

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ПОМ'ЯКШУВАЛЬНА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Луценко В.А., д.т.н., ст.н.с., Голубенко Т.М., к.т.н., Луценко О.В., к.т.н.
Інститут чорної металургії імені З.І. Некрасова НАН України

Анотація. Дослідженнями встановлено, що у сталях зі змішаною структурою при подальшому відпалі структурні перетворення протікають за знижених температур і вимагають меншої тривалості витримки. Отримання після прокатки такої структури дозволяє прискорити проміжну термічну пом'якшувальну обробку, за рахунок чого знизити енергетичні витрати, і забезпечує високу пластичність сталі перед механічною обробкою.

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

RESOURCE-SAVING SOFTENING HEAT TREATMENT OF ALLOY STEELS

V.A. Lutsenko, Dr. Eng., Senior Researcher,
T.M. Golubenko, Pr.D., O.V. Lutsenko, Pr.D.,
Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

Abstract. By investigation it was established that in steels with a mixed structure, upon further annealing, structural transformations occur at lower temperatures and require a shorter exposure time. Receiving such structure after rolling, allows to speed up intermediate softening heat treatment, thereby reducing energy costs, and provides high ductility of steel before mechanical processing.

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

Вступ

У сучасній металургійній галузі відбувається зниження завантаження виробничих потужностей із одночасною втратою традиційних ринків збуту металодукції. Достатній рівень експорту металопродукції досягнуто за рахунок низького її споживання на внутрішньому ринку [1]. Мінливість обсягів замовлень на машинобудівну продукцію в сучасних умовах вимагає впровадження гнучких рішень зі збереженням рентабельності виробництва та економії ресурсів [2].

Виробництво прокату з легованих сталей особливо важливе для машинобудування. Сучасне машинобудування ставить все більш високі вимоги до експлуатаційних властивостей матеріалів, тому в останні роки збільшується число нових марок легованої сталі. Основна увага при розробці марок сталі зосереджена на одержанні необхідних механічних властивостей водночас із раціональним використанням ресурсів.

Аналіз публікацій

Сортовий прокат круглого перерізу виробляється у великих обсягах із різних марок сталей і часто є вихідним матеріалом для виробництва різних металовиробів. Основна мета застосування термічної обробки сталі – це надання металовиробам необхідних якісних характеристик: міцності, пластичності, твердості тощо. Багато металургійних підприємств прагнуть отримати вихідний прокат з ферито-перлітною структурою, який має високу пластичність. Для цього широко застосовуються технології уповільненого охолодження, які дозволяють запобігти появі зміцнювальних структур. Проведення уповільненого охолодження вимагає встановлення додаткового обладнання, що для деяких підприємств неможливо через обмежені потужності та площі. 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 [3], в іншому випадку обробка ускладнюється, підвищується зношування обладнання та збільшується ймовірність появи дефектів металу. Для забезпечення високої пластичності на металургійних і машинобудівних підприємствах традиційно використовують пом'якшувальну термічну обробку (відпал) при підкритичних температурах, переважно при $A_1 - 25...40$ °C з тривалою ізотермічною витримкою [4]. Протягом відпалу проходять структурні перетворення і структура, що утворюється, являє собою зернистий перліт [5, 6].

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 [7, 8]). 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 потребує тривалого часу обробки. Велика тривалість (від 16 годин) проміжної термічної обробки (відпалу) спричиняє підвищену витрату енергоносіїв [9]. 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 режиму проміжної термічної обробки легованих сталей із забезпеченням необхідного рівня властивостей.

Результати досліджень та їх обговорення

При проведенні досліджень використані зразки від промислових партій прокату круглого перерізу діаметром 140 мм і 90 мм із сталей 42CrMo4 (EN 10083-1:2006 [10]) та 31CrMoV9 (EN 10085:2001 [11]) відповідно, охолоджених

після прокатки за традиційною технологією та експериментальною технологією з підвищеною у $\sim 1,5$ рази швидкістю охолодження. Хімічний склад досліджених сталей представлено в таблиці 1.

