

В. А. Луценко¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4604-5592

Т. М. Голубенко¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-3583-211X

О. В. Луценко¹, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-8298-5306

¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ Cr-Mo-V СТАЛІ

Анотація. Основним способом підвищення якісних характеристик сталі є правильно підібрана термічна обробка, мета якої створити структуру, яка б задовольняла вимогам виробника. Суттєво від температури нагрівання при термічній обробці залежить розмір аустенітного зерна в сталі, що в свою чергу впливає на остаточну структуру сталі та механічні властивості після обробки. Дослідну хромомолібденованадієву сталь 31CrMoV9 (EN 10085:2001) нагрівали до температур в інтервалі 850...1050°C та охолоджували у воді й на повітрі. Структурування Cr-Mo-V сталі після нагрівання до різних температур, гартування та відпуску складається з відпущеного мартенситу (включаючи залишковий аустеніт) та легованих карбідів, а після нормалізації – бейніту та мартенситу з різним співвідношенням. Зі збільшенням температури нормалізації в основному відбувається збільшення загальної площі, зайнятої мартенситом без зміни його морфології. Дослідження показали, що підвищення температури нагріву приводить до збільшення кількості мартенситу з 10% при 850°C до 50% при 1050°C, відповідно збільшується мікротвердість сталі. З підвищенням температури гартування середня мікротвердість сталі знижується, що імовірно пов'язано зі збільшенням кількості залишкового аустеніту й розчиненням легованих карбідів. Виявлено, що з підвищенням температури нагріву збільшення початкового аустенітного зерна привело до укрупнення голок мартенситу. Проведені дослідження дозволили показати вплив підвищення температури аустенітизації на зміну структури Cr-Mo-V сталі. Виявлено, що температура аустенітизації впливає на фактичну швидкість охолодження. Отримані результати дозволяють орієнтовно прогнозувати кінцеву структуру Cr-Mo-V сталі після різних режимів термічної обробки. Для отримання більш детальних результатів цього впливу необхідно провести додаткові дослідження кінетики перетворень в Cr-Mo-V сталі при охолодженні від різних температур. Для отримання рівномірної структури в Cr-Mo-V сталі слід нагрівання проводити при температурі 850°C, що додатково приведе до ресурсозбереження.

Ключові слова: хромомолібденованадієва сталь, температура нагріву, структура, розмір зерна, бейніт, мартенсит, термічна обробка, гартування, нормалізація.

Посилання для цитування: Луценко В. А., Голубенко Т. М., Луценко О. В. Вплив температури обробки на структурування Cr-Mo-V сталі.

Актуальність проблеми. Технологія виробництва легованого конструкційного сортового прокату представляє комплекс операцій, який включає гарячу прокатку металу необхідного перерізу, охолодження та обробку прокату для надання йому необхідних властивостей та форми. Термічна обробка легової сталі спрямована на формування структури, яка забезпечуватиме необхідні властивості. Конструкційні сталі типу 31CrMoV9 широко використовуються у різних галузях промисловості для виробництва відповідальних виробів, тому повинні мати підвищену міцність та зносостійкість. Цього досягають термічною обробкою – загартуванням із відпуском. Суттєво від температури нагрівання при термічній обробці залежить розмір аустенітного зерна в сталі, що в свою чергу впливає на остаточну структуру сталі та механічні властивості після обробки [1]. В деяких випадках порушення температурно-часового режиму обробки через несправності на виробничій лінії, призводять до надмірного нагрівання металовиробів. Одним із наслідків цього є отримання продукції зі зміною розміру початкових аустенітних зерен. В подальшому зміна розміру аустенітних зерен може відобразитись на структурі, яку отримують при кінцевій термічній обробці. Тому при визначенні режиму обробки слід приділяти увагу розміру зерна, яке формується в сталі. Чим більше зерно, тим більше сталь схильна до гартівних тріщин і деформації, а різнозернистість сильно знижує конструктивну міцність [2]. Величина зерна сталі істотно впливає на комплекс механічних властивостей (пластичність, в'язкість та твердість) [3, 4], а зі збільшенням розміру аустенітного зерна збільшується інтенсивність зношування [5]. При визначенні режиму термічної обробки сталі, легової хромом, молібденом та ванадієм, слід уникати температури різкого збільшення зерна. В іншому разі структура може мати великий розбіг розміру зерен, що призводить до зниження механічних властивостей.

