

**Клочко О.Ю.,
Дерябкіна Є.С.,
Воронов О.С.**
Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна,
E-mail:
vklochko@btu.kharkov.ua

**СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ
ЗАЕВТЕКТОЇДНОГО СКЛАДУ
В ТЕРМООБРОБЛЕНОМУ СТАНІ**

<https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.26-32>

УДК 669.017

Клочко О.Ю., Дерябкіна Є.С., Воронов О.С. Структура та властивості сталей заевтектоїдного складу в термообробленому стані.

Анотація. У роботі проведено дослідження, спрямовані на поліпшення структури та підвищення рівня властивостей вуглецевої сталі заевтектоїдного складу з вмістом вуглецю 1,0-2,0%, модифікованих церієм або бором, для виготовлення прокатних валків. Дослідження проводили на заготовках, отриманих методом стаціонарного лиття в земляні та металеві форми. Порівняльним дослідженням піддавали 9 варіантів плавок до і після модифікування, котрі піддавали відпалу за трьома різними режимами.

Встановлено, що різноманітність різних вимог до матеріалу прокатного інструменту, визначаються областю їх використання. Валки з доевтектоїдної сталі характеризуються досить високою в'язкістю, але мають низьку зносостійкість. Цей недолік певною мірою усувається при заміні таких сталей на евтектоїдні. Підвищену в'язкість можна збільшити шляхом термообробки, що забезпечує формування зернистої структури перліту з відповідним підвищенням зносостійкості в 2-4 рази, в порівнянні з валками з легованої евтектоїдної сталі за наявності окремих виділень цементиту на границях зерен. Показано, що використання запропонованих режимів термообробки дозволяє забезпечити навіть більш високий рівень властивостей, ніж у валках з низьколегованої сталі.

Ключові слова: заевтектоїдна сталь; термічна обробка; рівень властивостей; структура; прокатні валки.

Klochko O.Yu., Deryabkina E.S., Voronov O.S. Structure and properties of hypereutectoid steels in heat-treated state.

Abstract. Our present research is aimed at improving the structure and enhancing the properties of carbon steel of the hypereutectoid composition with a 1.0 - 2.0 % carbon content, modified with cerium or boron for the production of mill rolls. The research was carried out on subproducts obtained by the method of stationary casting in earthen and metal molds. Comparative studies were conducted on 9 versions of smelting before and after modification, which were subjected to annealing in three different modes.

It has been established that the requirements for the material rolling tool materials are determined by the area of their use. Hypereutectoid steel rolls are characterized by a rather high viscosity and a low wear resistance. This drawback is to some extent eliminated by replacing such steels with eutectoid steels. Viscosity can be increased by heat treatment,

which ensures the formation of a granular structure of pearlite with a corresponding increase in wear resistance by 2-4 times as compared to alloyed eutectoid steel rolls with separate cementite allocations at the grain boundaries. As we show in our present study, the proposed heat treatment modes allow one to ensure an even higher level of properties than in low-alloy steel rolls.

Key words: hypereutectoid steel; heat treatment; level of properties; structure; mill rolls.

Постановка проблеми

Литі валки гарячої прокатки працюють за умов великих питомих тисків, циклічно змінюваних температур, піддаються вигину, кручення, а поверхню тертя – інтенсивному зносу.

Виходячи з умов експлуатації, до валків висуваються такі вимоги [1]:

- висока механічна міцність, що забезпечує стійкість проти поломок;
- висока та стабільна твердість робочого шару в період експлуатації;
- здатність протистояти різким змінам температури без утворення тріщин на робочій поверхні.

Забезпечення таких вимог є важливою і актуальною проблемою, та відноситься до складних завдань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За останні роки проведено глибокі системні дослідження щодо підвищення якості та збільшення напрацювання під час експлуатації таких валків. Залежно від сфери застосування (типу стану, сортаменту прокату) використовують різні сплави для їх виготовлення [1-3]. Це чавуни, що відносяться до низьколегованих та високолегованих, а також вуглецеві та леговані доєвтекоїдні й заєвтектоїдні сталі.

Найбільшого застосування отримали чавунні валки, що пов'язано з більшою вивченістю такого матеріалу. Застосування сталевих литих валків обмежено через високі вимоги до їх механічних властивостей, які вони не завжди забезпечують [1].

Формулювання мети досліджень

У зв'язку з цим метою роботи стало вивчення властивостей матеріалів сталевого литого інструменту для гарячої прокатки, розробка пропозицій на основі порівняльних досліджень для забезпечення необхідного рівня споживчих властивостей такої продукції.

