабільні у важких умовах експлуатації. Поєднання декількох компонентів із фізико-механічними властивостями, що різко відрізняються, дозволяє створювати композиції з низкою унікальних і дуже важливих для техніки властивостей: високою теплопровідністю, самозмащенням при терті, високою демпфінгуючою здатністю і тощо [1, 2]. Найбільші переваги з погляду сприйняття навантаження та реалізації механізму самозмащування показують макрогоетерогенні псевдосплави [3, 4]. Залежно від умов зовнішнього тертя в таких матеріалах на ділянках твердої складової формуються плівки з пластичного матеріалу, утворені або за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення антифрикційної і твердої складових при нагріванні пари тертя, або в результаті механічного намазування. До таких сплавів можна віднести заевтектоїдні сталі, які містять в матриці включення графіту або графіту і високомідисті включення ϵ -фази [1, 2].

Стан питання та постановка завдання дослідження

Метою дослідження є визначення механізмів і закономірностей впливу легування заевтектоїдних сталей азотом і ванадієм на ефективність підвищення їх зносостійкості в різних умовах зношування «твердого змащування» графітом і мідистою фазою із збереженням і навіть, підвищенням рівня їх конструкційної міцності та зносостійкості.

Досягнення цієї мети базується на результатах фундаментальних досліджень у Фізико-технологічному інституті НАН України (Україна, Київ) впливу твердорозчинних азоту й ванадію та дисперсійної нітридванадієвої фази на процеси кристалізації, твердіння, формування первинної (дендритної чи зерниної), вторинних структур усіх рівнів (макро-, мікро-, субмікроструктур) під час термічного оброблення та в процесі експлуатації виробів із різних класів сталей — вуглецевих низько- та середньолегованих, високолегованих і спеціальних. Основні результати цих досліджень сконцентровано в монографії [7].

Необхідність легування заевтектоїдних сталей азотом і ванадієм пов'язана з декількома причинами. Головними з них є:

- підвищення кількості графітної фази, як фази «твердого змащування», що знижує міцність і пластичність сталей;
- для компенсації погіршення механічних властивостей сталі треба легувати домішками та дефіцитними елементами — Ni, Cr, Mo, W, що суттєво підвищує собівартість металовиробів.

У роботі [8] наведено результати досліджень впливу кількості графітової фази на міцність і зносостійкість заевтектоїдної сталі. У ній відзначається, що графітні вкраплення надають заевтектоїдним сталям антифрикційних властивостей, їх демпфінгуючу здатність і знижують чутливість до концентраторів напруг. З іншого боку, із збільшенням кількості графітної фази знижуються показники міцності й пластичності. У роботі [9] оцінено вплив графітної фази на механічні властивості сплавів зі зростаючим вмістом вуглецю. Між кількістю графіту й міцністю сплавів спостерігалися прямолінійні залежності: збільшення вмісту вуглецю від 0,48 % до 4,02 % і, відповідно, кількості графітних вкраплень від 2,1 % до 12,3% призводить до зниження межі міцності від 652 МПа до 168 МПа при температурах від 511 МПа до 152 МПа, і від 155 МПа до 48 МПа за при температурах 500 °C і 700 °C, відповідно. Показники твердості при цьому знизилися від 220 НВ до 121 НВ.

Дослідження впливу легування азотом і ванадієм на триботехнічні властивості виконано на трьох групах сталей: перша (№1, №2) стандартна із вмістом вуглецю 1,5 мас. %; друга (№3, №4) — стандартна з 1,5 мас. % вуглецю, легована 13 мас. % міді; третя (№5, №6) — зі зниженням до 1,2 мас. % вмістом вуглецю (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних сталей