Мета роботи: вивчення впливу різної температури аустенітизації при термічній обробці на структуроутворення в легованій сталі 31CrMoV9.

Матеріал і методи дослідження. Дослідження проводили на зразках сталі 31CrMoV9, хімічний склад якої (табл. 1) відповідав нормативній документації EN 10085:2001 [6]. Нагрів дослідних зразків проводили з піччю до температур 850°C, 950°C і 1050°C з витримкою 30 хв. та наступним охолодженням у воді (гартування) та на повітрі (нормалізація).

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваної сталі 31CrMoV9.

Характеристика	Вміст хімічних елементів, % мас.							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
Дослідний зразок	0,33	0,25	0,59	2,59	0,23	0,11	0,011	0,025
Вимоги EN 10085:2001	0,27-0,34	0,17-0,37	0,30-0,60	2,30-2,70	0,20-0,30	0,06-0,12	≤0,035	≤0,035

Після загартування зразки піддавали відпуску при температурі 250°C з витримкою 1 год. та подальшим охолодженням на повітрі. Мікроструктуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопу Axiovert 200M MAT після травлення спиртовим розчином азотної кислоти. Розмір аустенітного зерна визначали методом вимірювання довжини хорд після травлення розчином пікринової кислоти. Значення мікротвердості вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 з навантаженням 100 г.

Результати дослідження та їх обговорення. Проведені дослідження по визначенню величини зерна аустеніту дослідної сталі показали, що сталь характеризується різнозернистістю (рис. 1). З підвищенням температури аустенітизації збільшувалася кількість великих зерен. Загалом розмір зерен аустеніту досліджуваної сталі збільшується на 25-35%.

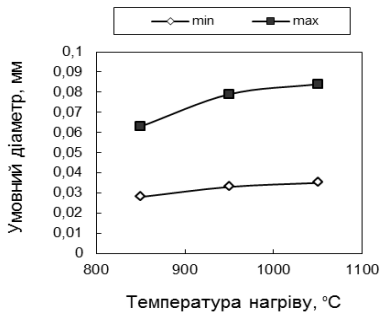


Рисунок 1 – Зміна розміру аустенітного зерна з підвищенням температури нагріву.

Виявлено, що для сталі 31CrMoV9 характерне значне зростання розміру аустенітного зерна при нагріванні від температури 950°C. Досліджена сталь має різнозернистість, умовний діаметр зерна має значення в інтервалі: 0,028...0,063 мм при температурі нагрівання 850°C, 0,033...0,079 мм – при 950°C та 0,035...0,084 мм – при 1050°C. Результати досліджень показали, що величина аустенітного зерна з підвищенням температури аустенітизації збільшується, що може привести до зміни структури дослідної сталі після термічної обробки. Зі зростанням температури аустенітизації проявляється дія

теплотехнічного фактора, внаслідок якого фактична швидкість охолодження сталі підвищується [7, 8].

Зростання величини зерна пов'язане з проходженням вторинної рекристалізації, яка відбувається в результаті розчинення дисперсних (5÷20 нм) частинок карбідних фаз, які стримували зростання зерна. В даному випадку з підвищенням температури відбувається розчинення спеціальних карбідів ванадію. Дрібнозерниста структура має підвищену зернограничну поверхню на одиницю об'єму, що призводить до надлишку вільної енергії системи, яка створює рушійну силу для її знищення шляхом зростання зерен. Рух границь направлений в сторону зменшення їх кривизни та досягнення певних кутів. Основні моделі гальмування границь зерен частинками засновані на балансі сил, які виникають на границі: зменшення зернограничної поверхні на одиницю об'єму металу при зростанні зерна та гальмівна сила внаслідок присутності частинок на границях. Ефект присутності частинок другої фази полягає в зменшенні протяжності границі та її вільної енергії. Легуючі елементи, особливо карбідоутворюючі, затримують ріст зерна аустеніту [8].

Після нормалізації від різних температур в інтервалі 850...1050°C структура дослідної сталі 31CrMoV9 складатиметься з бейніту, мартенситу і надлишкових легованих карбідів (рис. 2).