Матеріали та методика проведення досліджень

Для реалізації поставленої мети, на першому етапі досліджень, проводили аналіз досвіду виготовлення та застосування сталевих литих валків існуючого виробництва для рейкобалкового стану.

На другому етапі, проводили пошук та розробку аналогічного матеріалу для ефективного використання сплаву для подібного призначення формуючого інструменту [4, 5]. При цьому особливу увагу приділяли розробці технології термозміцнення.

При виконанні першого етапу, проводили аналіз експлуатаційної стійкості валків компанії "United States Steel Corporation" [1], показав 650 тис. тонн прокату металу до повного зносу. При цьому валки до кінця кампанії мали незначні дефекти.

Від торців двох валків були взяті проби для аналізу хімічного складу, проведеного за допомогою оптико-емісійного спектрометра Metavision-1008i. Аналіз механічних властивостей зразків проводили за стандартними методиками. Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних зразків наведені у табл.1, 2.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сплавів

Умовний номер зразка	Вміст компонентів, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
1	0,94	0,87	0,38	0,89	0,11	0,42	0,039	0,045
2	0,98	0,92	0,40	1,00	0,08	0,42	0,039	0,045

Для проведення другого етапу досліджень, відливали зразки заевтектоїдних сплавів наступного хімічного складу, %: 1.05-2.05C; 0.68-0.96Mn; 0.27-0.51Si; 0.05-0.50Cr; 0.1-0.60Ni; 0.20-0.40Se; 0.0025-0.0050B; 0.021-0.031S; 0.020-0.030P.

Для дослідження такої можливості проведена виплавка в 200кг індукційної печі з кислим футеруванням [6]. В якості шихти застосовували вуглецевий брухт, синтетичний чавун і для модифікування використовували введення церію, бору або здійснювали їх спільне введення. З кожної плавки виготовляли виливки масою по 50кг з різним вмістом вуглецю і типом модифікуючої присадки.

Таблиця 2

Механічні властивості валків (середні значення з 5-ти вимірів)

Умовний номер зразка	Властивості					
	σ_b , Н/мм ²	σ_t , Н/мм ²	δ , %	ψ , %	KCU, кгс/см ²	НВ, кг/мм ²
1	700	352	6,7	14,0	1,2	207
2	665	355	7,5	13,2	1,0	205

Сплав заливали в земляні та металеві форми ($t_{\text{форми}}=200^\circ\text{C}$, а $t_{\text{сплаву}}=1465-1526^\circ\text{C}$). Порівняльним дослідженням піддавали 9 варіантів плавок. Одну частину металу модифікували у спеціальній ємності церієм, який вводили у складі мішметалу – 58-60% Се. Перед його введенням сталь розкиснювали Al та SiCa. При цьому, по 4 виливка виготовляли до- і після модифікування. Бор вводили в сталь у складі феробору з розрахунку за цим компонентом 0,0025%. Перед присадкою сталь також розкиснювали.

Результати досліджень

Перший етап досліджень. За результатами проведеного аналізу встановлено, що досліджувані сплави відносяться до низьколегованих заевтектоїдних сталей, леговані хромом (0,89-1,0%) та молібденом (0,42%), досить стабільного складу. Метал цих валків характеризується відносно низькою концентрацією кремнію та шкідливих домішок – сірки та фосфору.

Механічні властивості також є стабільними і мають середні показники властивостей міцності такі, що не привели до зниження напрацювання інструменту і не сприяли пошкодженості їх робочої поверхні протягом усього періоду їх експлуатації.

Аналіз мікроструктури таких валків виявив їхню однорідність, без наявності карбідної сітки, характерної для заевтектоїдних сталей (рис. 1).