№ сталі	Масова частка елементів. %								
	C	Si	Mn	Cr	S	P	V	Cu	N
1	1,51	0,60	1,72	0,62	0,036	0,038	—	—	—
2	1,50	0,58	2,29	0,51	0,034	0,032	0,13	—	0,020
3	1,51	1,00	1,06	0,46	0,038	0,027	—	13	—
4	1,51	1,00	1,70	0,58	0,038	0,036	0,17	13	0,021
5	1,20	0,77	0,55	0,20	0,026	0,028	—	—	—
6	1,21	0,78	0,82	0,17	0,026	0,028	0,10	—	0,022

Усі дослідні сталі термічно оброблені за режимом, рекомендованим в роботі [9], який передбачає сфероїдизуючий відпал для реалізації $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення: 20 °С → нагрівання з пічкою до 1000 °С — витримка 2 год → охолодження в печі до 740 °С зі швидкістю 120–130 °С / год → охолодження на повітрі до 20 °С. Зразки сталей №2, №4, №6, з метою дисперсійного виділення нітридванадієвої фази, додатково проходили високотемпературний відпуск при 600 °С протягом 2 год.

Методи та методики досліджень

Заготовки для виготовлення зразків різного призначення одержували литтям у сухі разові піщано-глиняні форми. Хімічний склад сталей визначали за стандартними методиками, передбаченими нормативними документами: вуглець, фосфор і сірку — хімічним аналізом за ДСТУ ГОСТ 12344:2005, ДСТУ 8901:2019 і ДСТУ 9055:2020, азот — методом відновлювального плавлення в потоці інертного середовища на газоаналізаторі T114 фірми «Леко» (ФРГ). Решту хімічних елементів визначали спектральним аналізом за ГОСТ 18875-81, ГОСТ 12346-78, ГОСТ 12348-78 і ДСТУ ГОСТ 671-82:2004.

Зносостійкість досліджених сталей в умовах сухого тертя ковзанням визначали на машині тертя моделі M22 M при швидкості ковзання 1 м/с, питомому навантаженні 5 МПа й використанні контртіла твердістю 38–40 HRC, виготовленого зі сталі 20X13.

Механічні властивості сталей визначали за стандартними методиками. Для випробовування розривних зразків використано універсальну гідравлічну машину моделі INSTRON 8802.

Твердість металу вимірювали на приладі ТК-2 за при використанні навантаження 150 кг. Ударну в'язкість сталей визначали при нормальних температурах, відповідно до вимог ДСТУ EN 10045-1:2006, із використанням копра МК 30 із межевою енергією удару 294 Дж.

Мікроструктури сталей вивчали за ДСТУ 9074:2021 на універсальному мікроскопі моделі MIM-7 та мікроскопі Epitip фірми Карл Зайсс (Німеччина).

На експериментальних зразках плавоки №4 виконано Оже-рентгеноспектральний мікроаналіз на приладі Jamp-9500F Jeol Field Emission Auger Microprobe.

Результати та їх обговорення

За отриманими даними, наведеними на рис. 1, можна констатувати, що додаткове легування сталі №1 міддю в кількості 13 мас. % веде до зменшення інтенсивності зношування в 1,2 рази (сталі №3), а сумарна інтенсивність зношування при цьому зменшується в 1,7 рази. Коефіцієнт тертя при цьому збільшується в 1,1 рази.

Легування сталі №1 комплексом ванадій + азот веде до зменшення інтенсивності зношування в 2,2 рази (сталі №2). Сумарна інтенсивність зношування при цьому зменшується в 1,5 рази, а коефіцієнт тертя зменшується в 1,2 рази.

Додаткове легування сталі №1 (комплексом ванадій + азот та 13 мас. % міді) веде до зменшення інтенсивності зношування в 1,5 рази (сталі №4), сумарна інтенсивність зношування при цьому зменшується в 1,7 рази, а коефіцієнт тертя зменшується в 1,24 рази.