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

Дослідженнями встановлено, що в сталях з ферито-перліто-бейнітною (так званою змішаною [12] або мультифазною [13]) структурою в процесі відпалу при низькій температурі ($A_1 - 100...150$ °C) структурні перетворення в основному відбуваються в бейніті, що підтверджується зниженням його мікротвердості [12]. Тому для скорочення режиму термічної обробки досліджених сталей рекомендується підвищити швидкість охолодження після прокатки та забезпечити підвищену кількість нестабільних структур – бейніту (мартенситу).

Як відомо, легування хромом і молібденом приводить до зміщення ліній на термодинамічній діаграмі [12] та сприяє розпаду переохолодженого аустеніту за зсувним та проміжним механізмом [8, 14]. Після гарячої прокатки та охолодження за традиційною технологією структура досліджуваних сталей змішана і складається з кількох фаз. Мікроструктурні дослідження сталі 42CrMo4 показали (рис. 1, а) наявність бейніту $\sim 50\%$, структурно-вільного фериту ($\sim 20\%$) та перліту ($\sim 30\%$). Структура сталі 31CrMoV9 складалася з $\sim 75\%$ бейніту, $\sim 10\%$ перліту та $\sim 15\%$ фериту (рис. 1, б) і завдяки підвищеному в 2,5 рази вмісту хрому, повне перлітне перетворення, згідно з термодинамічною діаграмою [15], можливе тільки при низьких швидкостях охолодження.

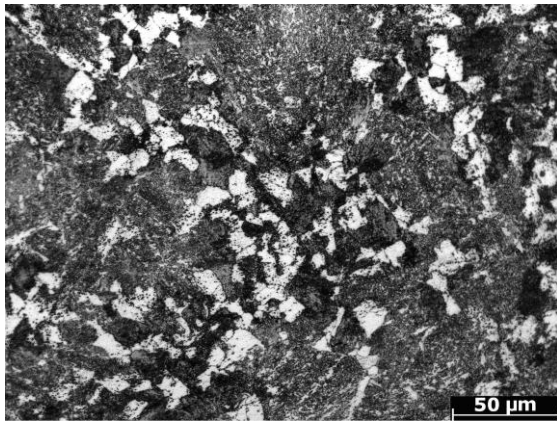
Наявність проміжної структури призводить до підвищення характеристик міцності сталей [16, 17]. Така структура незадовільна для механічної обробки, проте походить як вихідна структура перед проміжною пом'якшувальною обробкою.

Для середньовуглецевих сталей, легуваних хромом, молібденом та ванадієм, завдяки додатковим технологічним заходам, вдалося підвищити швидкість охолодження після прокатки в $\sim 1,5$ рази. Більше істотне збільшення швидкості охолодження прокату великого перерізу небажане, оскільки може призвести до жолоблення.

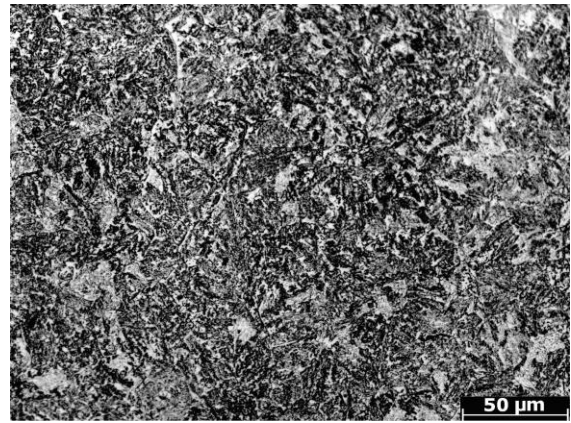
Завдяки підвищенню швидкості охолодження металу його структура (рис. 2) складалася з:

- 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 температурою та зменшеним на 2 години часом витримки.

