

**Автухов А. К.,
Ковалевський Є. В.,
Борисенко О. С.,
Корнев О. С.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
a.k.avtukhov@gmail.com

**ОЦІНКА ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ
ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ З РІЗНИМ
ТИПОМ ЦЕМЕНТИТНОЇ СІТКИ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-110>

УДК 621.746

Автухов А.К., Ковалевський Є.В., Борисенко О.С., Корнев О.С. Оцінка циклічної тріщиностійкості високовуглецевих сталей з різним типом цементитної сітки

Анотація. У статті досліджено вплив структурних складових заевтектоїдних графітизованих сталей на експлуатаційні характеристики формуючих інструментів з гвинтовими калібрами. Показано, що складні умови контактної взаємодії, інтенсивне тепловиділення та нерівномірний розподіл напружень зумовлюють прискорене зношування і контактну втому робочих поверхонь валків, що висуває підвищені вимоги до матеріалу та режимів його термічної обробки.

Експериментально досліджено заевтектоїдні сталі з різною морфологією карбідної фази та графітових включень за умов одно- та багатоступеневої нормалізації з різних температур і швидкостей охолодження. Встановлено закономірності впливу температури аустенітизації та режимів охолодження на подрібнення карбідів, сфероїдизацію перліту й формування структурно вільного цементиту. Показано, що багатоступенева нормалізація з прискореним охолодженням забезпечує підвищення термічної витривалості та циклічної тріщиностійкості сталей.

Отримано рівняння регресії, які пов'язують статичну тріщиностійкість і термічну витривалість зі розмірами та відстанню між карбідними включеннями. На цій основі розроблено бальну шкалу оцінювання впливу карбідної фази на працездатність валків кулькопрокатних станів. Встановлено, що найкращі експлуатаційні властивості мають сталі зі сфероїдизованим перлітом, компактними або кулястими включеннями графіту та дрібнодисперсними відокремленими карбідами.

Ключові слова: заевтектоїдна сталь, графітизація, прокатні валки, термічна витривалість, тріщиностійкість, карбідна сітка, сфероїдизація.

Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V., Borisenko O.S., Kornev O.S. Evaluation of cyclic crack resistance of high-carbon steels with different types of cementite mesh

Abstract. The article investigates the influence of structural constituents of hypereutectoid graphitized steels on the service performance of forming tools with helical calibers. It is shown that complex contact interaction conditions, intensive heat generation, and non-uniform stress distribution lead to accelerated wear and contact fatigue of the roll working surfaces, which imposes increased requirements on the material and its heat treatment regimes.

Hypereutectoid steels with different morphologies of the carbide phase and graphite inclusions were experimentally studied under single- and multi-stage normalizing at various temperatures and cooling rates. The regularities of the influence of austenitizing temperature and cooling conditions on carbide refinement, pearlite spheroidization, and the formation of

structurally free cementite were established. It was demonstrated that multi-stage normalizing with accelerated cooling ensures enhanced thermal endurance and cyclic crack resistance of the steels.

Regression equations were obtained that relate static fracture toughness and thermal endurance to the size of carbide inclusions and the distance between them. On this basis, a scoring scale was developed to assess the influence of the carbide phase on the performance of rolls for ball-rolling mills. It was established that steels with spheroidized pearlite, compact or globular graphite inclusions, and finely dispersed isolated carbides exhibit the best service properties.

Keywords: *hypereutectoid steel, graphitization, rolling rolls, thermal endurance, fracture toughness, carbide network, spheroidization.*

Постановка проблеми.

Формуючі інструменти з гвинтовими калібрами широко застосовуються при виробництві кульок для подрібнення матеріалів різного призначення. Особливістю роботи гвинтових калібрів є поєднання процесів деформування і транспортування металу, внаслідок чого контакт інструмента із заготовкою має складний ковзнокочувальний характер. При цьому контактні напруження розподіляються нерівномірно вздовж гвинтової лінії, а їх максимальні значення виникають у вхідній зоні калібру, де відбувається початкова пластична деформація матеріалу.