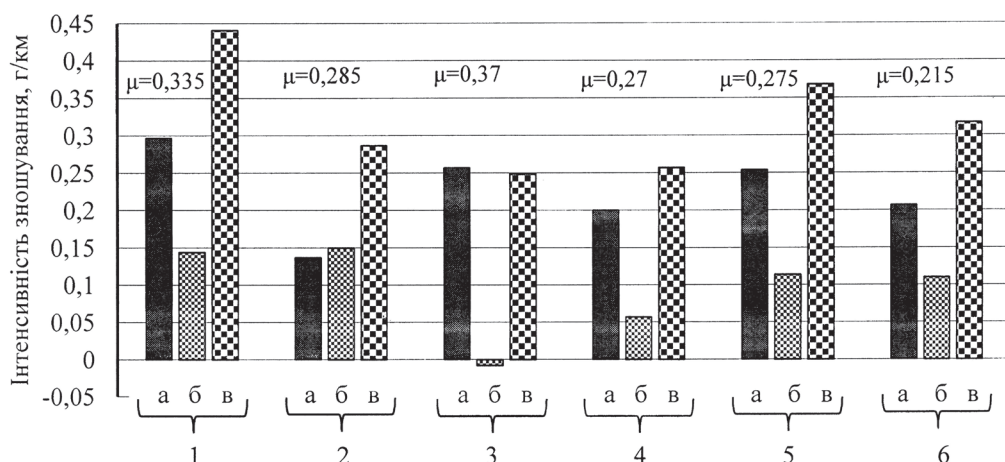


Рис. 1. Інтенсивність зношування в умовах сухого тертя литих заевтектоїдних сталей №1, 2, 3, 4, 5, 6: а – зразок, б – контртіло, в – сумарна інтенсивність зношування, μ – коефіцієнт тертя

Сумарна інтенсивність зношування сталей №3 (13 мас. % міді) та №4 (комплекс ванадій + азот та 13 мас. % міді) мають, практично, однакову інтенсивність зношування, але коефіцієнт тертя для сталі №4 в 1, 4 рази менше.

Важливим висновком є те, що дисперсійне нітридванадієве зміцнення знижує інтенсивність зношування у всіх трьох сталях. Також у всіх випадках досягається зниження коефіцієнту тертя: сталь №2 на 15%; №4 на 27%; №6 на 22%. Це результат твердого змащування вуглецем і міддю, які накопичуються на поверхні тертя і формують третє тіло на поверхні пари тертя.

Підвищена ефективність «твердого змащування графітом» пов'язана, головню, з підвищенням кількості та диспергуванням графіту в структурі внаслідок модифікуючої дії твердорозчинного азоту під час кристалізації й фазових перетвореннях сталей і диспергування дендритної мікро- й субструктури нітридванадієвою фазою. Мікроструктура досліджених сталей представлена на рис. 2, бал зерна в табл. 2.

Тонкий поверхневий шар зразків сталі після тертя досліджено на Оже-рентгеноспектральному мікроаналізаторі. Досліджено зразки після тертя на машині тертя і вихідні без тертя. Проведено зйомку Оже-спектрограм з експериментальних зразків після тертя та після травлення іонами аргону, за їх даними сформовано профіль до глибини 200 нм (рис. 3).

Аналізуючи профіль по глибині травлення 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. %. Також на поверхні зразка після тертя підвищений вміст вуглецю 30–60 ат. %, що в 2,5 рази вище, ніж до тертя, за рахунок дифузійної рухливості вуглецю по шару тертя, механізму виокремлення вуглецю у 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, зменшуючи інтенсивність зношування. 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.