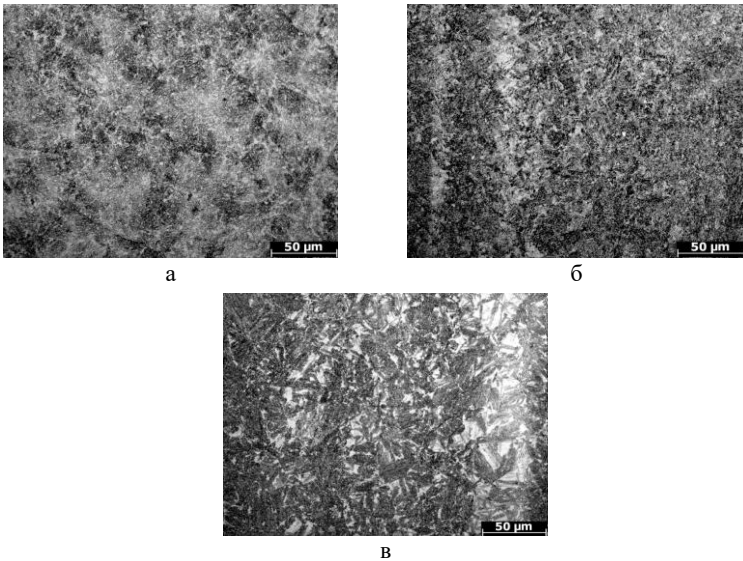


Рисунок 2 – Структура сталі 31CrMoV9 після нормалізації з температур 850°C (а), 950°C (б) і 1050°C (в).

Після охолодження з температури 850°C кількість мартенситу складала 5-10%. Мартенсит безструктурний (світлі ділянки на рис. 2, а), має вигляд дрібних зерен з відсутньою характерною голчастістю, чіткі границі між кристалами мартенситу не спостерігаються. Середнє значення мікротвердості сталі – 3340 МПа. Легуючі елементи провокують прояву ліквациї (смужкуватість), що починає проявлятися при охолодженні від вищої температури нагріву 950°C (рис. 2, б). Структура сталі 31CrMoV9 після нагріву 950°C та охолодження на повітрі складалася з бейніту і ~30% безструктурного мартенситу, розташованого переважно в ліквацийних ділянках, а середня мікротвердість сталі підвищилася до 3550 МПа. В структурі сталі також спостерігаються дрібні надлишкові леговані карбіди.

Зі збільшенням температури нормалізації при однакових умовах охолодження зростає кількість мартенситу, що утворюється. В основному відбувається збільшення загальної площі, зайнятої мартенситом без зміни його морфології. Підвищення температури до 1050°C призвело до появи, окрім бейніту, близько 50% мартенситу (рис. 2, в). Світлі ділянки безструктурного мартенситу мають вигляд окремих зерен та смужок. Середня мікротвердість зразку, нормалізованого при 1050°C, зростає до 4075 МПа.

Отже, зі збільшенням температури нагріву, фактична швидкість охолодження може відрізнятись від прогнозованої за термкінетичною діаграмою. Це слід враховувати при призначенні режимів термічної обробки легової сталі.

Зміна розміру аустенітних зерен може відобразитись також у мартенситній структурі, яку отримують при кінцевій термічній обробці. Зміна морфології мартенситу впливає на зниження механічних властивостей: ударної в'язкості, границі плинності, твердості тощо. Тому були проведені дослідження впливу збільшення температури аустенітизації на мартенситну структуру сталі 31CrMoV9.

Після нагрівання до різних температур, гартування та відпуску, структура хромомолібденованадієвої сталі складається з відпущеного мартенситу (включаючи залишковий аустеніт і продукти розпаду залишкового аустеніту) та легованих карбідів (рис. 3).

Спостерігається значне укрупнення мартенситу з підвищенням температури. Відомо, що розмір мартенситних пластин (голчастість) залежить від величини вихідних зерен аустеніту: чим крупніші зерна аустеніту, тим більш великоголчастий формується мартенсит. Розмір голок мартенситу після загартування від температури 850°C має значення близько 4 мкм, від 950°C – 10 мкм, та для гартування від 1050°C – 18 мкм (рис. 4). Розмір аустенітного зерна впливає на мартенситне перетворення за рахунок щільності зародків, що

забезпечується зоною межі зерна, і за рахунок зміцнення аустенітної фази в міру розвитку перетворення [9].

