

В. А. Луценко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4604-5592

Т. М. Голубенко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-3583-211X

О. В. Луценко, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-8298-5306

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ЗІ ЗМІШАНОЮ СТРУКТУРОЮ

Анотація. Мета роботи полягала у дослідженні шляхів скорочення тривалості режиму проміжної термічної обробки легованих сталей із забезпеченням необхідного рівня властивостей та зниженням енергетичних витрат. Для подальшої механічної переробки легованого металопрокату необхідно отримати вихідний прокат зі структурою, яка має високу пластичність та низьку твердість. Для досягнення необхідних механічних властивостей проводиться спеціальна пом'якшувальна термічна обробка – відпал при підкритичних температурах ($A_1 - 25...40\text{ }^\circ\text{C}$) із тривалою витримкою. Завдяки відпалу проходять структурні перетворення і структура, що утворюється, має зернисту морфологію. Дослідженнями встановлено, що у сталях зі змішаною структурою у процесі відпалу структурні перетворення починаються з термодинамічно менш стійких структур. Для середньовуглецевих сталей, легованих такими елементами, як хром, молібден, ванадій, збільшення швидкості охолодження після гарячої прокатки в $\sim 1,5$ рази дозволяє отримати структуру, більш сприйнятливую до відпалу. Так, для хромомолібденової сталі структура складається з не менше 80% бейніту, $\sim 15\%$ фериту та 5% перліту. Для хромомолібденованадієвої сталі основу структури становить бейніт ($\sim 90\%$), мартенсит ($\sim 5\%$) та ферит (до 5%). В отриманих структурах при подальшому відпалі структурні перетворення протікають за знижених температур і вимагають меншої тривалості витримки. Значення твердості та міцності досліджуваних сталей, оброблених за скороченим режимом, знижуються на 15-30%, а показники пластичності підвищуються на $\sim 50\%$. Отримання після прокатки такої структури дозволяє прискорити проміжну термічну пом'якшувальну обробку, за рахунок чого знизити енергетичні витрати, і забезпечити високу пластичність сталі перед механічною обробкою (штампування, кування, тощо).

Ключові слова: легування, прокат, структурні перетворення, відпал, сфероїдизація, твердість, механічні властивості.

Посилання для цитування: Луценко В. А., Голубенко Т. М., Луценко О. В. Енергозберігаюча термічна обробка легованих сталей зі змішаною структурою. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 397-403. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-397-403.

Актуальність проблеми. У металургійній галузі мінливість обсягів замовлень на машинобудівну продукцію вимагає впровадження гнучких рішень зі збереженням рентабельності виробництва та економії ресурсів.

Сучасне машинобудування залежить від виробництва прокату з легованих сталей, які відповідають високим вимогам експлуатаційних властивостей. Надання металовиробам необхідних якісних характеристик (міцності, пластичності, твердості) є основною метою застосування термічної обробки сталі. У процесі виробництва прокат піддається різній механічній обробці (штампування, кування, волочіння тощо), яка надає необхідний розмір та форму готовому металовиробу. Перед механічною обробкою сталь повинна мати низькі параметри міцності та високу пластичність, в іншому випадку обробка ускладнюється, підвищується зношування обладнання та збільшується ймовірність появи дефектів металу.

Деякі металургійні підприємства прагнуть отримати вихідний прокат з ферито-перлітною структурою, яка має високу пластичність. Для цього застосовуються технології уповільненого охолодження, які дозволяють запобігти появі зміцнювальних структур. Але проведення уповільненого охолодження вимагає встановлення додаткового обладнання, що для деяких підприємств неможливо через обмежені потужності та площі. Частіше на металургійних і машинобудівних підприємствах для забезпечення високої пластичності традиційно використовують пом'якшувальну термічну обробку (відпал) при підкритичних температурах, переважно при $A_1 - 25...40$ °С, із тривалою ізотермічною витримкою [1]. Протягом відпалу проходять структурні перетворення і структура, що утворюється, являє собою зернистий перліт [2, 3].

Відомо, що структурні перетворення при термічній обробці починаються з фаз, які мають меншу термодинамічну стабільність, а саме фаз, утворених за проміжним та зсувним механізмом (бейніт, мартенсит [4, 5]). У сталях із перлітною структурою для початку перетворень необхідний більший термодинамічний стимул: підвищена температура, час, термоциклювання тощо. Тому отримати сфероїдизовану структуру в сталях перлітного класу значно складніше, бо це потребує тривалого часу обробки. Велика тривалість (від 16 годин) проміжної термічної обробки (відпалу) спричиняє підвищену витрату енергоносіїв. Тому вивчалася можливість покращення технологічності виробництва легованого прокату із забезпеченням необхідних механічних властивостей та скороченням витрати енергоресурсів.

