

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

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

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

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

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Анотація. Сортовий прокат круглого діаметру з низьковуглецевих сталей марок SAE вимагає постійного підвищення надійної системи забезпечення якості. Перспективними є процеси, що включають після гарячої прокатки температурно-швидкісні параметри охолодження, які забезпечують формування однорідної структури та властивостей. Залежно від умов проведення гарячої деформації в сталевому прокаті можуть спостерігатися різні структурні стани, які зафіксовані охолодженням і визначають властивості металу. Якщо метал піддавати витримкам при температурі кінця деформації, то в ньому протікають процеси збиральної рекристалізації, яка проявляється у формуванні зародків, здатних до подальшого зростання. У сталях із невисоким вмістом вуглецю після гарячої деформації подрібнення аустенітного зерна призводить до зменшення розмірів перлітних ділянок. Утворення внаслідок збиральної рекристалізації великого аустенітного зерна призводить до зменшення кількості структурно-вільного фериту. Найбільш важливим параметром мікроструктури є розмір зерна, який є одним із найефективніших способів управління структурою, що призводить до зміни механічних властивостей. Досліджували сортовий прокат із низьковуглецевої сталі марки SAE 1008 після гарячої прокатки у чистовому дротяному блоку та охолоджували водою перед розкладкою на витки до різних температур, вищих за A_1 , у подальшому охолоджували на повітрі до температур навколишнього середовища. Металографічні дослідження дозволили встановити вплив параметрів термічної обробки на структуру дослідженої сталі, яка являє собою ферит з невеликими ділянками пластинчастого перліту. За допомогою проведених розрахунково-аналітичних досліджень встановлено, що після високошвидкісної гарячої деформації на середній умовний діаметр зерна впливає термічна обробка, саме температура кінця охолодження. Для прокату зі сталей типу марок SAE раціональним є охолодження після гарячої деформації до температур порядку $A_1 + 150^\circ\text{C}$ з наступним уповільненим охолодженням, при якому формується більш рівномірне зерно, що забезпечить мінімальний розкид механічних властивостей.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Ключові слова: низьковуглецева сталь, сортовий прокат, температура, охолодження, структура, розмір зерна, механічні властивості.

Посилання для цитування: Луценко В. А., Голубенко Т. М., Луценко О. В. Вплив параметрів обробки на структуру та властивості низьковуглецевої сталі. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 621-631. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-621-631>.

Вступ. Для виробництва сталевого круглого прокату широко використовують низьковуглецеві сталі зі вмістом вуглецю менш ніж 0,1 %, наприклад, сталі марок типу SAE 1008. Сортний прокат із низьковуглецевих сталей є напівпродуктом, придатним для процесів холодного деформування або волочіння.

Виробництво сортного прокату круглого діаметру із низьковуглецевих сталей марок типу SAE 1008 вимагає постійного підвищення конкурентоспроможності, що диктує необхідність організації на металургійних підприємствах України надійної системи забезпечення якості [1].

В умовах дефіциту та дорожчечі легуючих металів проблема надання звичайним конструкційним матеріалам високих експлуатаційних властивостей, що покращують їх якісні (міцнісні та пластичні) показники, є актуальною. Для отримання комплексу високих механічних властивостей в маловуглецевих сталях використовуються способи впливу на процеси структуроутворення, що поєднують гарячу пластичну деформацію і наступну термічну обробку. Широко використовуються процеси термомеханічно контрольованої прокатки через їхню здатність подрібнювати зернисту структуру [2].

Перспективними є процеси термічної обробки (ТО), які поєднують гарячу прокатку й охолодження за особливими температурно-швидкісними параметрами і забезпечують формування однорідної структури та властивостей [3, 4]. Маловуглецеві низьколеговані сталі в гарячекатаному стані мають досить низьку міцність і опір руйнуванню. Нові можливості керування структурою й властивостями металу надає поєднання деформаційної та термічної обробки. Процеси ТО можуть поєднуватися в одній технологічній операції або проводитися в різні часи [3], важливо лише, щоб фазові перетворення проходили в умовах підвищеної щільності дефектів решітки, створених пластичною деформацією. Охолодження перешкоджає розвитку процесів рекристалізації аустеніту, сприяючи поряд із зміцненням збереження пластичності, що характерно для процесів обробки прокату [4, 5].