В процесі експлуатації формуючих інструментів з гвинтовими калібрами спостерігається інтенсивне тепловиділення, обумовлене тертям і пластичною деформацією металу. Нерівномірний розподіл температури по поверхні калібру призводить до виникнення термічних напружень, що, у поєднанні з механічними навантаженнями, сприяє розвитку контактної втоми та прискореному зношуванню робочих поверхонь.

Важливим фактором забезпечення довговічності формуючих інструментів з гвинтовими калібрами є правильний вибір матеріалу та режимів термічної обробки. [1].

Традиційно для виготовлення прокатних валків широко застосовуються чавуни та леговані сталі, однак їх експлуатаційні можливості в умовах кулькопрокатних станів є обмеженими через недостатню тріщиностійкість або знижену пластичність. У зв'язку з цим зростає інтерес до використання заевтектоїдних графітованих сталей, які поєднують підвищені міцнісні характеристики зі здатністю до релаксації напружень за рахунок наявності графітових включень.

Разом із тим, наявні наукові публікації не дають систематизованих відомостей щодо впливу хімічного складу та режимів термічної обробки на формування мікроструктури заевтектоїдних графітованих сталей, зокрема на морфологію, розміри та просторовий розподіл карбідної фази [2]. Недостатньо вивченими залишаються також питання взаємозв'язку між структурним станом сталей і рівнем їх статичної та циклічної тріщиностійкості, термічної витривалості та загальної експлуатаційної стійкості валків.

Особливо актуальним є встановлення кількісних критеріїв оцінювання впливу карбідних і графітових включень на працездатність формуючих інструментів, що дозволило б обґрунтовано керувати структуроутворенням на стадіях виплавки, модифікування та термічної обробки. Розроблення таких критеріїв є необхідною умовою для цілеспрямованого вибору матеріалу валків і підвищення їх ресурсу без суттєвого ускладнення технології виробництва.

Формування мети дослідження.

Мета роботи: визначити вплив структурних складових у заевтектоїдних сталях на експлуатаційні характеристики формуючих інструментів.

Аналіз останніх досліджень.

В останні роки з'явилися дані, що свідчать про використання заевтектоїдних сталей для виготовлення формувальних інструментів, які застосовуються на листо- та сортопрокатних станах, а також для виготовлення шайб профілегибних агрегатів [3]. Такі валки є співставними з чавунними та мають вищі міцнісні й пластичні властивості. Запропоновані графітізовані сталі істотно відрізняються від відомих раніше тим, що включення графіту формуються в них не в процесі графітізувального відпалу, а під час кристалізації та охолодження виливки. Це дає змогу шляхом варіювання хімічного складу та застосування різних технологічних прийомів отримувати заготовки із заданим рівнем експлуатаційних характеристик.

Під час виробництва виливок із графітізованих сталей значну увагу приділяють питанням легування та модифікування. Однак у наявних публікаціях з цього питання [4,5] наведено надто широкі межі вмісту елементів, відсутні дані щодо концентрації основних графітізувальних добавок, зокрема кремнію, а також не визначено способи введення й ефективна кількість добавок-модифікаторів. Автори обмежуються лише переліком уведених лігатур, які, судячи зі структури сталей, містять кремній, кальцій, магній, церій та інші компоненти.

У багатьох розглянутих публікаціях, присвячених розробці високовуглецевих сталей, передбачено використання таких матеріалів для виготовлення валків передчистових і чистових клітей сортових станів. Однак цього недостатньо для застосування подібної інформації під час виробництва валків кулькопрокатних станів, оскільки в ній відсутні дані щодо рівня механічних та експлуатаційних властивостей. Водночас відсутні відомості про режими термічної обробки та концентрації низки основних елементів. Тому без додаткових систематизованих досліджень неможливо оцінити ефективність використання подібних високовуглецевих матеріалів для валків кулькопрокатних станів.

Результати досліджень.