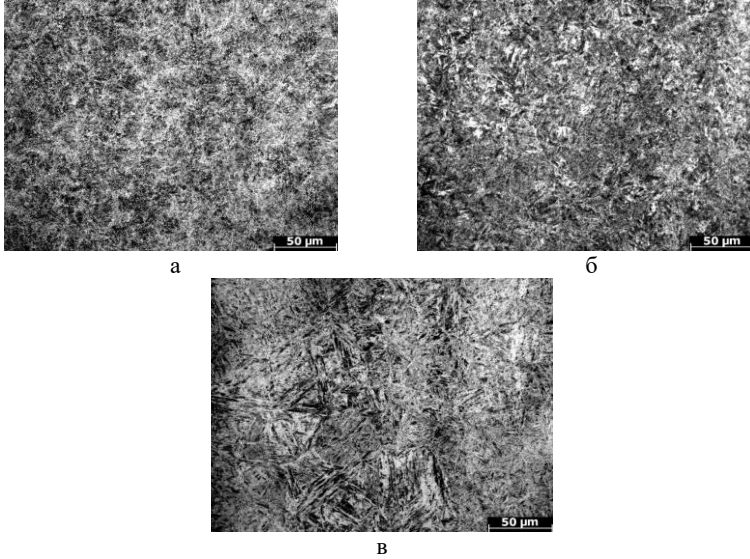


Рисунок 3 – Структура сталі 31CrMoV9 після гартування з температур 850°C (а), 950°C (б) і 1050°C (в) та відпуску.

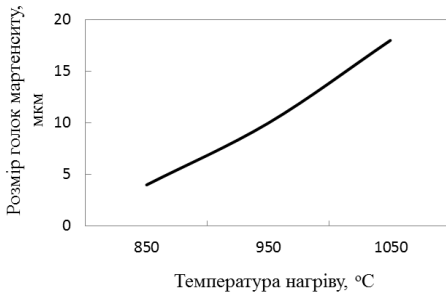


Рисунок 4 – Середній розмір голок мартенситу сталі 31CrMoV9 після гартування від різних температур нагріву.

Також в сталі з підвищенням температури нагріву збільшується розчинність надлишкових карбідів ванадію [10], та їх кількість суттєво зменшується при нагріванні до 1050°C (див. рис. 2-3, в).

У хромомолібденованадієвій сталі карбід ванадію виділяється в дуже дрібнодисперсному вигляді зернистої форми. Через те, що ванадій утворює важкорозчинні карбіди, при традиційних температурах гартування 800...900°C він залишається пов'язаним в карбіди і не переходить в аустеніт. Це також впливає на зміну

мікротвердості дослідженої сталі. Хоча з підвищенням температури гартування мікротвердість ліквацийних ділянок збільшується, загальна середня мікротвердість сталі знижується (рис. 5, б), на відміну від сталі, охолодженої на повітрі (рис. 5, а). Середні значення мікротвердості сталі 31CrMoV9 після гартування та відпуску склали: 4060 МПа для гартування від 850°C, 3960 МПа – для 950°C та 3894 МПа для 1050°C.

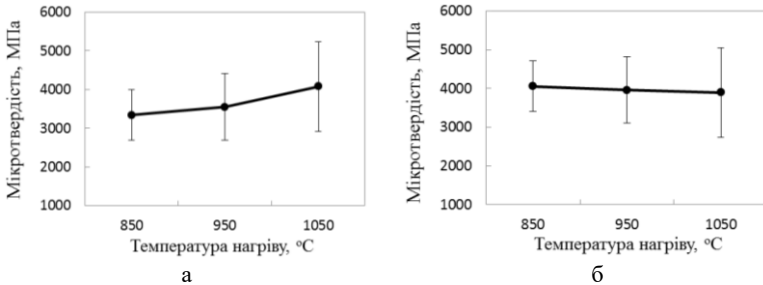


Рисунок 5 – Мікротвердість сталі 31CrMoV9 в залежності від температури нагріву при нормалізації (а) та гартування з відпуском (б).

Така зміна мікротвердості, імовірно, пов'язана зі збільшенням кількості залишкового аустеніту, бо підвищення температури загартування підвищує кількість та ступінь метастабільності залишкового аустеніту, збагачення його вуглецем та легуючими елементами внаслідок розчинення легованих карбідів [11]. Також підвищення температури загартування, а отже зростання ступеня розчинності карбідів в аустеніті, обумовлює зниження температур початку мартенситного перетворення і, як наслідок, збільшення кількості залишкового аустеніту.

