

УДК 620.186.5:621.771.23

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-69-74>

МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ СТАТИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АУСТЕНИТА В УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Шкатов В.В.¹, Мазур И.П.¹, Кавалек А.², Жучкова Т.С.¹¹ Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия² Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): решение задачи управления структурой и свойствами листового проката при горячей прокатке на широкополосных станах предусматривает разработку математического описания кинетики рекристаллизации деформированного аустенита в условиях, моделирующих деформационно-скоростные и температурные параметры прокатки на стане. **Цель работы:** разработка математической модели кинетики статической рекристаллизации аустенита в углеродистых и низколегированных сталях при горячей прокатке. **Используемые методы:** для разработки модели кинетики рекристаллизации были использованы трехмерные диаграммы рекристаллизации аустенита в углеродистых и низколегированных сталях, построенные по результатам экспериментального изучения структурообразования аустенита в условиях, моделирующих деформационно-скоростные и температурные параметры горячей прокатки в чистовой группе клеток широкополосного стана. Коэффициенты уравнений кинетики рекристаллизации найдены методом множественного регрессионного анализа. **Новизна:** разработана модель кинетики рекристаллизации аустенита, учитывающая наряду с параметрами деформации содержание химических элементов в стали и размер зерна аустенита перед деформацией. **Результаты:** с использованием разработанной модели выполнен анализ влияния химического состава на кинетику рекристаллизации низколегированных сталей. Показано, что изменение химического состава в низколегированных сталях разных марок может приводить к изменению времени рекристаллизации деформированного аустенита более чем в двадцать раз. Колебания содержания элементов в пределах марочного состава сталей также могут оказывать заметное влияние на кинетику рекристаллизации, что следует учитывать при разработке режимов горячей прокатки сталей. **Практическая значимость:** модель кинетики рекристаллизации аустенита может быть использована для прогнозирования структурообразованием аустенита и оптимизации режимов горячей прокатки полосовой стали.

Ключевые слова: рекристаллизация, аустенит, горячая прокатка, широкополосный стан, моделирование, сталь, химический состав.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки России по проекту № 11.1446.2017/ПЧ.

Введение

Большинство технологических процессов термической и термомеханической обработки конструкционных сталей имеет целью получение мелкозернистых однородных структур, обеспечивающих высокие значения прочностных характеристик при достаточном уровне пластичности и вязкости. При горячей пластической деформации конструкционных сталей одним из условий получения однородной ферритно-перлитной структуры с мелким зерном является формирование мелкого однородного зерна аустенита, так как и размер зерна, и разнородность наследуется при последующем $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении.

Известно достаточно большое количество

работ, посвященных исследованию и количественному описанию влияния параметров горячей деформации на рекристаллизацию аустенита в углеродистых и низколегированных сталях [1–7]. При этом в экспериментах по изучению рекристаллизации использовали преимущественно деформацию кручением или сжатием, а разработанные модели описывали кинетику рекристаллизации отдельных групп сталей (например, С-Мn стали, стали микролегированные Nb) и не отражали влияния марочного химического состава сталей. В работе [8] предложена математическая модель кинетики статической рекристаллизации аустенита низколегированных сталей после деформации кручением, учитывающие содержания химических элементов в стали.

В настоящее время 80–90% горячекатаных листовых сталей производится на непрерывных

© Шкатов В.В., Мазур И.П., Кавалек А., Жучкова Т.С., 2017

и полунепрерывных широкополосных станах, что объясняется более высокими технико-экономическими показателями работы этих станов по сравнению со станами других типов [9, 10]. Решение задачи управления структурой и свойствами листового проката при горячей прокатке на широкополосных станах предусматривает разработку количественной модели кинетики рекристаллизации аустенита в условиях, моделирующих деформационно-скоростные и температурные параметры прокатки на стане, учитывающей наряду с параметрами деформации влияние химического состава стали.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Кинетика статической рекристаллизации следует уравнению Аврами-Джонсона-Мела-Колмогорова:

$$X_R = 1 - \exp \left[-B \left(\frac{\tau}{\tau_{0,5}} \right)^n \right], \quad (1)$$

где X_R – степень рекристаллизации, доли; $\tau_{0,5}$ – время, за которое рекристаллизация проходит на 50%, с; τ – текущее время, с; $B = -\ln 0,5$; n – коэффициент.