В роботі досліджували два типи заевтектоїдних сталей: із грубою цементитною сіткою та мікроділянками ледебуриту, а також зі структурно вільним цементитом, рівномірно розподіленим у металевій матриці.

Хімічний склад досліджуваних матеріалів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад заевтектоїдних сталей

Умовний номер плавки	Вміст елементів, %; інше - Fe						
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo
1	1,68	2,57	0,77	0,04	0,80	1,05	0,31
2	1,23	1,99	0,42	0,03	0,74	0,86	0,33
3	1,40	2,01	0,45	0,03	0,76	0,86	0,39
4	1,72	2,07	0,60	0,03	0,17	0,14	0,09

Для визначення структури матеріалів та встановлення впливу швидкості охолодження на поведінку структурно вільного цементиту й ступінь сфероїдації перліту досліджували зміни, що відбуваються під час охолодження сталі з різних температур на повітрі та під вентилятором.

Проводили та аналізували як одноступеневі обробки за температур 850; 950; 1050 °С, так і багатоступеневі – за 950 °С, 850 °С; 1050, 950 °С і 1050, 950, 850 °С.

Встановлено, що при одноступеневих обробках зміна швидкості охолодження практично не впливає на сфероїдизацію перліту матриці. Більшою мірою проявляється роль температури аустенізації. За нормалізації з 850 °С у структурі матриці з'являються дрібні сфероїдизовані карбіди. Підвищення температури нормалізації до 950 °С призводить до подрібнення більшої частини голок вторинного цементиту. Характерні структури термічно оброблених сталей наведено на рис. 1.

Найбільш істотний вплив швидкості охолодження проявляється за багатоступеневої обробки. Різниця у структурі помітна, починаючи навіть із порівняно низьких температур – 950, 850 °С. Прискорене охолодження (вентилятором) підвищує ступінь сфероїдизації перліту. Подвійна нормалізація з вищих температур – 1050, 950 °С – за прискореного охолодження забезпечує подрібнення карбідів у сталях із розірваною цементитною сіткою, а за наявності грубої сітки – її потоншення та збереження без змін ділянок ледебуритної евтектики. Прискорене охолодження після кожного ступеня нормалізації перешкоджає подальшій коагуляції карбідів. Структурні зміни в матриці за потрійної нормалізації 1050, 950 і 850 °С практично не відрізняються від подвійної.

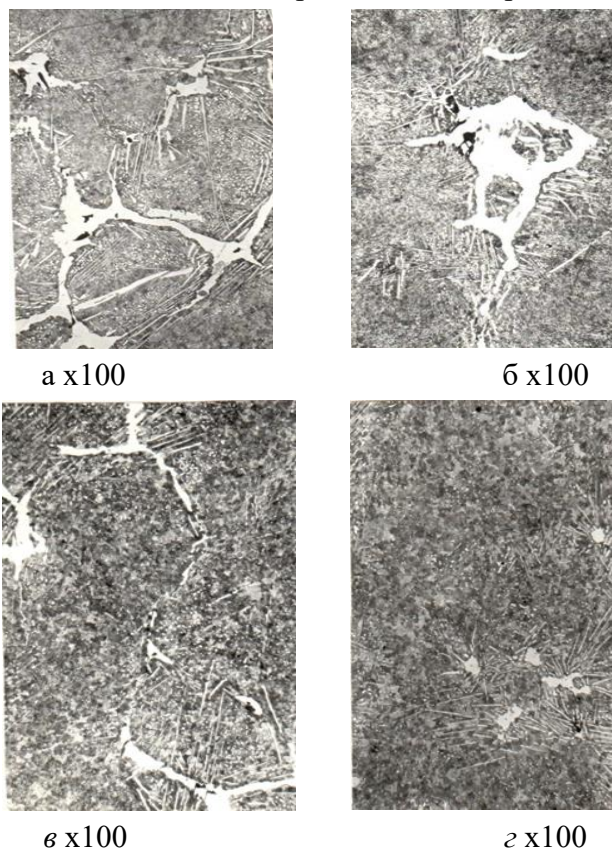


Рис. 1. Мікроструктури досліджених заевтектоїдних сталей, де: а – плавка 1, нормалізація за 950 °С; б – плавка 7, подвійна нормалізація за 1050 і 950 °С; в – плавка 8, подвійна нормалізація за 1050 і 950 °С; г – плавка 4, потрійна нормалізація за 1050, 950 і 850 °С.

