

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗМІНИ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Луценко В. А., Голубенко Т. М., Луценко О. В., Сівак Г. І.

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

Анотація. Сортовий прокат круглого перерізу з низьковуглецевих сталей марок SAE 1008 вимагає постійного підвищення надійної системи забезпечення якості. Найбільш важливим параметром мікроструктури є розмір зерна, який є одним із найефективніших способів управління структурою, що приводить до зміни механічних властивостей. Металографічні дослідження дозволили встановити вплив параметрів деформаційно-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 саме температура кінця охолодження впливає на середній умовний діаметр зерна. Для прокату зі сталей марок типу SAE 1008 раціональним після гарячої деформації є охолодження до температур $\sim A_1 + 150^\circ\text{C}$ з наступним уповільненим охолодженням, при якому формується більш рівномірне зерно, що забезпечить мінімальний розкид механічних властивостей.

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

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

Перспективними є процеси деформаційно-термічної обробки (ДТО), що включають після гарячої прокатки охолодження за особливими температурно-швидкісними параметрами, які забезпечують формування однорідної структури та властивостей [2, 3].

Залежно від умов проведення гарячої деформації в сталевому прокаті можуть спостерігатися різні структурні стани, які зафіксовані охолодженням та визначають властивості металу [2, 4, 5]. Якщо метал піддавати витримкам при температурі кінця деформації, то в ньому відбуватимуться процеси збиральної рекристалізації, яка проявляється у формуванні зародків, здатних до

подальшого зростання [3-5]. Після гарячої деформації подрібнення аустенітного зерна приводить до зменшення розмірів перлітних ділянок у сталях із невисоким вмістом вуглецю. Утворення внаслідок збиральної рекристалізації великого аустенітного зерна призводить до зменшення кількості структурно-вільного фериту [3, 4]. Тому актуальним є моделювання впливу на структуру та властивості температурних режимів при використанні ДТО сортового прокату із низьковуглецевої сталі марки SAE 1008.

Результати дослідження. Досліджували сортовий прокат із низьковуглецевої сталі марки SAE 1008 [6] круглого перерізу діаметром 9,0...18,0 мм. Круглий сортовий прокат, який після швидкісного чистового блоку має температуру гарячої прокатки (вище за A_3), охолоджували водою перед розкладкою на витки до різних температур ($T_{в/о}$ - температура виткоутворення) вище за A_1 , у подальшому охолоджували із середньою швидкістю $\sim 3,0$ °C/с.

Найбільш важливим параметром мікроструктури є розмір зерна. Основу структури прокату сталі SAE 1008 після ДТО становить ферит та перліт. Розмір зерна є одним із найефективніших способів управління структурою, що впливає на зміну механічних властивостей.

Дані про механічні властивості та структурні характеристики прокату зі сталі SAE 1008, підданого різним режимам ДТО, наведені в таблиці 1 (приведені дані механічних властивостей – середнє значення та середньоквадратичне відхилення).

Таблиця 1

Механічні властивості та структурні характеристики сортового прокату сталі марки SAE 1008 після ДТО

Процес ДТО з температурою $T_{в/о}$	$A_1 + 150^\circ\text{C}$	$A_1 + 250^\circ\text{C}$
Тимчасовий опір, МПа	$430,6 \pm 4,18$	$422,1 \pm 10,61$
Відносне подовження, %	$36,3 \pm 2,11$	$37,6 \pm 3,6$
Відносне звуження, %	$75,2 \pm 1,7$	$75,8 \pm 2,11$
Розмір зерна, номер	8 – 7	7 – 8
Співвідношення ферит/перліт, %	91,6 / 8,4	93,3 / 6,7

При температурах $T_{в/о} = A_1 + 150...250^\circ\text{C}$ охолодження забезпечує формування структури фериту з невеликими ділянками пластинчастого перліту. Структура, що піддана ДТО з різними температурними режимами обробки, наведена на рис. 1.

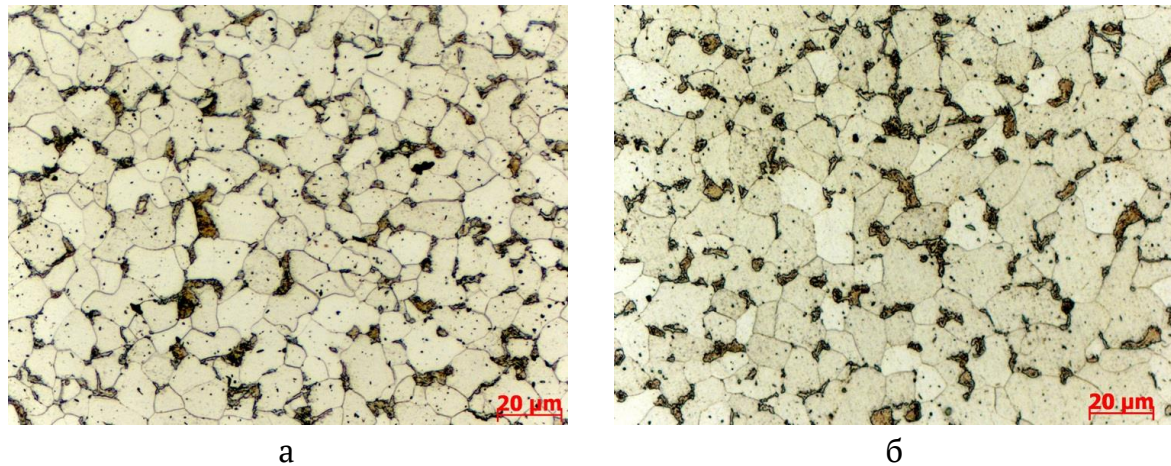


Рисунок 1 – Характерна структура низьковуглецевої сталі SAE 1008, підданої ДТО з різною температурою а – $A_1 + 150^\circ\text{C}$; б – $A_1 + 250^\circ\text{C}$

Вивчали вплив обробки (ДТО) на розмір зерна низьковуглецевої сталі SAE 1008. Проведений статистичний аналіз частот попадань для середнього умовного діаметра зерна [7] показав відмінність вибірок: сортовий прокат при $T_{в/о} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ характеризується більшою схожістю показників, тоді як для $T_{в/о} = A_1 + 250^\circ\text{C}$ властива велика неоднорідність.