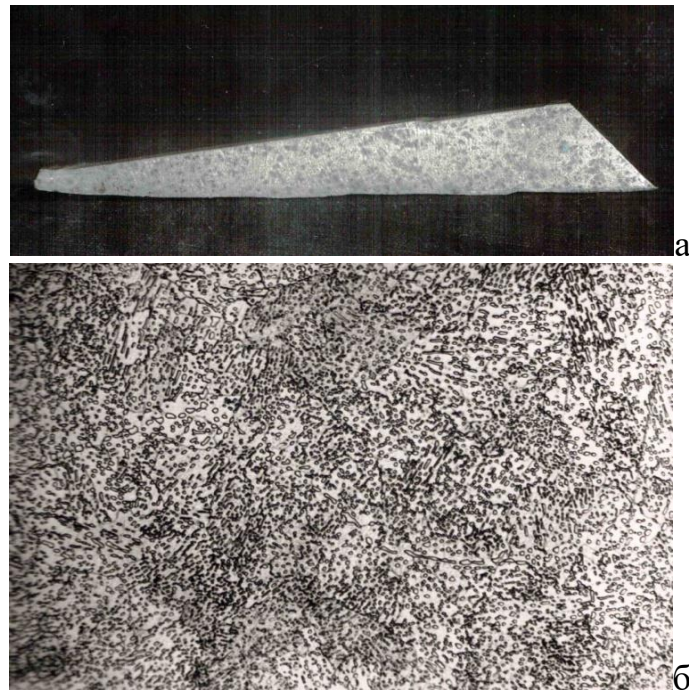


Рис. 1. Макро (а) та мікроструктура, $\times 100$, (б) досліджуваного сплаву

Такі литі валки були використані в чорновій групі клітей замість сталевих кованих і показали підвищення стійкості в 1,5-2,5 рази вище, а вартість їх виготовлення в 2-3 рази нижче, що пов'язано з великим числом переділів при їх виготовлення (використовується дороге кувальне обладнання та великі витрати енергоносіїв).

Різноманітність різних вимог до матеріалу валків, як вказувалося раніше, визначаються областю їх використання.

Валки з доевтектоїдної сталі характеризуються досить високою в'язкістю, але мають низьку зносостійкість. Цей недолік певною мірою усувається при заміні таких сталей на евтектоїдні. Підвищену в'язкість можна збільшити шляхом термообробки, що забезпечує формування зернистої структури перліту, це забезпечує підвищення зносостійкості в 2-4 рази в порівнянні з валками з легованої евтектоїдної сталі з наявністю окремих виділень цементиту по границях зерен (рис. 2).

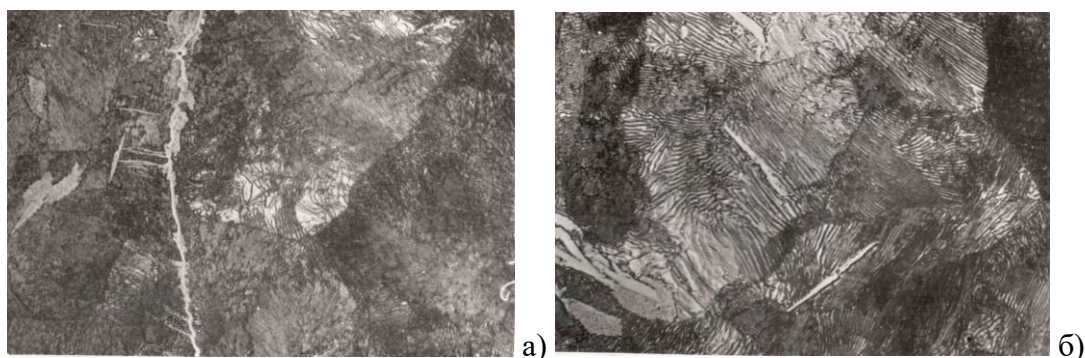


Рис. 2. Мікроструктура досліджуваних зразків легованої доевтектоїдної сталі (див. табл.1 та 2) в сирому стані з виділеннями цементиту по границям зерен, $\times 1000$, №1 (а) та №2 (б)

Другий етап досліджень. Найбільший інтерес для виготовлення валків представляють сталі заевтектоїдного складу з вмістом вуглецю 1,0-2,0%, що може забезпечити підвищення твердості прокатного інструменту та його зносостійкість.

Зразки, що отримували при відливанні, піддавали термічній обробці [7] за режимами:

- відпал при $t=750^{\circ}\text{C}$, витримкою $\tau=5\text{ч}$ і охолодженням з пічкою (I режим);
- сфероїдизуючий відпал при $t=720-750^{\circ}\text{C}$ і $\tau=2\text{ч}$. Такі зразки попередньо нормалізували при $t=900-950^{\circ}\text{C}$ і $\tau=5-10\text{ч}$ залежно від вмісту вуглецю (II режим);
- сфероїдизуючий відпал при $t=750^{\circ}\text{C}$ і $\tau=2\text{ч}$. Зразки попередньо проходили гомогенізацію за режимом: нагрівання 1050°C , витримка = 5 год, охолодження з пічкою до $t = 850^{\circ}\text{C}$, витримка = 5 год і охолодження на повітрі (III режим).