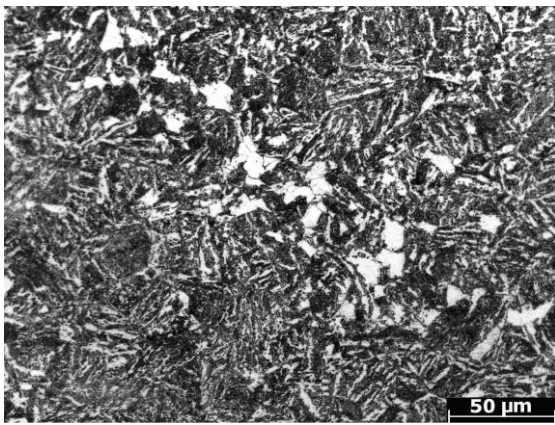


а

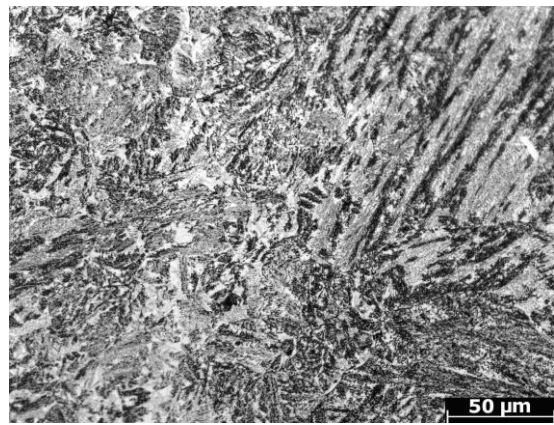


б

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

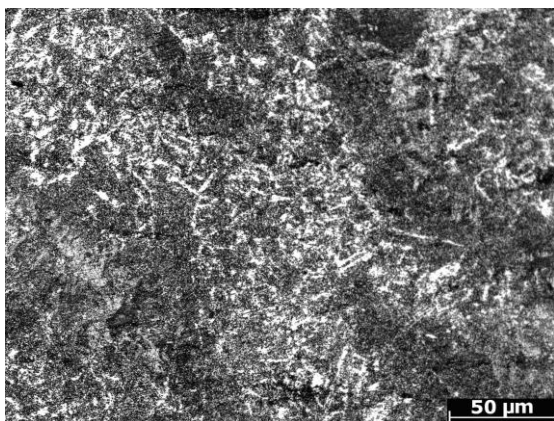


а

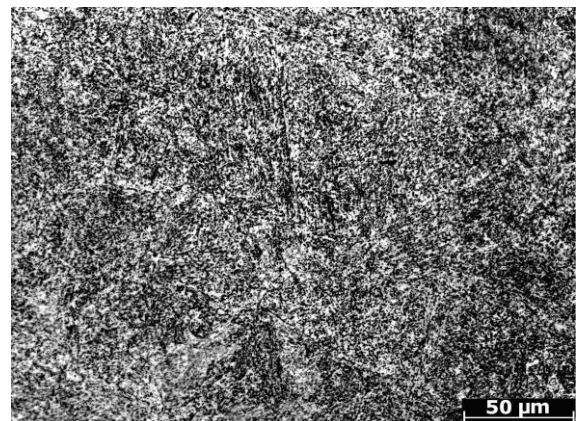


б

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



а



б

Рисунок 3 – Структура досліджуваних сталей після сфероїдизуючої термічної обробки:
а – 42CrMo4, б – 31CrMoV9

Після відпалу при температурі $A_1 - 60...90\text{ }^\circ\text{C}$ структура всіх досліджених сталей складалася з зернистого перліту різної дисперсності (рис. 3).

