

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.77.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-91-97



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА РУЛОННОГО ПРОКАТА

Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи.** В статье обоснована актуальность исследования влияния режимов ускоренного охлаждения на структурообразование и свойства стали. **Цель работы.** Исследование влияния температуры завершения ускоренного охлаждения на микроструктуру и свойства рулонного проката из низколегированной стали. **Используемые методы.** В условиях лабораторного комплекса ООО «Инжениринговый центр Термодемограф-МГТУ» выполнены физическое моделирование и исследование процессов выплавки и термомеханической обработки стали химической композиции  $(0,05\text{--}0,15)\text{C} - (0,10\text{--}0,50)\text{Si} - (0,7\text{--}1,65)\text{Mn}$ , дополнительно легированной Cr, Ni, Cu и Mo. Реализованы 6 режимов термомеханической обработки лабораторных образцов, отличающихся температурами конца ускоренного охлаждения в диапазоне  $450\text{--}650^\circ\text{C}$ . Испытания на растяжение выполнялись на универсальной испытательной машине AG-AC 300 фирмы Shimadzu, а также ZWICK серии Z2000 фирмы GmbH&Co. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Meiji Techno с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO. Исследование микроструктуры методом рastровой электронной микроскопии выполнено с применением сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV. **Результаты.** Показано, что при реализации относительно высоких температур конца ускоренного охлаждения ( $650^\circ\text{C}$ ) формируется структура, состоящая из глобулярного бейнита со второй фазой феррита различной морфологии. Такая структура обеспечивает достижение наиболее низких значений предела текучести стали. Температуры в диапазоне  $550\text{--}600^\circ\text{C}$  являются наиболее рациональными температурами конца ускоренного охлаждения, обеспечивающими формирование зерен игольчатого бейнита и повышение прочностных при сохранении пластических характеристик стали. Снижение температуры конца ускоренного охлаждения до  $450^\circ\text{C}$  может сопровождаться формированием участков с мартенситной составляющей, обладающей повышенной твердостью. Это обуславливает дальнейший рост прочности с одновременным снижением показателей пластичности лабораторных образцов проката.

**Ключевые слова:** сталь, рулонный прокат, контролируемая прокатка, ускоренное охлаждение, микроструктура, механические свойства.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием высшего учебного заведения (Соглашение № 075-11-2021-063 от 25.06.2021 г.). В работе принимал участие аспирант группы МТа-21-2 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» Адищев П.Г.

© Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., 2022

### Для цитирования

Исследование влияния режимов ускоренного охлаждения на структурообразование и свойства рулонного проката / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 91–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-91-97>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# STUDY ON THE INFLUENCE OF ACCELERATED COOLING MODES ON THE STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF COILS

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaleeva D.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The paper substantiates the relevance of studying the influence of accelerated cooling modes on the structure formation and properties of steel. **Objective.** Study on the influence of end temperature of accelerated cooling on the microstructure and properties of low-alloy steel coils. **Methods Applied.** The laboratory complex LLC Engineering Center Termodeform-NMSTU was used to carry out the physical modeling and study on the processes of melting and thermomechanical treatment of steel of a chemical composition (0.05–0.15)C – (0.10–0.50)Si – (0.7–1.65)Mn, alloyed with Cr, Ni, Cu and Mo. The authors applied 6 modes of thermomechanical treatment of the laboratory samples, differing in the end temperatures of accelerated cooling in the range of 450–650°C. Tensile tests were carried out, applying a universal testing machine, AG-AC 300 by Shimadzu, as well as ZWICK Z2000 series by Zwick GmbH & Co. A complex of metallographic studies was performed using a Meiji Techno optical microscope, using a Thixomet PRO computer image analysis system. The microstructure was studied by scanning electron microscopy, using JEOL JSM-6490LV. **Results.** It is shown that relatively high temperatures at the end of accelerated cooling (650°C) contribute to forming a structure, consisting of globular bainite with a second phase of ferrite of different morphology. Such a structure ensures the lowest yield strength of steel. Temperatures in the range of 550–600°C are optimal for the end of accelerated cooling, ensuring the formation of grains of acicular bainite and an increase in strength, while maintaining the plastic characteristics of steel. A decrease in the temperature at the end of accelerated cooling to 450°C may be accompanied by the formation of areas with a martensitic component, showing increased hardness. This causes a further increase in strength with a simultaneous decrease in plasticity of the laboratory samples of rolled products.