Оцінку інтенсивності розчинення карбідної фази за різних температур обробки здійснювали шляхом зіставлення зразків, що пройшли нормалізацію та гартування.

Подрібнення карбідної фази (рис. 1б) та сфероїдизація графітових включень істотно знижують зародження тріщин.

Найбільшу термічну витривалість мають сталі, структура яких складається зі сфероїдизованого перліту з включеннями графіту компактної або кулястої форми та дрібних подрібнених включень цементиту (рис. 1в).

Лабораторні випробування з визначення статичної тріщиностійкості показали, що сталі з грубою цементитною сіткою (рис. 1г) характеризуються вищою статичною тріщиностійкістю порівняно зі сталями, які мають тонку карбідну сітку або структурно вільний цементит, рівномірно розподілений у матриці.

Тріщиностійкість сталей з рівномірними включеннями вторинних карбідів є неоднаковою. У сталях з великими відокремленими включеннями карбідів схильність до утворення тріщин (статична тріщиностійкість) є помітно вищою.

Водночас встановлено, що формування в структурі сталі сфероїдизованих графітових включень гальмує ріст втомних тріщин.

Отже, результати досліджень дали змогу встановити, що максимальною циклічною тріщиностійкістю характеризуються заевтектоїдні сталі, структура яких складається з просторового каркаса у вигляді вторинних карбідів і металевої матриці із зернистим перлітом та сфероїдизованими включеннями графіту.

Відповідно до цього виникла необхідність визначити розміри карбідних включень та їх розподіл у матриці графітізованої сталі з метою забезпечення максимальної експлуатаційної стійкості прокатних валків.

За стандартною програмою Excel було отримано такі рівняння регресії:

$$K_{TC} = 16,37 + 0,58X_1 + 0,94X_2 + 0,001X_1^2 - 0,006X_2^2;$$

$$N_{TC} = -1177,58 + 67,98X_1 + 33,62X_2 - 0,45X_1^2 - 0,22X_2^2;$$

- де: K_{TC} – статична тріщиностійкість сталі, МПа \sqrt{M} ;
 N_{TC} – термічна витривалість сталі, кількість циклів;
 X_1 – поперечний розмір карбідних включень, мкм;
 X_2 – відстань між карбідними включеннями, мкм.

На підставі аналізу мікроструктур і рівнянь регресії було розроблено бальну шкалу оцінювання впливу карбідних включень (табл. 2) на стійкість валків кулькопрокатних станів.

Таблиця 2

Характеристика карбідних включень

Балл	Доля карбідної фази, %	Наявність карбідної сітки	Розмір сфероїдизованих включень, мкм	Відстань між сфероїдизованими включеннями, мкм
I	Більше 15,0	Суцільна карбідна сітка	2...10	До 5
II	12,0...15,0	Розірвана карбідна сітка	10...25	5...15
III	10,0...12,0	Розірвана та потовщена карбідна сітка	25...40	15...30
IV	7,0...10,0	Окремі островки карбідної сітки	40...50	30...40
V	Менше 7,0	Залишки карбідної сітки	50...70	Більше 40

Розроблена бальна шкала характеризує загальне різноманіття форм виділень карбідної фази. Встановлено, що найкращі експлуатаційні властивості мають сталі, карбідна фаза яких представлена відокремленими карбідними включеннями розміром до 50 мкм (V бал). Сталі, карбідна фаза яких складається із суцільної карбідної сітки (I бал), характеризуються зниженими експлуатаційними властивостями.