Величина $\tau_{0,5}$ связана с параметрами деформации и размером зерна аустенита соотношением [6, 8]

$$\tau_{0,5} = A e^{pd_0^g} \dot{\epsilon}^q d_0^s \exp \left(\frac{Q}{RT} \right), \quad (2)$$

где e – истинная деформация, доли; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; d_0 – размер зерна перед деформацией; T – температура деформации; Q – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; A, p, g, q, s – коэффициенты. По данным работы [6], полученным при изучении влияния размера зерна аустенита перед деформацией d_0 на время рекристаллизации углеродистых и низколегированных сталей, значение коэффициента g равно $-0,15$ и не зависит от состава сталей.

Для нахождения коэффициентов уравнений (1) и (2) были использованы трехмерные диаграммы кинетики рекристаллизации аустенита сталей 08пс, 15пс, 09Г2С, 10Г2, 10ХГС, 50, СтЗсп и 65Г (диапазон изменения содержания химических элементов в сталях: 0,085–0,7% С; 0,27–1,67% Мп; 0,01–0,65% Si; 0,026–0,48% Cr). Диаграммы построены авторами [11, 12] по результатам экспериментального изучения рекри-

сталлизации аустенита в условиях, моделирующих деформационно-скоростные и температурные параметры горячей прокатки в чистовой группе клетей широкополосного стана. Образцы из сталей после нагрева при 1200°C (часть марок сталей при 1100°C) прокатывали в один проход на скоростном лабораторном стане при температурах $T=880$ –1160°C с относительным обжатием $\epsilon=\Delta h/h$ от 10 до 45%.

Скорость прокатки образцов разных марок сталей изменялась от 3 до 5 м/с, размер зерна аустенита перед деформацией d_0 – от 48 до 383 мкм. Прокатанные образцы после выдержки τ до 9 с, задаваемой блоком автоматики с точностью $\pm 0,1$ с, закаливались для фиксации высокотемпературного состояния. Количество вариантов прокатки образцов каждой марки стали (варьируемые переменные T, ϵ, τ) составляло от 48 до 64.

При построении диаграммы рекристаллизации для каждой экспериментальной точки, соответствующей заданной совокупности переменных (T, ϵ, τ), по микроструктуре опознавалось состояние стали («до», «во время» и «после» рекристаллизации). Отбирались все точки, принадлежащие одной области (с одинаковым структурным состоянием). Затем в пространстве переменных находились разделяющие эти области границы.

В линеаризующих координатах диаграммы рекристаллизации $x_1=\lg t$, стали $x_2=1/T$ и $x_3=\lg \epsilon$ уравнения границ начала и окончания рекристаллизации имеют вид плоскостей и описываются в общем виде уравнением

$$a_0 + a_1 \lg t + a_2 / T + a_3 \lg \epsilon = 0, \quad (3)$$

где a_0, a_1, a_2 и a_3 – коэффициенты, зависящие от химического состава стали и размера зерна аустенита перед деформацией.

Для нахождения оптимального положения разделяющей два точечных множества границы (соответствует наибольшему её удалению от точек этих множеств) использовался рекуррентный алгоритм разделения множеств.

Уравнения границ начала и окончания рекристаллизации позволяют не только предсказать структурное состояние аустенита (наклепанное, частично рекристаллизованное и рекристаллизованное), но и рассчитать значения времени рекристаллизации $\tau_{0,5}$ и коэффициента n в уравнении (1) после деформации с заданными параметрами.

Принимая, что границы начала и окончания рекристаллизации соответствуют $X_R=0,01$ и $X_R=0,99$, соответственно расчетами по уравнениям границ диаграмм рекристаллизации были сформированы два массива по 56 значений $\tau_{0,5}$ и n для со-

ответствующих им величин истинной деформации e , скорости деформации $\dot{\epsilon}$, температуры деформации T , размера исходного зерна аустенита d_0 и содержании химических элементов в сталях (по семь значений $\tau_{0,5}$ и n на марку стали). С целью снижения ошибки прогноза $\tau_{0,5}$ и n диапазон варьирования параметров деформации и времени рекристаллизации при расчете не превышал диапазона их изменения в диаграммах рекристаллизации.