**Keywords:** steel, coils, controlled rolling, accelerated cooling, microstructure, mechanical properties.

*The research was carried out at Nosov Magnitogorsk State Technical University and funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of running an integrated project, aimed at developing high-tech production, together with a higher educational institution (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021). Adishchev P.G., a postgraduate student of group MTa-21-2 of NMSTU, took part in the research.*

## For citation

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaleeva D.G. Study on the Influence of Accelerated Cooling Modes on the Structure Formation and Properties of Coils. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 91–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-91-97>

## Введение

В настоящее время при производстве рулонной стали широко используется процесс контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. Рассматриваемый процесс предусматривает ограничение роста зерна при нагреве сляба, измельчение рекристаллизованного зерна аустенита, создание и сохранение повышенной плотности потенциальных мест зарождения новой фазы в нерекристаллизованном аустените, обеспечение переохлаждения аустенита в ходе ускоренного охлаждения для повышения скорости образования элементов новой фазы и формирования

дисперсных продуктов по сдвиговому механизму превращения [1].

При этом одной из ключевых технологических операций процесса является последеформационное ускоренное охлаждение (УО) раската. Металловедческой основой применения ускоренного охлаждения является управление процессом превращения аустенита после завершения деформации. В зависимости от параметров прокатки, охлаждения и химического состава низколегированной стали в результате УО возможны несколько вариантов изменения структуры [2]:

- измельчение зерна феррита и устранение полосчатости;

- изменение количества, типа и расположения второй структурной составляющей;
- изменение типа матрицы (от ферритной к структурам промежуточного типа).

Основными параметрами, определяющими особенности структурообразования и формирования свойств стали в процессе ускоренного охлаждения, являются:

- температуры начала ( $T_{\text{н.о.}}$ ) и конца ( $T_{\text{к.о.}}$ ) охлаждения;
- скорость охлаждения.

Изменение указанных параметров позволяет в широком диапазоне управлять структурой и свойствами готового проката [2–5]. В связи с этим целью работы является исследование влияния температуры конца ускоренного охлаждения на микроструктуру и свойства рулонного проката из низколегированной стали.

### Теория, материалы и методы исследования

В качестве материала для исследований использовались лабораторные образцы проката из стали химической композиции (0,05–0,15)C – (0,10–0,50)Si – (0,7–1,65)Mn, дополнительно легированной Cr, Ni, Cu и Mo. Образцы проката изготавливались в условиях лабораторного комплекса ООО «Инжениринговый центр Термодеформ-МГТУ» (г. Магнитогорск) на основе физического моделирования процессов выплавки и термомеханической обработки стали [6–10].

Температура нагрева металла под прокатку составляла  $(1200 \pm 10)^\circ\text{C}$ . Температура окончания процесса деформации составляла  $\text{Ar}_3 + (30–50)^\circ\text{C}$ . Ускоренное охлаждение раскатов осуществлялось из двухфазной ( $\gamma - \alpha$ )-области при температуре на 30–50°C ниже критической точки  $\text{Ar}_3$  /с. В качестве охлаждающей среды использовалась вода. Температура конца ускоренного охлаждения  $T_{\text{к.о.}}$  варьировалась в диапазоне от 450 до 650°C. При достижении заданных значений  $T_{\text{к.о.}}$  образцы охлаждались на воздухе до комнатной температуры. Исследуемые режимы схематично изображены на рис. 1. Исследование механических свойств лабораторных образцов проводилось по стандартным методикам в лаборатории физико-механических и металлографических испытаний ПАО «Магнитогорский металлургический

комбинат», а также ЦКП «НИИ Наносталей» при ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Испытания на растяжение выполнялись на универсальной испытательной машине ZWICK серии Z2000 фирмы GmbH&Co, а также AG-AC 300 фирмы Shimadzu.