Залежно від умов проведення гарячої деформації в сталевому прокаті можуть спостерігатися різні структурні стани, які зафіксовані охолодженням і які визначають властивості металу [3, 6-8]. Якщо метал

піддавати витримкам при температурі кінця деформації, то в ньому протікають процеси збиральної рекристалізації, яка проявляється у формуванні зародків, здатних до подальшого зростання [4, 6, 7]. Після гарячої деформації подрібнення аустенітного зерна призводить до зменшення розмірів перлітних ділянок у сталях із невисоким вмістом вуглецю [4]. Збиральна рекристалізація великого аустенітного зерна призводить до зменшення кількості структурно-вільного фериту [3, 8]. Тому актуальним є моделювання впливу на структуру та властивості температурних режимів при використанні ТО сортового прокату із низьковуглецевої сталі марки SAE.

Матеріал і методи дослідження. Досліджували сортовий прокат із низьковуглецевої сталі марки SAE 1008 [9] круглого діаметру 18,0 мм, що в промислових умовах має після чистового дротяного блоку температуру гарячої прокатки вищу за A_3 . Прокат обробляли за схемою: регульоване двостадійне охолодження: водою перед розкладкою на витки до різних температур ($T_{в/у}$ - температура виткоутворення), вищих за A_1 , у подальшому охолоджували зі середньою швидкістю $\sim 3,0$ °C/c.

Визначення механічних властивостей проводили після випробування на розтягування за стандартними методиками. Аналіз структури проводили за допомогою оптичного мікроскопу Axiovert 200M після травлення спиртовим розчином азотної кислоти. Співвідношення структурних складових і розмір зерна визначали за стандартними методиками.

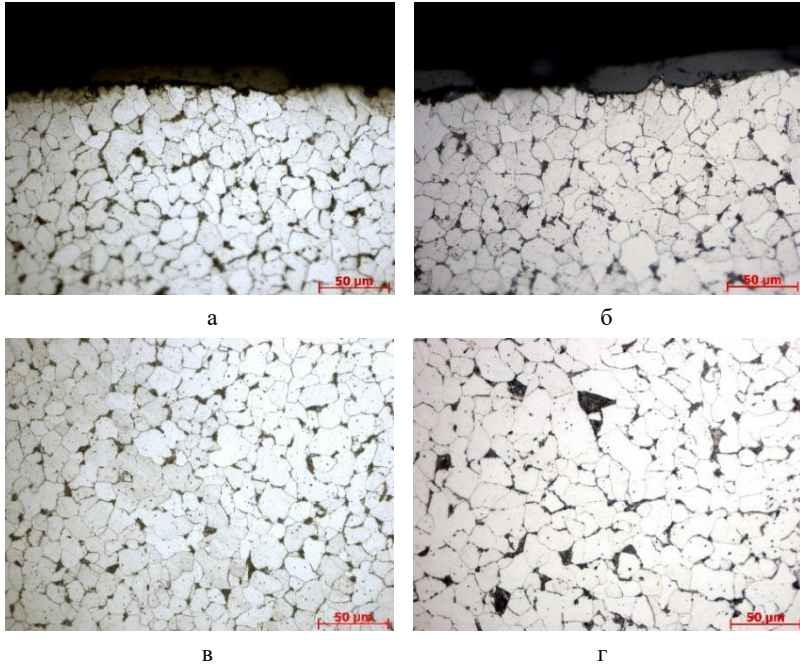
Результати дослідження. Відомо, що велика різнозернистість призводить до нерівномірної деформації металу під час витягування, що може бути причиною утворення розривів і тріщин [10]. Також рівномірна структура є головною передумовою досягнення високої здатності сталей до глибокого витягування після термічного оброблення, що особливо необхідне в гарячекатаному металі, який є підкатом для станів холодного прокатування.

Основу структури прокату сталі SAE 1008 після обробки становить ферит та перліт.

Після термічної обробки при температурах $T_{в/у} = A_1 + (150...250)^\circ\text{C}$ охолодження сталі SAE 1008 забезпечує формування структури фериту з невеликими ділянками пластинчастого перліту. Співвідношення структурних складових при різних температурах виткоутворення становить: при $T_{в/у} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ – 91,6% фериту і 8,4% перліту, а при $T_{в/у} = A_1 + 250^\circ\text{C}$ – 93,3 % фериту і 6,7 % перліту. Структура сталі SAE 1008, що піддана різним режимами обробки, наведена на рис. 1.