При допущении, что в уравнении (2) энергия активации рекристаллизации зависит от содержания химических элементов в стали как $Q = b_0 + b_1 [C] + b_2 [Mn] + b_3 [Si] + b_4 [Cr]$, его преобразовали в линейную по параметрам зависимость

$$y = a_0 + a_1 x_1 x_2 + a_2 x_3 + a_3 x_4 + a_4 x_5 + a_5 x_5 x_6 + a_6 x_5 x_7 + a_7 x_5 x_8 + a_8 x_5 x_9, \quad (4)$$

где $y = \ln \tau_{0,5}$; $x_1 = \ln e$; $x_2 = d_0^{-0,15}$; $x_3 = \ln \dot{\epsilon}$; $x_4 = \ln d_0$; $x_5 = 1/T$; $x_6 = [C]$; $x_7 = [Mn]$; $x_8 = [Si]$; $x_9 = [Cr]$.

По полученному массиву данных о кинетике рекристаллизации аустенита восьми марок сталей методом наименьших квадратов были найдены коэффициенты $a_0 - a_8$ и их среднеквадратичные ошибки. Значимость коэффициентов регрессии проверяли по t -критерию Стьюдента при 95%-й доверительной вероятности. Проверку адекватности уравнения регрессии проводили сравнением остаточной дисперсии $S^2_{ост}$ с общей дисперсией экспериментальных данных S^2_y по критерию Фишера $F_y = S^2_y / S^2_{ост}$. Результаты расчета показали, что все найденные значения коэффициентов регрессии статистически значимы, а уравнение описывает результаты эксперимента с достоверностью не ниже 98% (по F_y -критерию). После выполнения обратных преобразований (вычисления коэффициентов $A, p, r, s, b_0 - b_4$, по значениям коэффициентов $a_0 - a_8$) получили зависимость для расчета времени рекристаллизации деформированного аустенита $\tau_{0,5}$ для углеродистых и низколегированных сталей следующего вида:

$$\tau_{0,5} = 8,591 \cdot 10^{-10} e^{-4,09 d_0^{-0,15}} \dot{\epsilon}^{-0,69} d_0^{1,02} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad (5)$$

где e – истинная деформация; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, c^{-1} ; d_0 – размер зерна перед деформацией, мкм; T – температура деформации, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

В уравнении (5) энергия активации $Q = 166620,38 - 9890,75[C] + 3828,18[Mn] + 9029,92[Si] + 17793,04[Cr]$.

Результаты расчета $\tau_{0,5}$ по уравнению (5) сопоставлены с данными диаграмм рекристаллизации на рис. 1. Среднеквадратичная ошибка прогноза времени рекристаллизации $S_{\tau_{0,5}} = 0,228$ с.

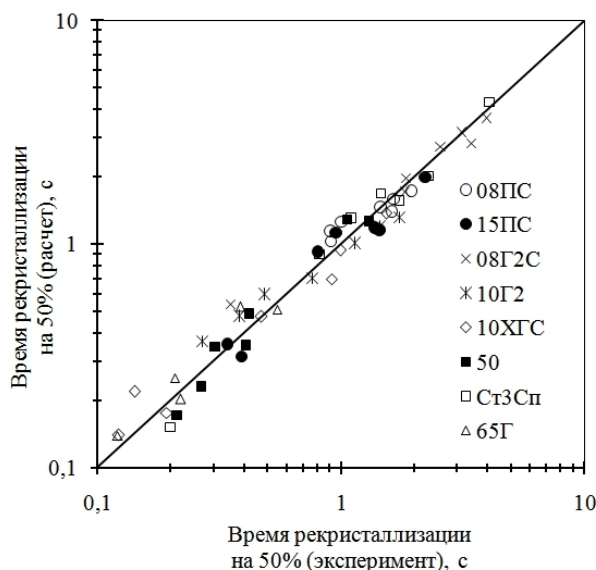


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета $\tau_{0,5}$ с данными диаграмм рекристаллизации аустенита в углеродистых и низколегированных сталях