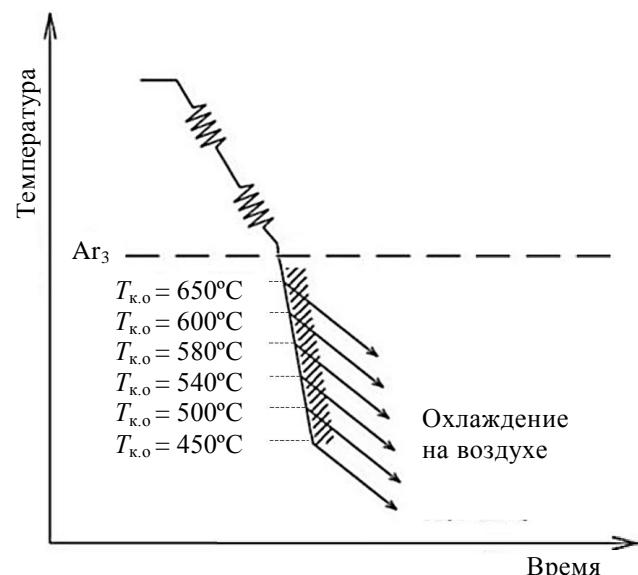


Рис. 1. Исследуемые режимы процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением

Fig. 1. Controlled rolling with accelerated cooling modes under study

Металлографические исследования выполнены в ЦКП «НИИ Наносталей». Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в реактиве состава  $\text{HNO}_3$  (65–68 мас.%) и  $\text{HCl}$  (32–35 мас.%), взятых в соотношении 1:3 по объёму. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Meiji Techno с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO [11].

Измерение твердости по Роквеллу HRB проводилось по ГОСТ 9013-59 [12] с использованием наконечника в виде алмазного конуса типа НК под действием усилия  $F=882,6$  Н (90 кгс).

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования влияния температуры конца ускоренного охлаждения на механические свойства лабораторных образцов проката показаны на рис. 2.