Аналіз структури сталей 150ХНМ, 180СХНМ і 150СГНМ з урахуванням розробленої бальної шкали дав змогу дійти висновку, що для виготовлення валків кулькопрокатних станів найбільш доцільно застосовувати сталь 150СГНМ.

Мікроструктура цієї сталі після остаточної термічної обробки має пластівчасті включення графіту (рис. 1а) та карбідну фазу у вигляді скоагульованих включень (IV і V бал).

Висновки.

Встановлено, що параметри термічної обробки є визначальними для формування експлуатаційних характеристик заєвтектоїдних сталей. Одноступенева обробка мало впливає на сфероїдизацію перліту, тоді як підвищення температури аустенітизації до 950 °С сприяє подрібненню голок вторинного цементиту. Найбільш ефективною є подвійна та потрійна нормалізація з прискореним охолодженням (вентилятором). Це дозволяє подрібнити карбіди, потоншити цементитну сітку та запобігти небажаній коагуляції карбідів.

Максимальну термічну стійкість мають сталі, структура яких складається зі сфероїдизованого перліту, дрібних включень цементиту та графіту компактної або кулястої форми. Графітові включення сфероїдизованої форми виконують роль релаксаторів напружень і ефективно гальмують ріст втомних тріщин.

За сукупністю механічних та експлуатаційних характеристик найбільш доцільним матеріалом для виготовлення валків шаропрокатних станів визначено сталь 150СГНМ. Після термічної обробки вона забезпечує оптимальне поєднання пластівчастого графіту та скоагульованих карбідів. Це дозволяє підвищити ресурс прокатного інструменту без значного ускладнення технологічного процесу виробництва.

Список використаних джерел

1. Proizvodstvo i primeneniye prokatnykh valkov: spravochnik / T. S. Skoblo i dr. Red. T. S. Skoblo. Harkov, 2013. CD № 1. 572 s.
2. А. К. Автухов, О. Б. Калюжний, О. С. Борисенко, О. С. Корнев. Вплив хімічного складу та термічної обробки на експлуатаційні властивості заєвтектоїдних сталей, що працюють в умовах підвищених знакозмінних навантажень та температур. // Наукові нотатки : міжвуз. збірник. - Луцьк, 2025. - № 81. - С. 92-96
3. Жучков С. М., Беленький Б. Л., Кулик О. П. Досвід використання високовуглецевих сталей для виготовлення валків сортопрокатних станів. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 2. С. 45–52.
4. Кондратьев С. Ю., Анастасіаді Г. П. Вплив легування та модифікування на структуроутворення графітізованих сталей для інструментального застосування. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. Т. 642, № 4. С. 12–19.
5. Бабанін А. Я., Степанов Г. В. Дослідження процесів графітізації та карбідоутворення у високовуглецевих сталях при литті та термічній обробці. *Проблеми спеціальної електрометалургії*. 2021. № 3. С. 28–35.

References

1. Production and application of rolling rolls: a guide / T. S. Skoblo and others. Ed. T. S. Skoblo. Harkov, 2013. CD No. 1. 572 p.
2. A. K. Avtukhov, O. B. Kalyuzhny, O. S. Borisenko, O. S. Kornev. The influence of chemical composition and heat treatment on the operational properties of hypereutectoid steels operating under conditions of increased alternating loads and temperatures. // Scientific notes: interuniversity collection. - Lutsk, 2025. - No. 81. - P. 92-96
3. Zhuchkov S. M., Belenky B. L., Kulyk O. P. Experience in using high-carbon steels for the manufacture of rolls of section rolling mills. Metallurgical and mining industry. 2018. No. 2. P. 45–52.
4. Kondratiev S. Yu., Anastasiadi G. P. The influence of alloying and modification on the structure formation of graphitized steels for tool applications. Metallurgy and heat treatment of metals. 2019. T. 642, No. 4. P. 12–19.
5. Babanin A. Ya., Stepanov G. V. Research on the processes of graphitization and carbide formation in high-carbon steels during casting and heat treatment. Problems of special electrometallurgy. 2021. No.3. P. 28-35.