Дані про механічні властивості та структурні характеристики прокату сталі марки SAE 1008, підданої різним режимам ТО, наведені в таблиці 1 (приведені дані: у чисельнику – мінімальне та максимальне

значення, у знаменнику – середнє значення та середньоквадратичне відхилення).



а, в – $T_{в/у} = A_1 + 150^{\circ}\text{C}$; б, г – $T_{в/у} = A_1 + 250^{\circ}\text{C}$

Рисунок 1 – Характерна структура низьковуглецевої сталі SAE 1008 (а, б – поверхня; в, г – центр), підданої різній температурі $T_{в/у}$

Таблиця 1 – Механічні властивості та структурні характеристики сортового прокату сталі марки SAE 1008

Процес обробки із температурою $T_{в/у}$	$A_1 + 150^{\circ}\text{C}$	$A_1 + 250^{\circ}\text{C}$
Тимчасовий опір, Н/мм ²	<u>412 – 456</u> 430,6 ± 5,18	<u>405–440</u> 420,16 ± 9,61
Відносне подовження, %	<u>33 – 40</u> 36,3 ± 2,11	<u>33 – 42</u> 37,6 ± 3,6
Відносне звуження, %	<u>73 – 77</u> 75,2 ± 1,7	<u>73 – 78</u> 75,8 ± 2,11
Розмір зерна, номер	8 – 7	7 – 8
Співвідношення ферит/перліт, %	91,6 / 8,4	93,3 / 6,7

Загалом параметри механічних властивостей, такі, як відносне подовження і звуження, мають схожі показники для режимів обробки

ТО. Середнє значення тимчасового опору для сталі, обробленої при температурі $A_1 + 150^\circ\text{C}$, трохи вище ніж для прокату, обробленого при температурі $A_1 + 250^\circ\text{C}$.

Однак отримані дані показують, що середньоквадратичне відхилення всіх показників більше у сталі, обробленій за режимом при збільшеній температурі. Це свідчить про меншу стабільність властивостей сталі після режиму обробки ТО з температурою виткоутворювача $A_1 + 250^\circ\text{C}$.

Відомо, що на остаточну структуру сталі та механічні властивості суттєво впливають температури нагрівання при обробці, які пов'язані з розміром зерна в сталі. Від величини зерна сталі залежить комплекс механічних властивостей, що в кінцевому підсумку матиме вплив на процеси волочіння. Тому при визначенні режиму обробки слід приділяти увагу розміру зерна, яке формується в сталі. Наявність різнозернистості знижує конструктивну міцність сталі, а збільшення розміру зерен збільшує схильність сталі до гартівних тріщин і деформації. Розмір зерна є одним із найефективніших способів управління структурою, що призводить до зміни механічних властивостей [10].

Вивчали вплив обробки на розмір зерна низьковуглецевої сталі марки SAE 1008. Сталь після ТО при температурах $T_{b/y} = A_1 + (150\dots250)^\circ\text{C}$ має значення середнього умовного діаметру в інтервалі 0,0133...0,0316 мм.

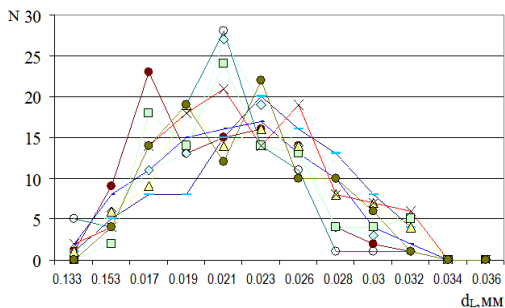
З підвищенням температури кінця водяного охолодження розмір зерна підвищується. На поверхні зразків дослідної сталі величина зерна має менші значення ніж у центрі. Проведений статистичний аналіз частот попадань для середнього умовного діаметра зерна показав відмінність вибірок: сортовий прокат при $T_{b/y} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ (рис. 2, а) характеризується більшою схожістю показників, тоді як для $T_{b/y} = A_1 + 250^\circ\text{C}$ властива велика неоднорідність (рис. 2, б). Це пов'язано з початком рекристалізаційних процесів у сталі.

Як видно із рис. 3, для режиму $T_{b/y} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ вибірковий розподіл майже нормальний, а для $T_{b/y} = A_1 + 250^\circ\text{C}$ має помітну асиметричність. Отже температурний режим $T_{b/y} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ більш сприятливий для отримання рівномірного зерна і, відповідно, стабільних механічних властивостей.