Методом множественного регрессионного анализа с использованием процедуры последовательного исключения факторов для выбора оптимальной формы уравнения регрессии установлено, что значения коэффициента n в уравнении (1) статистически значимо зависят от содержания элементов в стали и температуры деформации и описываются зависимостью

$$n = 0,701 \exp\left(\frac{K}{T}\right), \quad (6)$$

где $K = 1663,14 - 805,49[C] - 405,96[Mn] - 1967,68[Cr]$.

Среднеквадратичная ошибка прогноза коэффициента n равна 0,231.

Анализ полученных результатов

Полученные результаты были использованы для оценки влияния химического состава низколегированных сталей на кинетику их рекристаллизации. В качестве базовой использовали низколегированную сталь 09Г2 с 0,09% C; 1,6% Mn; 0,25% Si; 0,03% Cr. Расчет $\tau_{0,5}$ проводили по зависимости (5) при последовательном варьировании содержания углерода, марганца, кремния и хрома в предельном диапазоне их изменения в низколегированных сталях (0,04–0,37% C; 0,3–1,8% Mn; 0,17–1,10% Si; 0,02–0,8 Cr). Размер зерна перед деформацией и параметры деформации при расчете оставались неизменными ($d_0 = 30$ мкм, $e = 0,25$, $\dot{\epsilon} = 60$ c^{-1} , $T = 900^\circ C$). Полученные таким путем зависимости величины $\tau_{0,5}$ от содержания химических элементов в низколегированных сталях приведены на рис. 2.

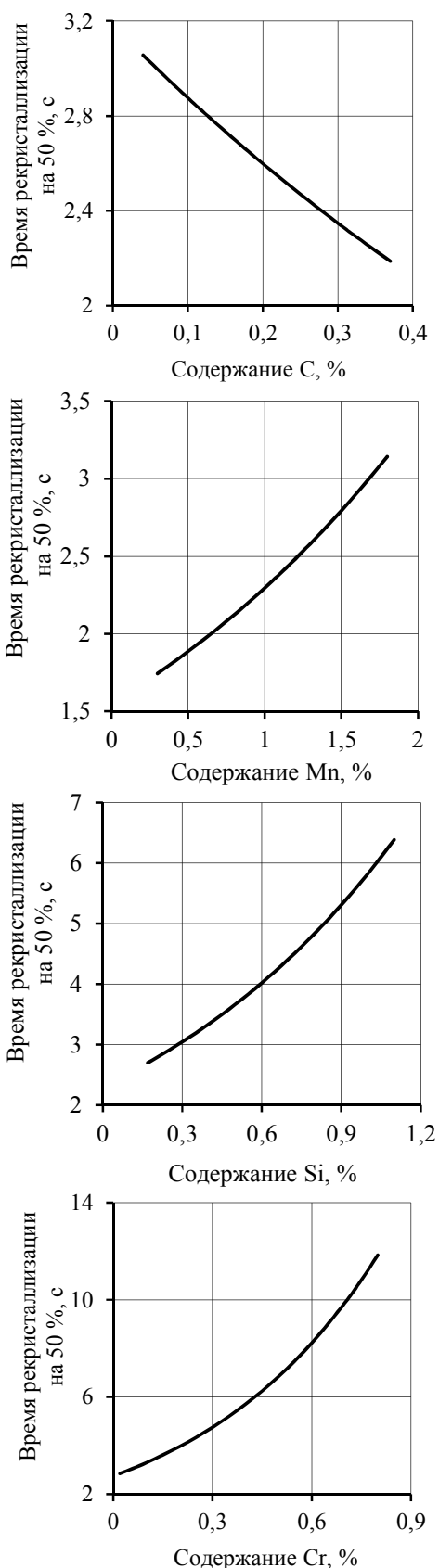


Рис. 2. Влияние содержания элементов на время рекристаллизации $\tau_{0,5}$ низколегированных конструкционных сталей

Установлено, что наибольшее влияние на статическую рекристаллизацию аустенита оказывает изменение содержания кремния и хрома. В целом изменение химического состава в низколегированных сталях разных марок может приводить к изменению значений $\tau_{0,5}$ более чем в двадцать раз.