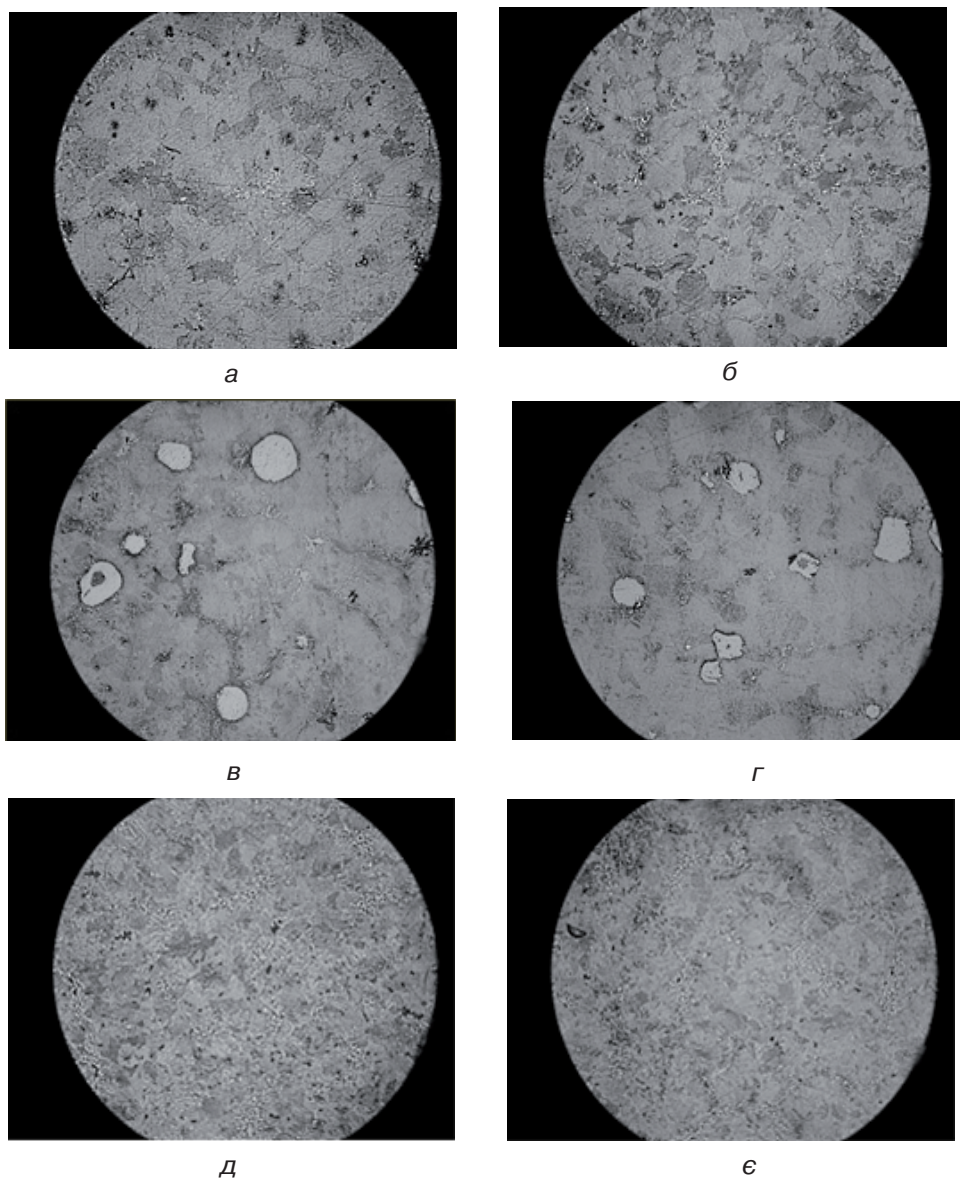


Рис. 2. Мікроструктура досліджених сталей №№1, 2, 3, 4, 5, 6, x400

Легування міддю (сталі №3 і №4) і зменшення вмісту вуглецю до $1,20 \pm 0,02$ мас. % (сталі №5 і №6) знижують ефективність впливу модифікування сталей азотом, мікролегування їх ванадієм і дисперсійного нітридванадієвого зміцнення на підвищення зносостійкості сталі. Так в обох випадках інтенсивність зношування зменшується тільки в 1,3 рази. Це є наслідком двох причин.

Перша — максимальна зносостійкість сталі плавки №2, пов'язана з підвищенням ефективності «твердого змащування» графітом. Друга — підвищення теплостійкості сталі дисперсійним нітридванадієвим зміцненням, бо початкова твердість сталей плавки №1 і №2 суттєво відрізняється.