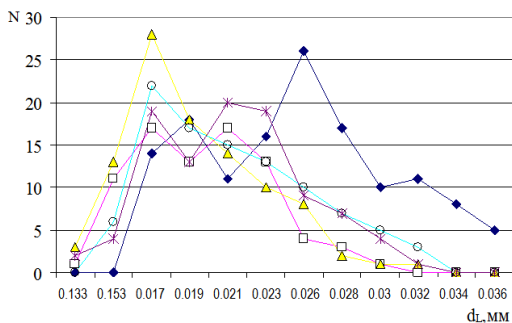
Для дослідження впливу режимів ТО на середній умовний діаметр зерна низьковуглецевої сталі SAE 1008 використовували вуглецевий еквівалент (C_e):

$$d_{L_{A_1+150}} = 0,0051 + 0,071 C_e \quad R^2 = 0,824 \quad (1)$$

$$d_{L_{A_1+250}} = 0,015 + 0,03 C_e \quad R^2 = 0,453 \quad (2)$$



а – $T_{в/у} = A_1 + 150^{\circ}\text{C}$



б – $T_{в/у} = A_1 + 250^{\circ}\text{C}$

Рисунок 2 – Частота влучань (N) середнього умовного діаметра зерна (d_L) у низько-вуглецевій сталі SAE 1008 після температури виткоутворення: $A_1 + 150^{\circ}\text{C}$ (а) та $A_1 + 250^{\circ}\text{C}$ (б)

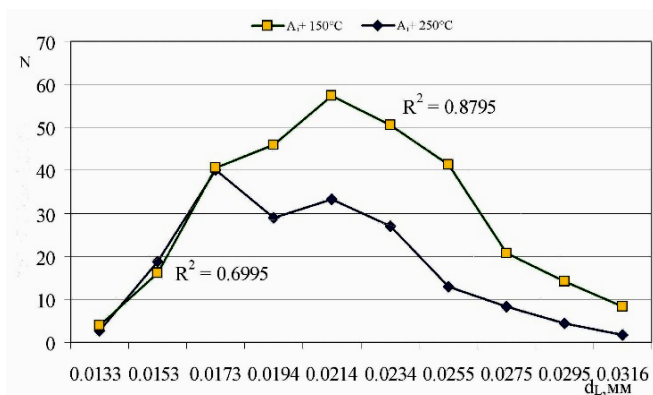


Рисунок 3 – Середні показники частоти влучань (N) для середнього умовного діаметра зерна (d_L) у прокаті після ТО

Отримані рівняння (1) та (2) показують умовний зв'язок вуглецевого еквіваленту (C_e) з середнім умовним діаметром зерна (d_L) після ТО.

Встановлено, що зі збільшенням вуглецевого еквіваленту і при охолодженні до температури $T_{в/у} = A_1 + 150^{\circ}\text{C}$ розмір зерна збільшується (коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,824$), тоді як при охолодженні до температури $T_{в/у} = A_1 + 250^{\circ}\text{C}$ коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,453$, що свідчить про більш тісний зв'язок при нижчій температурі. Більший розбіг середнього умовного діаметра зерна, що формується при $T_{в/у} = A_1 + 250^{\circ}\text{C}$, можна пояснити проходженням процесів метадинамічної та часткової збірної рекристалізації [11].

Існує кілька механізмів, які при гарячій деформації сталі приводять до розм'якшення: динамічна рекристалізація, метадинамічна рекристалізація та статична рекристалізація. Процеси рекристалізації деформованого аустенітного зерна відіграють роль при гарячій деформації сталей і здатні вести до подрібнення зерна за рахунок утворення на місці деформованого зерна великої кількості глобулярних зерен меншого розміру [12]. Зі збільшенням температури процеси рекристалізації і повернення ідуть швидше. Рекристалізація і перетворення фериту пов'язані із зародженням і зростанням нових зерен у сталях при деформації аустеніту під час термомеханічних процесів. Дрібне зерно призводить до зміцнення, а за рахунок анігіляції блокованих дислокацій відбувається процес розм'якшення. Статична рекристалізація відбувається після того, як зерна аустеніту набули напружень. У випадку динамічної рекристалізації відбувається накопичення напруження під час деформації аустеніту, а не як окремий процес після цього. Ці механізми пом'якшення відбуваються окремо або послідовно [13]. В дослідженні [14] говориться, що мікроструктура, отримана в результаті динамічної рекристалізації, забезпечує кращі механічні характеристики, ніж структури інших механізмів розм'якшення, завдяки рафінованому розміру зерен аустеніту.