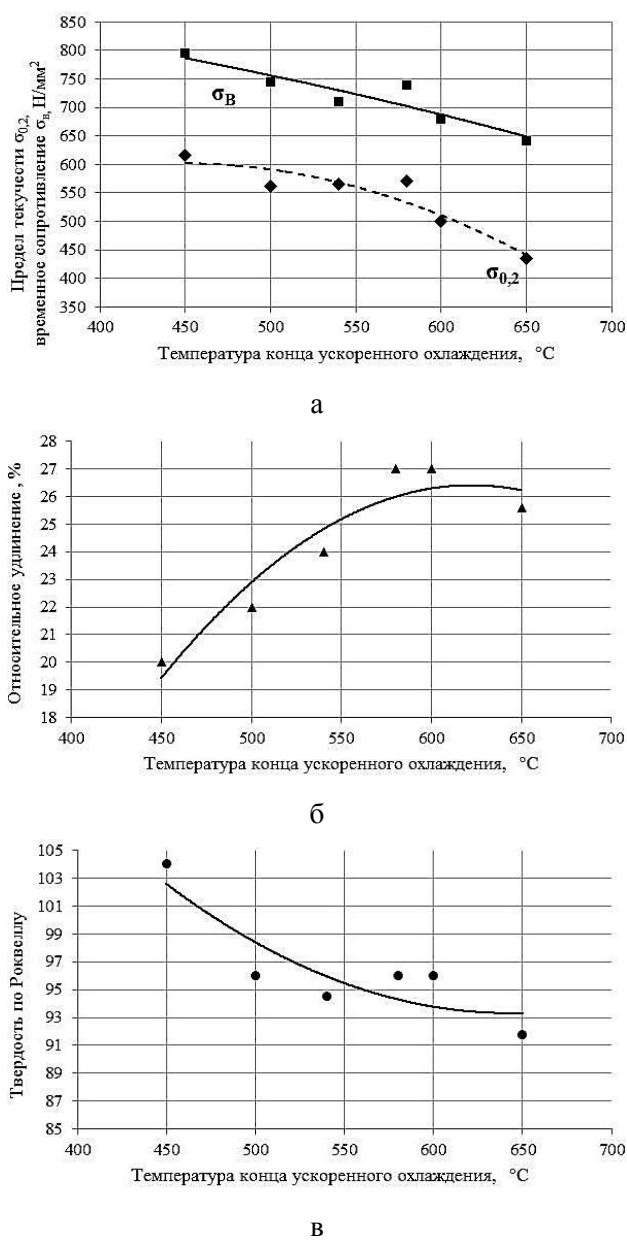


Рис. 2. Влияние температуры конца ускоренного охлаждения на прочностные свойства (а), относительное удлинение (б) и твердость (в) стали

Fig. 2. Influence of the temperature at the end of accelerated cooling on the strength properties (a), elongation (b) and hardness (v) of steel

Как следует из **рис. 2**, при снижении температуры конца ускоренного охлаждения с 650 до 450°C наблюдается рост прочностных характеристик стали: значения временного сопротивления увеличиваются на 150 Н/мм<sup>2</sup>, значения предела текучести – на 180 Н/мм<sup>2</sup> (**рис. 2, а**). Вместе

с тем с понижением температуры конца ускоренного охлаждения увеличиваются значения твердости HRB (**рис. 2, в**). Повышение прочностных свойств сопровождается снижением пластичности стали: в исследуемом диапазоне температур конца ускоренного охлаждения значения относительного удлинения образцов снижаются до 19% (**рис. 2, в**).

На **рис. 3** представлены результаты металлографических исследований поученных образцов. Установлено, что после окончания ускоренного охлаждения при температуре 650°C микроструктура стали состоит из существенной доли глобуллярного бейнита (70%), игольчатого феррита (20%) и незначительной доли полигонального феррита (10%). Дальнейшее снижение температуры до 540–580°C обеспечивает формирование наряду с глобуллярным бейнитом (55%) бейнита игольчатого ( $\approx 30\%$ ) с сохранением небольшой доли квазиполигонального феррита ( $\approx 15\%$ ). Окончание охлаждения при 500°C обеспечивает формирование более низкотемпературной составляющей реечного бейнита (100%) и, как следствие, снижение пластических характеристик стали. При температуре 450°C наблюдается выделение высокоуглеродистой составляющей в виде мартенсита ( $\approx 20\%$ ) наряду с реечным бейнитом ( $\approx 80\%$ ).

Таким образом, при реализации относительно высоких температур конца ускоренного охлаждения (650°C) формируется структура, состоящая из глобуллярного бейнита со второй фазой феррита различной морфологии. Такая структура обеспечивает достижение наиболее низких значений предела текучести стали. Температуры 550–600°C являются наиболее рациональными температурами конца ускоренного охлаждения, обеспечивающими формирование зерен игольчатого бейнита и повышение прочностных при сохранении пластических характеристик стали. Снижение температуры конца ускоренного охлаждения до 450°C может сопровождаться формированием участков с мартенситной составляющей, обладающей повышенной твердостью. Это обуславливает дальнейший рост прочности с одновременным снижением показателей пластичности лабораторных образцов проката.