Таблиця 2
Бал зерна досліджених сталей
(за ДСТУ 8972:2019)

Номер сталі	1	2	3	4	5	6
Бал зерна	6	7	5	5	6	7

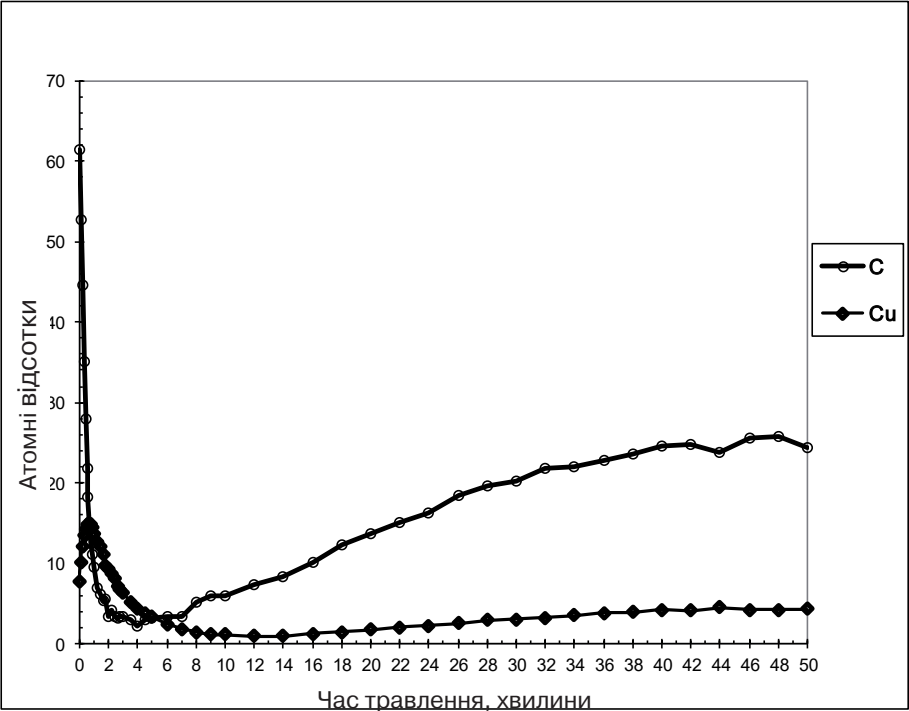


Рис. 3. Профіль по глибині травлення зразків сталі №4 після тертя

«Тверде змащування» мідистою фазою частково нівелює ефект «твердого змащування» графітом. Це підтверджує переносом металу зразка на контртіло (див. рис. 1).

Відомо, що азот у вуглецевих, середньо- та високолегованих сталях без хрому має поверхневу активність, а в сталях із хромом — здійснює поверхнєве ущільнення фронту кристалізації внаслідок його дуже низького коефіцієнта розподілу між твердою фазою та розплавом. В обох випадках азот знижує швидкість руху фронту кристалізації, підвищує ефективність процесу відведення тепла перегріву, знижує температурний градієнт, що забезпечує розширення за глибиною й шириною концентраційного переохолодження та, як наслідок, диспергування дендритної структури за розмірами дендритів і міждендритних зон в них.

Механічні властивості досліджених сталей наведено в табл. 3.

Одночасне модифікування азотом і мікролегування ванадієм забезпечує підвищення від 5 % до 15 % міцність та пластичність і від 5 % до 14 % в'язкість сталей. Підвищення

Таблиця 3
Механічні властивості дослідних сталей після термічного оброблення

Номер сталі	σ_v , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
1	468	407	0,30	0,35	80,2	241
2	562	528	0,51	0,51	92,2	262
3	511	540	0,58	0,22	81,0	241
4	560	555	4,05	0,57	86,0	248
5	311	295	0,04	0,00	75,0	238
6	400	399	0,06	0,22	85,3	241

міцності, переважно пов'язане з дисперсійним нітридванадієвим зміцненням фериту, а пластичності та в'язкості — із диспергуванням мікроструктури сталей.