Порівняльними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням вмісту вуглецю в досліджуваному інтервалі концентрацій у сталях без модифікування $\sigma_{\text{в}}$, в середньому, підвищується від 380 Н/мм^2 до $445,0-450,0 \text{ Н/мм}^2$ при частці до 1,48% С, а потім знижується до 315 Н/мм^2 . Така ж тенденція зберігається і для границі плинності $\sigma_{\text{т}}$. До 1,48% С ця характеристика збільшується з $380,0$ до 420 Н/мм^2 , а потім знижується до 315 Н/мм^2 . Показники пластичності та ударної в'язкості дуже низькі: δ_5 , ψ , КСУ – не перевищують 0,5%. Одночасно з підвищенням вуглецю твердість підвищується з 290 до 339НВ при вмісті до 2,0%С.

Модифікування церієм, незалежно від концентрації вуглецю, підвищує значення $\sigma_{\text{в}}$ до $410,0-495,0 \text{ Н/мм}^2$. Мінімальні значення притаманні сталі з 2,0%С.

Модифікування бором ефективно тільки для сталей з вуглецем до 1,3%, а за більш високої концентрації міцність знижується до $170,0-250,0 \text{ Н/мм}^2$. У цих плавках найвища твердість і досягає 292-350НВ. Пластичні властивості і $\sigma_{\text{т}}$ дуже низькі.

Найбільший ефект у підвищенні властивостей досягається термічною обробкою. Це притаманно всім модифікованим сталям. Проте, оптимальний рівень досягається при спільному введенні модифікуючих присадок церію і бору, при використанні режимів сфероїдизації матриці (режими II і III) та виключенням формування карбідної сітки. В цьому випадку $\sigma_{\text{в}}=700,0-720,0 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_{\text{т}}=495,0-550,0 \text{ Н/мм}^2$, $\delta_5=2,8-3,8\%$, а рівень твердості 215-247НВ, тобто такий матеріал буде ефективним для використання для валків у чорнових та обтискних клітях станів.

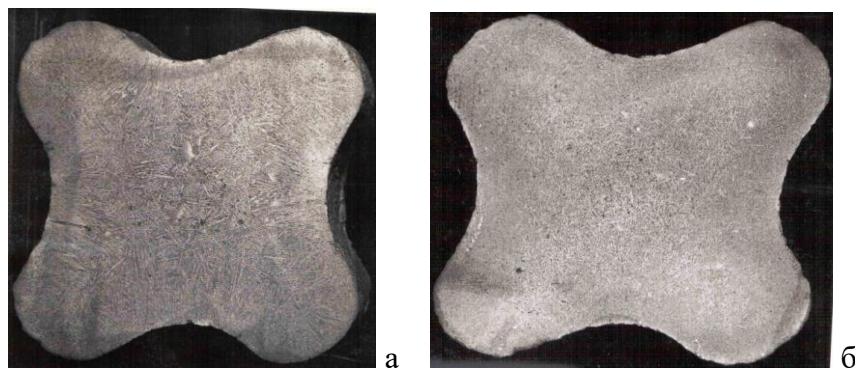


Рис. 3. Макроструктура поперечних темплетів: а) без присадки церію; б) з присадкою 0,2 Се% і 0,025% В

Модифікування та термообробка забезпечують формування однорідної структури без грубої дендритної будови та повної сфероїдизації матриці. На рис.3 порівняльно наведена макроструктура досліджуваних темплетів, де видно, що модифікування виключає отримання грубої дендритної структури. При цьому вилівок у земляну форму формує більш неоднорідний розподіл домішок, ніж у металеву.

Оцінку неоднорідності проводили за сірчаними відбитками за методом Баумана (див. рис. 3).

Встановлено, що найкраща сфероїдизація матриці і дроблення карбідної сітки досягається при термічній обробці сталі до 1,3%С (рис. 4) за режимами II і III.