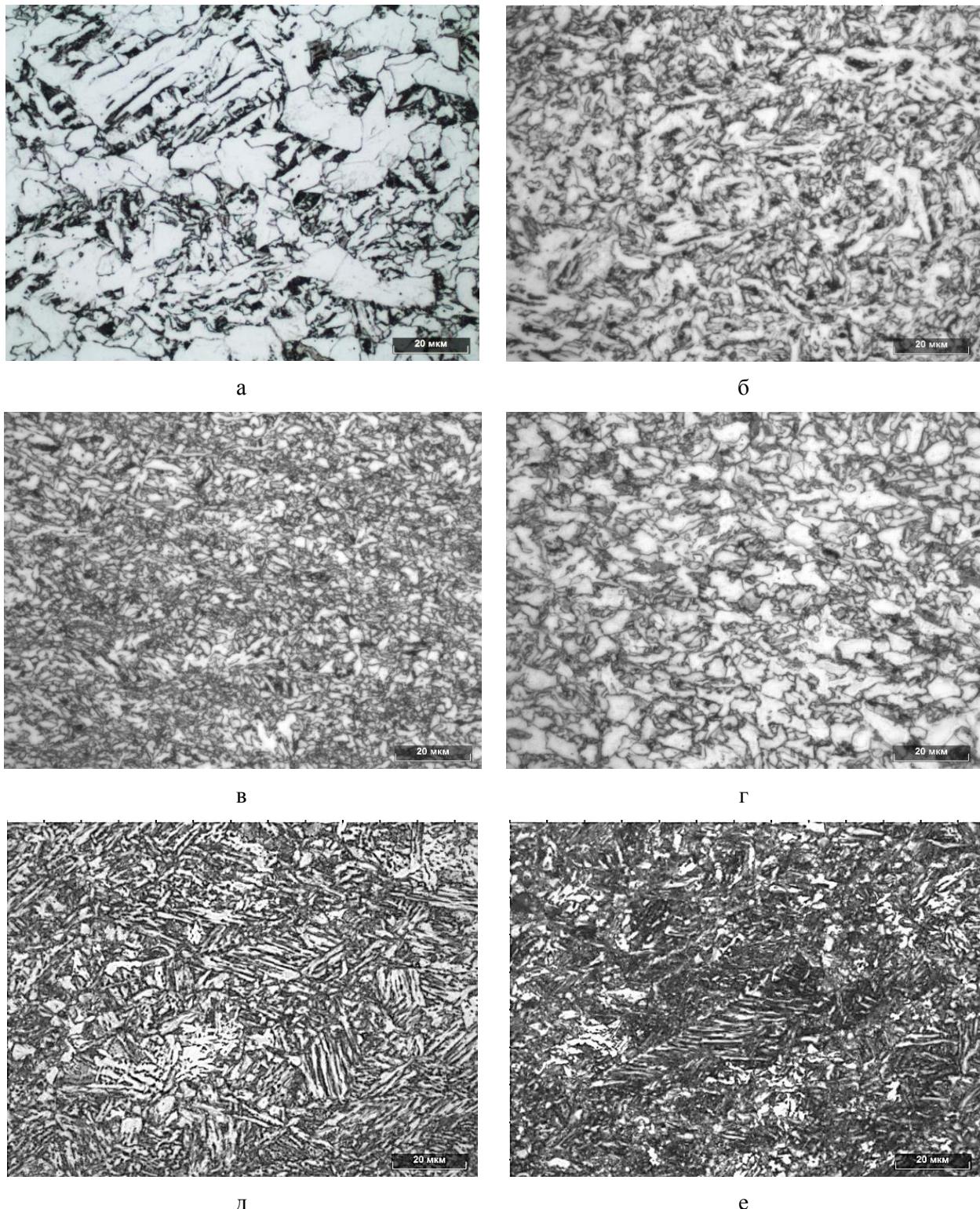


Рис. 3. Влияние температуры конца ускоренного охлаждения на микроструктуру лабораторных образцов ( $\times 1000$ ): а –  $T_{к.о} = 650^{\circ}\text{C}$ ; б –  $T_{к.о} = 600^{\circ}\text{C}$ ; в –  $T_{к.о} = 580^{\circ}\text{C}$ ; г –  $T_{к.о} = 540^{\circ}\text{C}$ ; д –  $T_{к.о} = 500^{\circ}\text{C}$ ; е –  $T_{к.о} = 450^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Influence of the temperature at the end of accelerated cooling on microstructure of the laboratory samples ( $\times 1000$ ): a is  $T_{к.о} = 650^{\circ}\text{C}$ ; б is  $T_{к.о} = 600^{\circ}\text{C}$ ; в is  $T_{к.о} = 580^{\circ}\text{C}$ ; г is  $T_{к.о} = 540^{\circ}\text{C}$ ; д is  $T_{к.о} = 500^{\circ}\text{C}$ ; е is  $T_{к.о} = 450^{\circ}\text{C}$