Наведені дані показують, що модифікування азотом і дисперсійне нітридванадієве зміцнення забезпечують суттєве підвищення зносостійкості заевтектоїдних сталей без погіршення і навіть з підвищенням їх механічних властивостей.

Висновки

1. Модифікування азотом, мікролегування ванадієм і дисперсійне нітридванадієве зміцнення є ефективним засобом підвищення триботехнічних властивостей без погіршення і, навіть, із покращенням механічних властивостей заевтектоїдних сталей.

2. Зносостійкість при сухому терті ковзанням в сталях із пониженим вмістом вуглецю до 1,20 мас. % підвищується в 1,4 рази, а в сталях із високим вмістом вуглецю до 1,50 мас. % досягає 2,5 разів.

3. Підвищення зносостійкості пов'язане із суттєвим, до 1,5–2,0 разів, накопиченням вуглецю на поверхні тертя, що підвищує ефективність твердого змащування графітом знижує в 1,2–1,3 рази коефіцієнт тертя.

4. Дисперсійне нітридванадієве зміцнення підвищує на 5–15 % міцність та пластичність і на 5–14 % в'язкість зносостійких сталей. Підвищення міцності забезпечує дисперсійне зміцнення фериту, а пластичності і в'язкості — диспергування мікроструктури сталей.

Список літератури

- 1 Новицкий В.Г., Гаврилюк В.П., Панасенко Д.Д., Кальчук Н.А., Хоружий В.Я. Формирование слоёв трения и износостойкость сталей в условиях граничного трения. *Физико-химическая механика материалов*. 2003, Т. 39, № 6. С. 81–87.
- 2 Павлик Б.Б., Ошина Л.Я., Сидоров С.Я., Бобылев Ю.А. Изменение структуры, свойств и физического состояния поверхностей трения в процессе приработки. // *Автоматизация технической подготовки производства*. Рига. 1983. С. 115–119.
- 3 Канарчук В.Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям. Киев: Наук. думка, 1986. 265 с.
- 4 Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения материалов. Ташкент: ФАН, 1985. 175 с.
- 5 Квасницька Ю. Г., Тарасевич М. І., Григоренко С. Г., Кир'якова Н. В., Олексенко І. В. Особливості структуроутворення заевтектоїдних сталей, легованих міддю. *Металознавство та обробка металів*. 2024. №3. С. 50–60.
- 6 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.
- 7 Бабаскин Ю.З., Шипицин С.Я., Кирчу И.Ф. Конструкционные и специальные стали с нитридной фазой. Киев: Наук. думка. 2005. 371с.
- 8 Акимов. И.В. Повышение износостойкости графитизированной стали. Наука та прогрес транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2013, №6 (48).
- 9 Акимов И.В. Повышение механических свойств литой графитизированной стали Наука та прогрес транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2015. №3 (57).