Проведені дослідження для сталі SAE 1008 показали, що при температурі виткоутворювача $T_{в/у} = A_1 + 150^{\circ}\text{C}$ формується більш рівномірне зерно, що забезпечить мінімальний розкид механічних властивостей (див. табл. 1).

Висновки

З проведених досліджень встановлено, що на середній умовний діаметр зерна впливає режим обробки, а саме: середня температура кінця водяного охолодження після гарячої деформації.

При виробництві низьковуглецевого сортового прокату марок типу SAE слід використовувати схему з регульованим двостадійним охолодженням при середній температурі на виткоутворювачі $A_1 + 150^{\circ}\text{C}$, при якій формується більш рівномірне зерно, що забезпечить мінімальний розкид механічних властивостей. Підвищення

температури виткоутворення призводить до утворення різнозернистості у мікроструктурі, що є небажаним.

Перелік посилань

1. Тубольцев Л. Г., Чайка О. Л., Бабаченко О. І. Перспективи розвитку металургійного виробництва в Україні за рахунок використання нових технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 4-25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>
2. Ghosh S., Mula S., Malakar A., Somani M., Kömi J. High cycle fatigue performance, crack growth and failure mechanisms of an ultrafine-grained Nb+Ti stabilized, low-C microalloyed steel processed by multiphase controlled rolling and forging. *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 825, 141883. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141883>
3. Parusov E. V., Levchenko G. V., Lutsenko V. A., Bobyr S. V., Parusov O. V., Chuiko I. M., Golubenko T. M. Scientific and technological fundamentals of the production of highly efficient types of construction steel and wire rod. *Metal and Casting of Ukraine*. 2019. No. 7-9 (314-316). P.30-38. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.060>
4. 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>
5. Bobyr S. V., Parusov E. V., Levchenko G. V., Borisenko A. Yu., Chuiko I. M. Shear Transformation of Austenite in Steels Considering Stresses Effects. *Progress in Physics of Metals*. 2022. Vol. 23, No. 3. P. 379-410. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.03.379>
6. 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>
7. 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. 107625, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107625>
8. 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)
9. ASTM A510/A510M-18 Standard Specification for General Requirements for Wire Rods and Coarse Round Wire, Carbon Steel, and Alloy Steel
10. Dhua S. K., Sarkar P. P. Development of ultrafine grains in C–Mn steel plates through hot-rolling and air-cooling. *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 575. P. 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.052>
11. 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)

12. Каверинський В. В., Сухенко З. П., Баглюк Г. А. Моделювання кінетики процесів рекристалізації, повернення і виділення карбонітридних частинок у мікролегованій сталі після гарячої деформації аустеніту. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. 2019. Вип. 66. С. 141-150.

13. Chen S. C., Huang C. Y., Wang Y. T., Yen H. W. Coepetitive micro-mechanisms between recrystallization and transformation during/after dynamic strain-induced transformation in aluminum-containing low-carbon steel. *Materials & Design*. 2017. Vol. 134. P. 434-445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.074>

14. Dong L., Zhong Y., Ma Q., Yuan C., Ma L. Dynamic Recrystallization and Grain Growth Behavior of 20SiMn Low Carbon Alloy Steel. *Tsinghua Science & Technology*. 2008. Vol. 13, Iss. 5. P. 609-613. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(08\)70097-X](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(08)70097-X)

References

1. Tuboltsev L. G., Chaika O. L., & Babachenko O. I. (2023). Prospects of technological production of metallurgical production in Ukraine due to the use of new technologies. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 4-25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>

2. Ghosh, S., Mula, S., Malakar, A., Somani, M., & Kömi, J. (2021). High cycle fatigue performance, crack growth and failure mechanisms of an ultrafine-grained Nb+Ti stabilized, low-C microalloyed steel processed by multiphase controlled rolling and forging. *Materials Science and Engineering: A*, 825, 141883. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141883>

3. Parusov, E. V., Levchenko, G. V., Lutsenko, V. A., Bobyr, S. V., Parusov, O. V., Chuiko, I. M., Golubenko, T. M. (2019). Scientific and technological fundamentals of the production of highly efficient types of construction steel and wire rod. *Metal and Casting of Ukraine*, 7-9 (314-316), 30-38. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.060>

4. 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>

5. Bobyr, S. V., Parusov, E. V., Levchenko, G. V., Borisenko, A. Yu., Chuiko, I. M. (2022). Shear Transformation of Austenite in Steels Considering Stresses Effects. *Progress in Physics of Metals*, 23 (3), 379-410. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.03.379>

6. 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>

7. 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, 107625. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107625>.