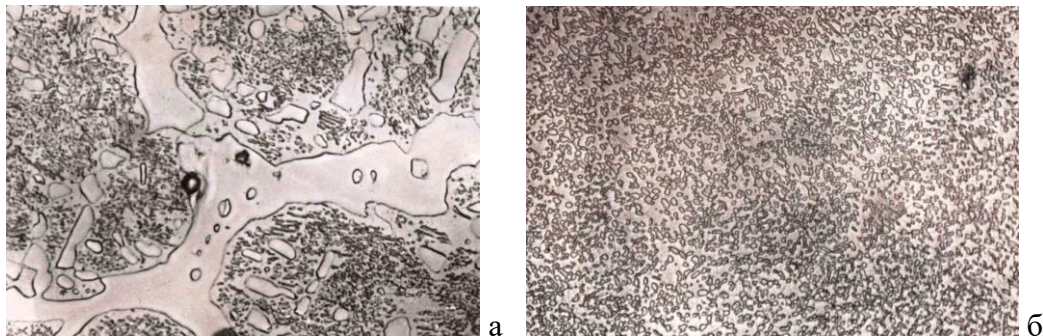


Рис. 4. Мікроструктура вуглецевої сталі до (а) та після (б) термічної обробки, $\times 1000$

Практичні рекомендації

Узагальнюючи отримані результати досліджень, необхідно зазначити доцільність застосування литих валків із вуглецевої заевтектоїдної сталі замість сталевих кованих. Також це обумовлюється більш низькою вартістю виготовлення та вищою стійкістю такого інструменту за умов експлуатації.

Висновки

1. В результаті проведених досліджень вуглецевої сталі за запропонованими режимами термообробки встановлено, що вони забезпечують як дроблення карбідної фази, так і повну сфероїдизацію матриці.

2. Показано, що використання запропонованих режимів термообробки дозволяє забезпечити більш високий рівень властивостей, ніж у відомих валках з низьколегованої сталі.

Список використаних джерел

1. Производство и применение прокатных валков: Справочник: под ред. проф. Скобло Т.С. Харків. ЦД № 1. 2013. 572 с.
2. Дерябкіна Є.С., Жежер М.Н. Вплив термічної обробки на схильність до МКК зварних сполук низьконікелевої корозійностійкої сталі з азотом. *Машинобудування*. 2012. №9. С. 78–86.
3. Дерябкіна Є.С. Аналіз основ зміцнення низьколегованих сталей та вибір зварювальних матеріалів для багатодугового зварювання під флюсом труб із сталі 17Г1С-У. *Машинобудування*. 2016. №25. С. 111–119.
4. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л., Сидашенко А.И. Исследование структуры высокохромистых чугунов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. № 83(5). С. 27–38.
5. Skoblo T.S., Klochko O.Y., Belkin E.L., Romanchenko V.N. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation. *Lett. Mater.* 2021. Vol. 11(1). P. 22–27. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-1-22-27>.
6. Sidashenko A. Effective technological process of crystallization of turning rollers' massive. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2017. Vol. 2.

Issue 3. P. 34–39. <https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20170203.12>.

7. Skoblo T.S., Klochko O.Y., Sidashenko A.I. et al. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. *Steel Transl.* 2013. Vol. 43. P. 603–606. <https://doi.org/10.3103/S096709121309012X>.

References

1. Proizvodstvo i primenenie prokatnyh valkov: Spravochnik. (2013). Pod red. prof. Skoblo T.S. Kharkiv. CD № 1. 572 s.

2. Deryabkina E.S., Zhezher M.N. (2012). Vliyanie termicheskoy obrabotki na sklonnost' k MKK svarnyh soedinenij nizkonikelevoj korozionnostojkoy stali s azotom. *Mashinobuduvannya.* №9. S. 78–86.

3. Deryabkina E.S. (2016). Analiz osnov uprochneniya nizkolegirovannyh stalej i vybor svarochnyh materialov dlya mnogodugovoy svarki pod flyusom trub iz stali 17G1S-U. *Mashinobuduvannya.* №25. S. 111–119.

4. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L., Sidashenko A.I. (2017). Issledovanie struktury vysokohromistyh chugunov. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov.* Vol. 83(5). P. 27–38.

5. Skoblo T.S., Klochko O.Y., Belkin E.L., Romanchenko V.N. (2021). Features of the carbide phase degradation under heating and deformation. *Lett. Mater.* Vol. 11(1). P. 22–27. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-1-22-27>.

6. Sidashenko A. (2017). Effective technological process of crystallization of turning rollers' massive. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy.* Vol. 2. Issue 3. P. 34–39. <https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20170203.12>.

7. Skoblo T.S., Klochko O.Y., Sidashenko A.I. et al. (2013). Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. *Steel Transl.* Vol. 43. P. 603–606. <https://doi.org/10.3103/S096709121309012X>.