## Заключение

В ходе исследования установлены следующие основные особенности влияния температуры конца ускоренного охлаждения на микроструктуру и свойства рулонного проката из низколегированной стали:

- завершение ускоренного охлаждения при высоких температурах ( $650^{\circ}\text{C}$ ) ведет к формированию ферритобейнитной микроструктуры с наиболее низкими прочностными свойствами образцов ( $\sigma_{0,2} = 434 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_b = 642 \text{ Н/мм}^2$ );

- при понижении температуры до  $580^{\circ}\text{C}$  прочностные свойства стали увеличиваются ( $\sigma_{0,2} = 570 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_b = 740 \text{ Н/мм}^2$ ) с одновременным увеличением значений относительного удлинения стали до 27 %. Микроструктура стали состоит из зерен игольчатого и глобулярного бейнита с небольшой долей квазиполигонального феррита;

- дальнейшее снижение температуры конца ускоренного охлаждения до  $450^{\circ}\text{C}$  сопровождается формированием мартенситных участков с повышенной твердостью и дальнейшим ростом прочностных свойств стали. Однако относительное удлинение стали резко снижается до 19%.

Полученные данные служат научным заделом при проектировании прогрессивных технологий изготовления многофункциональных материалов с требуемым комплексом эксплуатационных характеристик.

## Список литературы

1. Настич С.Ю. Разработка технологии термомеханической обработки полосового и листового проката из низколегированной стали на основе управления формированием ферритно-бейнитной структуры: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2013. 399 с.
2. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.
3. Исследование влияния режимов контролируемой прокатки трубной стали на структурное состояние горячедеформированного аустенита / П.П. Полецков, М.С. Гущина, Д.Ю. Алексеев, Д.Г. Емалеева, А.С. Кузнецова, О.А. Никитенко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 67–77.
4. Берштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
5. Pickering F.B. High-strength, low-alloy steels – a decade of progress // Proc. Intern. sympos. high-strength, low-alloy steels Microalloying'75. N.Y.: Union Carbide Corp., 1977, pp. 9–31.

6. Физическое моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / Салганик В.М., Денисов С.В., Полецков П.П., Стеканов П.А., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №3 (47). С. 37–39.
7. Научно-производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.О. Артамонова, С.В. Денисов, Д.Н. Чикишев // Сталь. 2014. № 4. С. 104–107.
8. Лабораторный комплекс для моделирования технологических процессов толстолистовой прокатки / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Д.Н. Чикишев, С.В. Денисов, П.А. Стеканов // Металлург. 2014. №10. С. 81–84.
9. Development of heat treatment modes for novel structural sparingly alloyed high-strength steel for arctic and far north applications. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. Metal Science and Heat Treatment. 2021. T. 63. №3–4. Pp. 171–177.
10. The study of influence of heat treatment procedures on structure and properties of the new high-strength steel with increased cold resistance / Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A., Alekseev D.Yu. // CIS Iron and Steel Review. 2020. T. 20. Pp. 50–54.
11. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet Pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. Metal science and heat treatment. 2012. Vol. 54. No. 7–8. P. 387–392.
12. ГОСТ 9013-59. Металлы. Методы измерения твердости по Роквеллу. М.: Изд-во стандартов, 2001. 10 с.