8. 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).

9. ASTM A510/A510M-18 Standard Specification for General Requirements for Wire Rods and Coarse Round Wire, Carbon Steel, and Alloy Steel

10. Dhua, S.K., & Sarkar, P.P. (2013). Development of ultrafine grains in C–Mn steel plates through hot-rolling and air-cooling. *Materials Science and Engineering: A*, 575, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.052>

11. 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)

12. Kaverinskiy, V. V., Sukhenko, Z. P., & Bagluk, G. A. (2019). Modelyuvannya kinetyky protsesiv rekrystalizatsiyi, povernennya i vydilennya karbonitrydnykh chastynok u mikrolehovaniy stali pislya haryachoyi deformatsiyi austenitu [Modeling of the kinetics of recrystallization procedures, return and precipitation of carbonitride particles in micro-alloyed steel after hot deformation of austenite]. *Mizhvuziv's'kyi zbirnyk " Naukovi notatki "* 66, 141-150. [In Ukrainian]

13. Chen, S. C., Huang, C. Y., Wang, Y. T., & Yen, H. W. (2017). Cooperative micro-mechanisms between recrystallization and transformation during/after dynamic strain-induced transformation in aluminum-containing low-carbon steel. *Materials & Design*, 134, 434-445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.074>

14. Dong, L., Zhong, Y., Ma, Q., Yuan, C., & Ma, L. (2008). Dynamic Recrystallization and Grain Growth Behavior of 20SiMn Low Carbon Alloy Steel. *Tsinghua Science & Technology*, 13 (5), 609-613. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(08\)70097-X](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(08)70097-X)

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

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

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

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

THE INFLUENCE OF PROCESSING PARAMETERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE LOW-CARBON STEEL

Abstract. The bar sections of the round diameter from the low-carbon steels of SAE brands requires continuous improvement of the reliable quality assurance system. The processes that include temperature-rate cooling parameters after hot rolling, which ensure the formation of the homogeneity of the structure and properties, are promising. Depending on the conditions of the hot deformation in the rolled steel products, can be observed the different structural states, which are fixed by cooling and determine the properties of the metal. If the metal is subjected to holding at the temperature of the end of deformation, then it undergoes the processes of collection recrystallization, which appears as the formation of the coherent nucleus, capable of the further growth. In the steels with low carbon content, after hot deformation, the austenite grain refining leads to a decrease in the size of pearlite areas. The formation of the large austenite grains due to the collection recrystallization leads to a decrease in the amount of structurally free ferrite. The most important microstructural

parameter is grain size, which is one of the most effective ways to control the structure, leading to changes in mechanical properties. Investigated the bar sections of the low-carbon steels of SAE 1008 brands after hot rolling in the cleanliness wire block and cooling with water before allocation into wire wraps to different temperatures higher than A_1 , and then cooling in air to ambient temperatures. The metallographic studies allowed to establish the influence of the heat treatment parameters on the structure of the studied steel, which is ferrite with small areas of lamellar pearlite. After high-speed hot deformation, the average conditional grain diameter is affected by heat treatment, namely the temperature of the end of the cooling, was established by the conducted computational and analytical studies. For the rolled steel products of the SAE brands, it is rational to perform cooling after hot deformation to temperatures of the order of $A_1 + 150^\circ\text{C}$ with subsequent slow cooling, during which a more uniform grain is formed, which will ensure minimal variation in the mechanical properties.

Keywords: low-carbon steel, bar sections, temperature, cooling, structure, grain size, mechanical properties.

For citation: Lutsenko, V. A., Golubenko, T. M., & Lutsenko, O. V. (2024). The influence of processing parameters on the structure and properties of the low-carbon steel. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 621-631. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-621-631>

Стаття надійшла до редакції збірника 29.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)