У зв'язку з викладеним вище, мета цієї роботи полягала у дослідженні шляхів скорочення тривалості режиму проміжної термічної обробки легованих сталей із забезпеченням необхідного рівня властивостей та зниженням енергетичних витрат.

Матеріал і методи дослідження. При проведенні досліджень використані зразки від промислових партій прокату зі сталей 42CrMo4 (EN 10083-1:2006) та 31CrMoV9 (EN 10085:2001), охолоджених після прокатки за традиційною та експериментальною технологією з підвищеною у ~1,5 рази швидкістю охолодження. Хімічний склад

досліджених сталей представлено в таблиці 1. Об'ємну частку структурних складових оцінювали згідно з ГОСТ 8233-56, механічні властивості визначали згідно за ГОСТ 1497-84 на розтяг і ГОСТ 9450-76 на твердість.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних сталей.

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % мас.							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
42CrMo4	0,39	0,23	0,74	0,010	0,024	1,04	0,24	-
31CrMoV9	0,33	0,27	0,62	0,012	0,029	2,58	0,21	0,17

Результати дослідження та їх обговорення. Дослідженнями встановлено, що в сталях з ферито-перліто-бейнітною (змішаною) структурою в процесі відпалу при зниженій температурі ($A_1 - 100...150$ °C) структурні перетворення в основному відбуваються в бейніті, що підтверджується зниженням його мікротвердості [6, 7]. Тому для скорочення режиму термічної обробки досліджених сталей рекомендується підвищити швидкість охолодження після прокатки та забезпечити підвищену кількість нестабільних структур – бейніту й мартенситу.

Як відомо, легування хромом і молібденом приводить до зміщення ліній на термодинамічній діаграмі та сприяє розпаду переохолодженого аустеніту за зсувним та проміжним механізмом [5]. Тому після гарячої прокатки та охолодження за традиційною технологією структура досліджуваних сталей змішана й складається з кількох фаз. Мікроструктурні дослідження сталі 42CrMo4 показали (рис. 1, а) наявність бейніту ~50%, структурно-вільного фериту (~20%) та перліту (~30%). Структура сталі 31CrMoV9 складалася з ~75% бейніту, ~10% перліту та ~15% фериту (рис. 1, б), і завдяки підвищеному в 2,5 рази вмісту хрому, повне перлітне перетворення, згідно з термодинамічною діаграмою [8], можливе тільки при низьких швидкостях охолодження. Наявність проміжної структури призводить до підвищення характеристик міцності сталей [3]. Така структура незадовільна для механічної обробки, проте підходить як вихідна структура перед наступною пом'якшувальною обробкою.

Для середньовуглецевих сталей, легуваних хромом, молібденом та ванадієм, завдяки додатковим технологічним заходам, вдалося підвищити швидкість охолодження після прокатки в ~1,5 рази. Більш істотне збільшення швидкості охолодження прокату великого перерізу небажане, оскільки може призвести до жолоблення. Завдяки підвищенню швидкості охолодження металу його структура (рис. 2) складалася з:

- для сталі 42CrMo4: ~ 80% бейніту, ~ 5% перліту та ~ 15% фериту;
- для сталі 31CrMoV9: ~90% бейніту, ~5% мартенситу та фериту до 5%.

Сталь після прискореного охолодження піддавалася пом'якшувальній термічній обробці за скороченим (від традиційних значень) режимом зі

зниженою на 30...50°C температурою та зменшенням на 2 години часом витримки. Після відпалу при температурі A_1 - 60...90 °C структура всіх досліджених сталей складалася з зернистого перліту різної дисперсності (рис. 3).

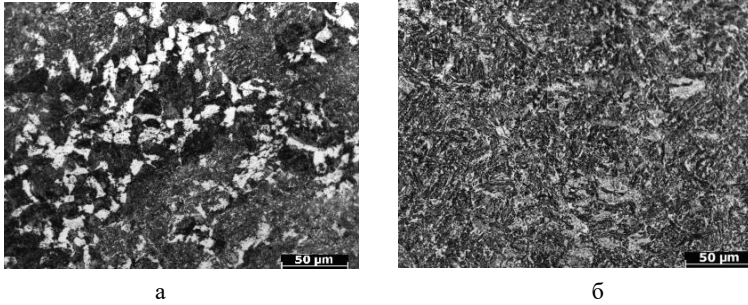


Рисунок 1 – Структура досліджуваних сталей після прокатки за традиційною технологією: а – 42CrMo4, б – 31CrMoV9.