References

- 1 Novitskyi V.G., Gavriluk V.P., Panasenko D.D., Kalchuk N.A., Khoruzhiy V.Ya. // Formation of friction layers and wear resistance of steels in the conditions of boundary friction. Physico-chemical mechanics of materials. 2003 . vol. 39, no. 6. P. 81–87 [in Russian].
- 2 Pavlyk B.B., Oshinya L.Ya., Sidorov S.Ya., Bobylev Yu.A. Changes in the structure, properties, and physical state of friction surfaces during run-in. // *Automation of production technical preparation*. Riga. 1983. P. 115–119 [in Russian].
- 3 Kanarchuk V. E. Adaptation of materials to dynamic effects. Kyiv: Nauk. Dumka. 1986. 265 p.
- 4 Fedorov V.V. Kinetics of damage and destruction of materials. Tashkent: Scientific Academy of Sciences, 1985. 175 p. [in Russian].
- 5 Kvasnytska Y. G., Tarasevich M. I., Grigorenko S. G., Kiryakova N. V., Oleksenko I. V. Peculiarities of structure formation of post-eutectoid steels doped with copper // Scientific and technical journal "*Metalology and metal processing*". 2024. No. 3. P. 50–60 [in Ukrainian].
- 6 Loktionov-Remizovsky V.A., Shipitsyn S.Ya., Novitsky V.G., Kiryakova N.V. The effectiveness of the influence of copper alloying on the wear of hypereutectoid steels. // Scientific and technical journal «*Metallurgy and metal processing*». 2022. No. 4. P. 33–38 [in Ukrainian].
- 7 Babaskin Yu.Z., Shipitsyn S.Ya., Kirchu I.F. Structural and special steels with nitride phase. – Kyiv: Nauk. dumka. 2005. 371 p. [in Russian].
- 8 Akimov. I.V. Increasing the wear resistance of graphitized steel. Science and progress of transport. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2013, No. 6 (48). [in Russian].
- 9 Akimov I.V. Increasing the mechanical properties of cast graphitized steel. Science and progress of transport. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, No. 3 (57) [in Russian].

Одержано / Received 15.12.2025

Прийнято / Accepted 18.02.2026

Опубліковано / Published 17.03.2026

S.Ya. Shipitsyn, Dr. Tech. Sci., Prov. Sci. Assoc.; e-mail: chevrtkonata@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0004-6406-5345>

V.G. Novitskyi, Cand. Tech. Sci., Prov. Sci. Assoc.;
e-mail: viktornovytskyi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-1496-443X>

G.E. Fedorov, Cand. Tech. Sci., Senior Sci. Assoc.; e-mail: odus@ptima.kiev.ua

T.V. Stepanova, Sci. Assoc.; e-mail: stept@ukr.net;
<https://orcid.org/0009-0002-5489-9595>.

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

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

INFLUENCE OF DISPERSION NITRIDE VANADIUM STRENGTHENING ON THE TRIBOTECHNICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF HYPEREUTECTOID STEELS

Increasing the wear resistance of friction pair materials can be achieved by using more advanced compositions of lubricants, such as solid lubricants, which are extremely stable in difficult operating conditions. The combination of several components with sharply different physical and mechanical

properties allows you to create compositions with the necessary properties. In such materials, films of plastic material are formed on the areas of the solid component, which are formed either due to the difference in the coefficients of thermal expansion of the antifriction and solid components when the friction pair is heated, or as a result of mechanical spreading. Such alloys include hypereutectoid steels, which contain graphite inclusions and copper inclusions in the matrix. This study identifies the mechanisms and patterns of the influence of doping hypereutectoid steels with nitrogen and vanadium on the effectiveness of increasing their wear resistance under various wear conditions due to "hard lubrication" with graphite and a copper phase while maintaining and increasing their structural strength and wear resistance. Three groups of steels were studied: the first standard with a carbon content of 1.5%; the second also standard with 1.5% carbon alloyed with 13% copper; the third with a carbon content reduced to 1.2%. It was found that dispersion vanadium nitride hardening reduces the intensity of wear in all three groups of steels. Also, in all cases, a reduction in the friction coefficient by 15–27% is achieved. This is the result of solid lubrication with carbon and copper, which accumulate on the friction surface and form a third body on the surface of the friction pair. An almost threefold increase in the efficiency of "solid lubrication with graphite" of steel №2 is observed, mainly due to an increase in the amount and dispersion of graphite in the structure due to the modifying action of solid-soluble nitrogen during crystallization and phase transformations of steels and dispersion of the dendritic micro- and substructure by the nitride-vanadium phase.

Keywords: wear-resistant steel, dispersion vanadium nitride hardening, tribotechnical, mechanical properties, alloying.

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу подача статей можлива через сайт <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Спілкування з редакцією та подання статей здійснюється через пошту **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»