При нагріванні до 1050°C та охолодженні на повітрі й у воді спостерігається найширший інтервал між мінімальними та максимальними значеннями мікротвердості структурних складових, що в подальшому може негативно відобразитися на властивостях даної сталі. Наприклад, в роботі [12] показано, що в міру збільшення температури вихідний середній діаметр аустеніту збільшується, що приводить до збільшення розмірів блоків і пакетів у мартенситі. Це вплинуло на механічні властивості, бо по відношенню до тієї ж площі менше зерно має більше блоків і пакетів та більш високу щільність дислокацій.

Таким чином, для отримання рівномірної дрібної структури в сталі 31CrMoV9 слід нагрівання перед гартуванням та нормалізацією проводити до температур ~ 850°C, що також приведе до економії ресурсів.

Висновки

Показано, що після нагріву сталі 31CrMoV9 до різних температур аустенізації в інтервалі 850...1050°C та охолодження в однакових умовах структура сталі змінюється. Після нормалізації структура сталі 31CrMoV9 складалася з бейніту та мартенситу, кількість мартенситу збільшується з підвищенням температури з 5-10% при 850°C до 50% при 1050°C. Відповідно збільшується мікротвердість сталі. Після нагрівання до різних температур, гартування та відпуску, структура сталі 31CrMoV9 складається з відпущеного мартенситу різної дисперсності.

Виявлено, що з підвищенням температури нагріву спостерігається збільшення початкового аустенітного зерна, що привело до укрупнення голок мартенситу.

Рекомендовано для легованої сталі перед гартуванням та нормалізацією нагрівання проводити при температурі ~ 850°C для отримання рівномірної дрібної структури.

Перелік посилань

1. 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 No. 6. P. 116-119.
2. Xia B., Zhang P., Wang B., Li X., Zhang Z. Effects of quenching temperature on the microstructure and impact toughness of 50CrMnSiVNb spring steel. *Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 870. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144856>.
3. Polyzois I, Bassim N. An examination of the formation of adiabatic shear bands in AISI 4340 steel through analysis of grains and grain deformation. *Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 631. P. 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.008>.
4. Grzegorz G., Cezary K., Jerzy K. The effect of austenitizing temperature on prior austenite grain size in martensitic cast steel. *Solid State. Phenomena Materials Science*. 2013. Vol. 197. P. 53-57. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.197.53>.
5. Pawlak K., Bialobrzieszka B., Konat L. The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16 No. 4. P. 913-926. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.003>.
6. EN 10085:2001 Nitriding steels - Technical delivery conditions., Category: 77.140.10 Heat-treatable steels.
7. Lutsenko V. A., Parusov E. V., Parusov O. V., Lutsenko O. V., Chuiko I. M., Golubenko T. M. Peculiarities of Formation of High-Carbon Steel Structure During Rolling. *Materials Science*. 2023. Vol. 58. No. 5. P. 621–628. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00708-z>.
8. Parusov E. V., Klimenko A. P., Lutsenko V. A., Chuiko I. N., Sahura L. V., Sivak G. I. The influence of the heating temperature on the kinetics of the austenite

dissolution of high-carbon steel C2Dv. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*. 2018. Vol. 1. P. 34-42. <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.34.103>.

9. Celada-Casero C., Sietsma J., Santofimia M. J. The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels. *Materials & Design*. 2019. Vol. 167. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107625>.

10. Maropoulos S., Karagiannis S., Ridley N. The effect of austenitising temperature on prior austenite grain size in a low-alloy steel. *Materials Science and Engineering*. 2008. Vol. 483-484. No. 1-2. P. 735-739. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.172>.

11. Lagneborg P., Siwecki T., Zajac S., Hutchinson B. The Role of Vanadium in Microalloyed Steels. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1999, Vol. 28. No. 5, P. 186-241.

12. Prawoto Y., Jasmawati N., Sumeru K. Effect of Prior Austenite Grain Size on the Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012. Vol. 28. No. 5, P. 461-466. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60083-8](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60083-8).

References

1. Xiaomin, Y., Shanshan, H., Yiwei, Z., Lei, Y. (2015). Effects of controlled cooling process on microstructure and mechanical properties of 12Cr1MoV boiler steel. *Heat Treatment of Metals*, 40(6), 116-119

2. Xia, B., Zhang, P., Wang, B., Li, X., Zhang, Z. (2023). Effects of quenching temperature on the microstructure and impact toughness of 50CrMnSiVNb spring steel. *Materials Science and Engineering*, 870, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144856>

3. Polyzois, I, Bassim, N. (2015). An examination of the formation of adiabatic shear bands in AISI 4340 steel through analysis of grains and grain deformation. *Materials Science and Engineering*, 631, 18-26, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.008>