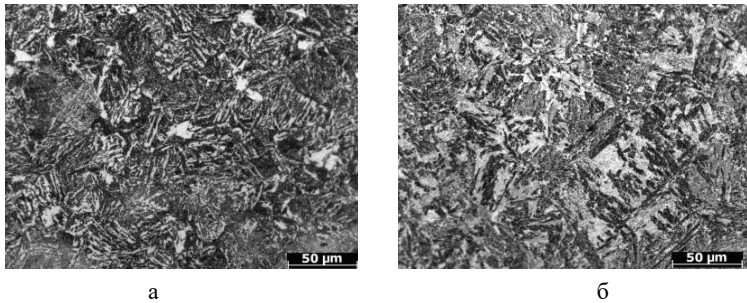


Рисунок 2 – Структура досліджуваних сталей після прокатки за прискореною технологією: а – 42CrMo4, б – 31CrMoV9.

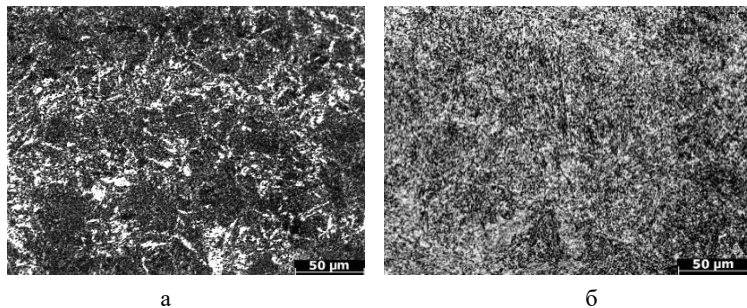


Рисунок 3 – Структура досліджуваних сталей після пом'якшувальної термічної обробки: а – 42CrMo4, б – 31CrMoV9.

В структурі досліджуваної сталі карбіди розташовані групами у феритній матриці та мають дисперсність від 1 до 5 балу. Зміна морфології карбідів приводить до підвищення пластичності досліджуваних сталей, це підтверджують значення механічних властивостей, поданих у таблиці 2.

Таблиця 2 – Механічні властивості досліджуваних сталей (середні значення).

Марка сталі	Межа міцності, σ_b , МПа		Відносне подовження, δ_5 , %		Відносне звуження, ψ , %		Твердість, НВ	
	г/к	після відпалу	г/к	після відпалу	г/к	після відпалу	г/к	після відпалу
42CrMo4	910	720	15	19	40	62	285	215
31CrMoV9	1100	785	14	20	47	65	388	238
Примітка. г/к –після гарячої прокатки та охолодження								

Значення твердості та міцності досліджуваних сталей, оброблених за скороченим режимом, знижуються на 15-30% та відповідають вимогам нормативної документації (EN 10083-1:2006 та EN 10085:2001), при цьому показники пластичності (відносне подовження і відносне звуження) підвищуються на ~50%.

Використовуючи такий метод формування структури, вдалося при відпалі легованого прокату знизити (на 3 години) тривалість нагрівання та ізотермічної витримки, що дозволило заощадити електроенергію і скоротити виробничий цикл використання термоустаткування.

Таким чином, збільшення швидкості охолодження в ~1,5 рази (від традиційних значень) сприяє отриманню структури, яка піддається відпалу при нижчих температурах, що дозволяє прискорити проміжну пом'якшувальну термічну обробку та за рахунок цього знизити енергетичні та виробничі витрати, а також забезпечити високу пластичність металу перед механічною обробкою.

Висновки

Результати досліджень показали, що для прокату з середньовуглецевих легованих сталей збільшення швидкості охолодження в ~1,5 рази сприяє утворенню переважно бейнітної структури, в якій при подальшій пом'якшувальній термічній обробці проходять структурні перетворення при знижених температурах та зі скороченням часу обробки. Поява сфероїдизованої структури знижує міцність і твердість сталі, забезпечуючи легке деформування металу на наступних переділах.

Перелік посилань

1. Structure formation in the heat treatment of alloy steel bar / V. A. Lutsenko, P. A. Bobkov, T. N. Golubenko, L. A. Drobyshevskii, V. I. Gritsaenko // *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43. Issue 6. P. 394-398.