Карбіди розташовані групами у феритній матриці на місці попередніх зерен та мають дисперсність до 5 балів. Зміна морфології карбідів приводить до підвищення пластичності [12, 16], що видно із значень механічних властивостей, поданих у таблиці 2. Сталь із отриманою структурою піддається подальшій механічній обробці.

Таблиця 2 – Механічні властивості досліджених сталей (середні значення)

Марка сталі	Межа міцності, σ_b , МПа		Відносне подовження, δ_5 , %		Відносне звуження, ψ , %		Твердість, НВ	
	гарячекатане	після відпалу	гарячекатане	після відпалу	гарячекатане	після відпалу	гарячекатане	після відпалу
42CrMo4		720	15		40		285	215
31CrMoV9		785		20		65	388	238

Значення твердості та міцності досліджуваних сталей, оброблених за скороченим режимом, знижуються на 15-30 % та відповідають вимогам [10, 11], а показники пластичності підвищуються до ~50%.

Використовуючи такий метод формування структури, вдалося при відпалі легованого прокату скоротити час нагрівання та ізотермічної витримки, заощадивши природний газ та електроенергію, скоротивши виробничий цикл використання термоустаткування.

Таким чином, після прокатки збільшення швидкості охолодження в ~1,5 рази (від традиційних значень) сприяє отриманню структури, яка легше піддається відпалу, що дозволяє прискорити проміжну пом'якшувальну термічну обробку та за рахунок чого 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.

Література

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

2. *Лахтин Ю.М.* Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 359 с.
3. *Mašek B., Jirková H., Kučerová L.* Rapid Spheroidization and Grain Refinement Caused by Thermomechanical Treatment for Plain Structural Steel / Materials Science Forum. 2012. Vol. 706. P. 2770-2775.
4. *Karadeniz E.* Influence of different initial microstructure on the process of spheroidization in cold forging / Materials & Design. 2008. Vol. 29. Issue 1. P. 251-256.
5. *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.
6. *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.
7. *Bhadeshia, H. K. D. H.* Bainite in steels: theory and practice. (2019). CRC Press. 600 p.
8. *Гудремон Э.* Специальные стали / пер. с нем. под. ред. А. С. Займовского, М. Л. Бернштейна, В. С. Меськина. В 2 т., изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1966. — 1274 с.
9. *Эль Р., Крузе М., Оклиц Р.* и др. Контролируемая прокатка длинномерной продукции: современное состояние // Черные металлы. 2006. № 10. С. 60-65.
10. DIN EN 10083-1:2006. Стали для закаливания и отпуска. Часть 1. Основные технические условия поставки. — Оpubл. 01.07.2001.
11. DIN EN 10085:2001. Стали азотированные. Технические условия поставки. — Оpubл. 01.07.2001.
12. *Lutsenko V.A., Anelkin N.I., Golubenko T.N., Shcherbakov V.I., Lutsenko O.V.* Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment / CIS Iron and Steel Review. 2012. №1. P. 38-40.
13. *Голованенко С. А., Фоништейн Н. М.* Двухфазные низколегированные стали. – М.: Металлургия, 1986. – 207 с.
14. *Меськин В. С.* Основы легирования стали. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1964. – 685 с.
15. ABRAMS PREMIUM STEEL. Description 31CrMoV9, AISI/SAE 1.8519. Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG, Osnabrueck, Germany. <http://www.premium-steel.co.uk/images/filedownloads/datasheets/1.8519.pdf>
16. *Lutsenko V.A., Golubenko T.N., Lutsenko O.V., Glazunova N.A.* The grain size of austenite in chromium-molybdenumbearing steels after austenitization at different temperatures // Chernye Metally. 2016. № 12. P. 17–20.
17. *Korchunov A.G., Gun G.S., Shiryayev O.P., Pivovarova K.G.* Study of structural transformation of hot-rolled carbon billets for highstrength ropes for responsible applications via the method of thermal analysis // CIS Iron and Steel Review. 2017. Vol. 13. P. 39–42.