4. Grzegorz, G., Cezary, K., Jerzy, K. (2013). The effect of austenitizing temperature on prior austenite grain size in martensitic cast steel. *Solid State. Phenomena Materials Science*, 197, 53-57. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.197.53>

5. Pawlak, K., Bialobrzaska, B., Konat, L. (2016). The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16 (4), 913-926, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.003>

6. EN 10085:2001 Nitriding steels - Technical delivery conditions., Category: 77.140.10 Heat-treatable steels

7. Lutsenko, V. A., Parusov, E. V., Parusov, O. V., Lutsenko, O. V., Chuiko, I. M., Golubenko, T. M. (2023). Peculiarities of Formation of High-Carbon Steel Structure During Rolling. *Materials Science*, 58 (5), 621–628. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00708-z>

8. Parusov, E. V., Klimenko, A. P., Lutsenko, V. A., Chuiko, I. N., Sahura, L. V., Sivak, G. I. (2018). The influence of the heating temperature on the kinetics of the austenite dissolution of high-carbon steel C2Dv. *Metal Science and Heat*

Treatment of Metals, 1, 34-42, <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418>. 34.103

9. Celada-Casero, C., Sietsma, J., Santofimia, M. J. (2019). The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels. *Materials & Design*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107625>

10. Maropoulos, S, Karagiannis, S., Ridley, N. (2008). The effect of austenitising temperature on prior austenite grain size in a low-alloy steel. *Materials Science and Engineering*, 483-484(1-2), 735-739, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.172>

11. Lagneborg, P., Siwecki, T., Zajac, S., Hutchinson, B. (1999). The Role of Vanadium in Microalloyed Steels. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 28 (5), 186-241

12. Prawoto, Y., Jasmawati, N., Sumeru, K. (2012). Effect of Prior Austenite Grain Size on the Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 28 (5), 461-466. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60083-8](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60083-8)

V. A. Lutsenko¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4604-5592

T. M. Golubenko¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-3583-211X

O. V. Lutsenko¹, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-8298-5306

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

THE INFLUENCE OF PROCESSING TEMPERATURE ON THE STRUCTURE FORMATION OF THE Cr-Mo-V STEEL

Abstract. The main way to improve the quality characteristics of the steel is a properly selected heat treatment, the purpose of which is to create a structure that would meet the requirements of the manufacturer. The size of the austenite grain in the steel depends significantly on the heating temperature during heat treatment, which in turn affects the final structure of the steel and mechanical properties after treatment. The experimental chromium molybdenum vanadium steel 31CrMoV9 (EN 10085:2001) was heated to temperatures in the range of 850...1050°C and cooled in water and air. The structure formation of the Cr-Mo-V steel after heating to different temperatures, quenching and tempering, consists of tempered martensite (including residual austenite) and alloyed carbides, and after normalization - bainite and martensite with different ratios. As the normalization temperature increases, the total area occupied by martensite increases without changing its morphology. The increase in the heating temperature leads to an increase in the amount of martensite from 10% at 850°C to 50% at 1050°C, correspondingly, the microhardness of the steel increases, shown by research. With an increase in the tempering temperature, the average microhardness of steel decreases. The change in microhardness is probably associated with an increase in the amount of the residual austenite and the dissolution of alloyed carbides. Detected that with an increase in the heating temperature, the increase in the initial austenite grain led to the coarsening of martensite needles. The effect of the increasing the austenitization temperature on the change in the structure of the Cr-Mo-V steel was shown during investigations.

Detected that the temperature of the austenization affects the cooling rate. To obtain more detailed results of this effect, it is necessary to conduct additional investigations of the kinetics of the transformations in the Cr-Mo-V steel upon cooling from different temperatures. The obtained results make it possible to tentatively predict the final structure of the Cr-Mo-V steel after various modes of the heat treatment. Heating should be carried out at a temperature of 850°C, which will additionally lead to resource saving to get a uniform structure in the Cr-Mo-V steel.

Key words: chromium-molybdenum-vanadium steel, heating temperature, structure, grain size, bainite, martensite, heat treatment, quenching, normalization.

For citation: Lutsenko, V. A., Golubenko, T. M., & Lutsenko, O. V. (2023). The influence of processing temperature on the structure formation of the Cr-Mo-V steel. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 465-475. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-465-475>

*Стаття надійшла до редакції збірника 29.09.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*