2. Harisha S. R., Sharma S. S., Kini U. A. Influence of spheroidizing heat treatment on mechanical properties of EN47 steel. *Materials Science Forum 2017*. Vol. 880. P. 136-139.
3. Xiaomin Y., Shanshan H., Yiwei Z., Lei Y. Effects of controlled cooling process on microstructure and mechanical properties of 12Cr1MoV boiler steel. *Heat Treatment Of Metals*. 2015. Vol. 40. Issue 6. P. 116-119.
4. Bhadeshia, H. K. D. H. Bainite in steels: theory and practice. CRC Press, 2019. 600 p.
5. Гудремон Э. Специальные стали / пер. с нем. под. ред. А. С. Займовского, М. Л. Бернштейна, В. С. Мескина. В 2 т., изд. 2-е. Москва : Металлургия, 1966. 1274 с.
6. Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment / V. A. Lutsenko, N. I. Anelkin, T. N. Golubenko, V. I. Shcherbakov, O. V. Lutsenko // *CIS Iron and Steel Review*. 2012. № 1. P. 38-40.
7. Lutsenko V. A, Golubenko T. N., Lutsenko O. V. Features of annealing of alloy steels with mixed structure. *Chernye Metally*. 2021. Issue 4. P. 39-43. DOI: 10.17580/chm.2021.04.07.
8. Abrams Premium Steel. Description 31CrMoV9, AISI/SAE 1.8519. Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG, Osnabrueck, Germany.

Reference

1. Structure formation in the heat treatment of alloy steel bar / V. A. Lutsenko, P. A. Bobkov, T. N. Golubenko, L. A. Drobysheskii, V. I. Gritsaenko // *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43. Issue 6. P. 394-398.
2. Harisha S. R., Sharma S. S., Kini U. A. Influence of spheroidizing heat treatment on mechanical properties of EN47 steel. *Materials Science Forum 2017*. Vol. 880. P. 136-139.
3. Xiaomin Y., Shanshan H., Yiwei Z., Lei Y. Effects of controlled cooling process on microstructure and mechanical properties of 12Cr1MoV boiler steel. *Heat Treatment Of Metals*. 2015. Vol. 40. Issue 6. P. 116-119.
4. Bhadeshia, H. K. D. H. Bainite in steels: theory and practice. CRC Press, 2019. 600 p.
5. Gudremon E. Spetsial'nyye stali [Special steels] / A.S. Zaymovskiy, M.L. Bernsteyn, V.S. Meskin (Ed., Trans.). Vol. 2. Moskva: Metallurgiya, 1966. 1274 p. [In Russian]
6. Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment / V. A. Lutsenko, N. I. Anelkin, T. N. Golubenko, V. I. Shcherbakov, O. V. Lutsenko // *CIS Iron and Steel Review*. 2012. № 1. P. 38-40.
7. Lutsenko V. A, Golubenko T. N., Lutsenko O. V. Features of annealing of alloy steels with mixed structure. *Chernye Metally*. 2021. Issue 4. P. 39-43. DOI: 10.17580/chm.2021.04.07.
8. Abrams Premium Steel. Description 31CrMoV9, AISI/SAE 1.8519. Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG, Osnabrueck, Germany.

V. A. Lutsenko, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4604-5592
T. M. Golubenko, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-3583-211X
O. V. Lutsenko, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-8298-5306

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

ENERGY-SAVING SOFTENING HEAT TREATMENT OF ALLOY STEELS

Summary. The purpose of the work was to research ways to reduce the duration of the intermediate heat treatment mode of alloy steels while ensuring the required level of properties and reducing energy costs. For further mechanical processing of alloy rolled metal, it is necessary to obtain the original rolled product with a structure that has high plasticity and low hardness. In order to achieve the required mechanical properties, a special softening heat treatment is carried out - annealing at subcritical temperatures (A1 - 25...40 °C) with a long exposure. Thanks to annealing, structural transformations take place and the resulting structure has a granular morphology. Research has established that in steels with a mixed structure during annealing, structural transformations begin with thermodynamically less stable structures. For medium-carbon steels alloyed with such elements as chromium, molybdenum, vanadium, increasing the cooling rate after hot rolling by ~1.5 times makes it possible to obtain a structure that is more susceptible to annealing. Thus, for chrome-molybdenum steel, the structure consists of at least 80% bainite, ~15% ferrite and 5% pearlite. For chromium molybdenum vanadium steel, the basis of the structure is bainite (~90%), martensite (~5%) and ferrite (up to 5%). In the resulting structures, upon subsequent annealing, structural transformations occur at reduced temperatures and require a shorter exposure time. The values of hardness and strength of the studied steels processed under the reduced regime decrease by 15-30%, and the plasticity indicators increase by ~50%. Obtaining such a structure after rolling makes it possible to speed up the intermediate thermal softening treatment, thereby reducing energy costs, and ensuring high plasticity of steel before mechanical processing (stamping, forging, etc.).

Keywords: alloying, rolling, structural transformations, annealing, spheroidization, hardness, mechanical properties.

For citation: Lutsenko V. A., Golubenko T. M., Lutsenko O. V. Enerhozberihaiucha termichna obrobka lehovanykh stalei zi zmishanoi strukturoiu [Energy-saving softening heat treatment of alloy steels]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 397-403. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-397-403.

*Стаття надійшла до редакції збірника 03.11.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*