Як видно із рис. 2, для режиму $T_{в/о} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ вибіркового розподілу майже нормальний, а для $T_{в/о} = A_1 + 250^\circ\text{C}$ має помітну асиметричність. Отже температурний режим $T_{в/о} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ більш сприятливий для отримання стабільних механічних властивостей.

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

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

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

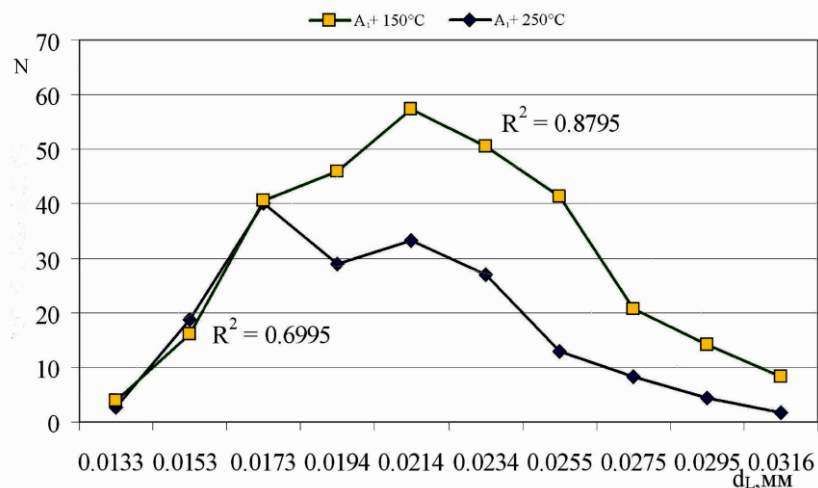


Рисунок 2 – Середні показники частоти влучань (N) для середнього умовного діаметра зерна (dL) у прокаті після ДТО

Рівняння (1) та (2) описують вплив вуглецевого еквівалента на середній умовний діаметр зерна після ДТО. Встановлено, що зі збільшенням вуглецевого еквівалента збільшується розмір зерна, а при охолодженні до температури $T_{в/о} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ коефіцієнт кореляції становить $R^2 = 0,824$, тоді як при $T_{в/о} = A_1 + 250^\circ\text{C}$ – $R^2 = 0,453$. Більший розбіг середнього умовного діаметра зерна, що формується при $T_{в/о} = A_1 + 250^\circ\text{C}$, можна пояснити проходженням процесів метадинамічної та часткової збірної рекристалізації [3]. При $T_{в/о} = A_1 + 150^\circ\text{C}$ формується більш рівномірне зерно, що для сталі SAE 1008 забезпечить мінімальний розкид механічних властивостей (див. табл. 1).

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

При виробництві низьковуглецевого сортового прокату марок типу SAE 1008 слід використовувати схему ДТО 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 на виткоутворювачі призводить до утворення різнозернистості в мікроструктурі, що є небажаним.

ЛІТЕРАТУРА

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. 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>.
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. ASTM A510/A510M-18 Standard Specification for General Requirements for Wire Rods and Coarse Round Wire, Carbon Steel, and Alloy Steel.
7. ДСТУ 8972:2019. Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна. ДП «УкрНДНЦ», 2021.

MODELING OF THE INFLUENCE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CHANGES IN PROCESSING MODES OF LOW-CARBON STEEL

Vladyslav Lutsenko, Tetiana Golubenko, Olga Lutsenko, Ganna Sivak

Abstract. *Round bar sections made from the low-carbon SAE 1008 steel grades require a continuously increase of the improvements of the reliable quality assurance of the system. The grain size, leading to changes in mechanical properties, is the most important microstructure parameter. Influence of the parameters of the deformation and heat treatment on the structure of the investigated steel, which is ferrite with small areas of lamellar pearlite, was determined due to metallographic examinations. Established, based on the conducted computational and analytical investigations, that after high-speed hot deformation, exactly the temperature of the end of the cooling affected the average conditional diameter of the grain. Cooling to temperatures $\sim A_1 + 150^\circ\text{C}$ after hot deformation, followed by slow cooling, during which forms a more uniform grain, which ensures minimal dispersion of the mechanical properties, is rational for rolled steels of the SAE 1008 grades.*

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

REFERENCES

1. Tuboltsev, L.G., Chaika, O.L., & Babachenko, O.I. Prospects of technological development of metallurgical production in Ukraine due to the use of new technologies. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2023. Vol. 37. P. 4-25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>.
2. 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>.
3. 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..>
4. 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>.
5. 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>.
6. ASTM A510/A510M-18 Standard Specification for General Requirements for Wire Rods and Coarse Round Wire, Carbon Steel, and Alloy Steel.
7. DSTU 8972:2019. Steel and alloys. Methods for detection and determination of grain size. DP «UkrNDNTS», 2021.