## References

1. Nastich S.Yu. Razrabotka tekhnologii termomekhanicheskoy obrabotki polosovogo i listovogo prokata iz nizkolegirovannoy stali na osnove upravleniya formirovaniem ferritno-beynitnoy struktury: dis. d-ra tekhn. nauk [Development of a thermomechanical treatment technology for low-alloy steel strip and sheet products by controlling the formation of a ferrite-bainite structure: Doctoral thesis]. Moscow, 2013. 399 p.
2. Efron L.I. Metallovedenie v «bolshoy» metallurgii. Trubnye stali [Metal science in "big" metallurgy. Pipe steels]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.)
3. Poletskov P.P., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A. Understanding the effect of controlled rolling regimes for pipe steel on the structural condition of hot-deformed austenite. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Westnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 67–77. (In Russ.)
4. Bershtein M.L., Zaimovsky V.A., Kaputkina L.M. Termomekhanicheskaya obrabotka stali [Thermome-

- chanical treatment of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 480 p. (In Russ.)
5. Pickering F.B. High-strength, low-alloy steels – a decade of progress. Microalloying 75: proceedings of an international symposium on high-strength, low-alloy steels. N.Y.: Union Carbide Corp, 1977, pp. 9–31.
  6. Salganik V.M., Denisov S.V., Poletskov P.P., Stekanov P.A., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu. Physical modeling of production processes of hot-rolled plates with a unique set of properties. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 3 (47), pp. 37–39. (In Russ.)
  7. Salganik V.M., Poletskov P.P., Artamonova M.O., Denisov S.V., Chikishev D.N. Termodeform Research and Production Complex for developing new technologies. *Stal* [Steel], 2014, no. 4, pp. 104–107. (In Russ.)
  8. Salganik V.M., Poletskov P.P., Chikishev D.N., Denisov S.V., Stekanov P.A. Laboratory complex for modeling technological processes of plate rolling. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 10, pp. 81–84. (In Russ.)
  9. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu. Development of heat treatment modes for novel structural sparingly alloyed high-strength steel for Arctic and Far North applications. *Metal Science and Heat Treatment*, 2021, vol. 63, no. 3–4, pp. 171–177.
  10. Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A., Alekseev D.Yu. The study of influence of heat treatment procedures on structure and properties of the new high-strength steel with increased cold resistance. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 20, pp. 50–54.
  11. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet Pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, no. 7–8, pp. 387–392.
  12. State standard GOST 9013-59. Metals. Methods for measuring Rockwell hardness. Moscow: Standards Publishing House, 2001, 10 p. (In Russ.)

Поступила 28.03.2022; принята к публикации 11.04.2022; опубликована 28.06.2022  
Submitted 28/03/2022; revised 11/04/2022; published 28/06/2022

**Полецков Павел Петрович** – доктор технических наук, директор инженерного центра,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru). ORCID 0000-0001-9209-7759

**Алексеев Даниил Юрьевич** – инженер-исследователь,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [d.u.alekseev@mail.ru](mailto:d.u.alekseev@mail.ru)

**Кузнецова Алла Сергеевна** – младший научный сотрудник,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [allakuznetsova.mgtu@mail.ru](mailto:allakuznetsova.mgtu@mail.ru)

**Гулин Александр Евгеньевич** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [a.gulin@mgtu.ru](mailto:a.gulin@mgtu.ru). ORCID 0000-0002-7722-4112

**Емалеева Динара Гумаровна** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [emaleevadg@mail.ru](mailto:emaleevadg@mail.ru). ORCID 0000-0002-2217-180X

**Pavel P. Poletskov** – DSc (Eng.), Director of the Engineering Center,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru). ORCID 0000-0001-9209-7759

**Daniil Yu. Alekseev** – research engineer,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [d.u.alekseev@mail.ru](mailto:d.u.alekseev@mail.ru)

**Alla S. Kuznetsova** – junior researcher,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [allakuznetsova.mgtu@mail.ru](mailto:allakuznetsova.mgtu@mail.ru)

**Aleksandr E. Gulin** – PhD (Eng.), junior researcher,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [a.gulin@mgtu.ru](mailto:a.gulin@mgtu.ru). ORCID 0000-0002-7722-4112

**Dinara G. Emaleeva** – PhD (Eng.), junior researcher,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [emaleevadg@mail.ru](mailto:emaleevadg@mail.ru). ORCID 0000-0002-2217-180X