Кроме того, расчеты показали, что даже при колебаниях содержания элементов в пределах марочного состава стали наблюдается заметное изменение $\tau_{0,5}$. Так, в стали 09Г2 при тех же параметрах деформации колебания содержания элементов в пределах марки (0,04–0,12% С; 1,40–1,80% Мн; 0,17–0,37% Si; 0,02–0,03% Cr) может приводить к изменению величины $\tau_{0,5}$ от 2,3 с до 3,6 с (в 1,6 раза).

Заключение

Разработана математическая модель кинетики статической рекристаллизации аустенита в углеродистых и низколегированных сталях при горячей прокатке, учитывающая наряду с параметрами деформации содержание химических элементов в стали и размер зерна аустенита перед деформацией. Показано, что изменение химического состава в низколегированных сталях разных марок может приводить к изменению времени рекристаллизации $\tau_{0,5}$ более чем в двадцать раз. Колебания содержания элементов в пределах марочного состава сталей также могут оказывать заметное влияние на кинетику рекристаллизации, что необходимо учитывать при разработке режимов горячей прокатки сталей.

Список литературы

1. Zahiri S.H., Byon S.M., Kim S.-I., Lee Y. and Hodgson P.D. Static and Metadynamic Recrystallization of Interstitial Free Steels during Hot Deformation. ISIJ International, 2004, vol. 44, no. 11, pp. 1918–1923.
2. Nakata N. and Militzer M. Modelling of Microstructure Evolution during Hot Rolling of a 780 MPa High Strength Steel. ISIJ International, 2005, vol. 45, no. 1, pp. 82–90.
3. Hodgson P.D., Zahiri S.H. and Whale J.J. The Static and Metadynamic Recrystallization Behaviour of an X60 Nb Microalloyed Steel ISIJ International, 2004, vol. 44, no. 7, pp. 1224–1229.
4. Siciliano F, Jonas J.J. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Microalloyed Nb, Multiply-Alloyed Cr-Mo, and Plain C-Mn Steels. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, vol. 31A, pp. 511–529.
5. Cho S.-H., Kang K.-B. and Jonas J.J. Mathematical Modeling of the Recrystallization Kinetics of Nb Microalloyed Steels. ISIJ International, 2001, vol. 41, no. 7, pp. 766–773.
6. Fernandez A.I., Uranga P., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J.M. Static recrystallization behaviour of a wide range of austenite grain size in microalloyed steels. ISIJ International, 2000, vol. 40, no. 9, pp. 893–901.

7. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСиС, 2005. 432 с.
8. Medina S.F., Quispe A. Improved Model for Static Recrystallization Kinetics of Hot Deformed Austenite in Low Alloy and Nb/V Microalloyed Steels. ISIJ International, 2001, vol. 41, no. 7, pp. 774–781.
9. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Кн.1: Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
10. Коновалов Ю.В. Настоящее и будущее агрегатов для производства горячекатаных листов и полос. Сообщение 6: Широкополосные станы горячей прокатки // Производство проката. 2008. № 6. С. 11–21.
11. Шкатов В.В. Моделирование и оптимизация структурообразования при непрерывной горячей прокатке листовых сталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Липецк, 1998. 39 с.
12. Управление по структуре качеством стали при горячей прокатке / Лизунов В.И., Шкатов В.В., Моляров В.Г., Канев В.П. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 4. С. 52-56.

Поступила 27.03.17.

Принята в печать 27.04.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-69-74>

MODEL OF STATIC RECRYSTALLIZATION KINETICS OF AUSTENITE IN CARBON AND LOW-ALLOY STEELS DURING HOT STRIP ROLLING

Valeriy V. Shkatov – D.Sc. (Eng.), Professor
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: shkatov@mail.ru

Igor P. Mazur – D.Sc. (Eng.), Professor
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mazur_ip@mail.ru

Anna Kawalek – D.Sc. (Eng.), Professor
Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland. E-mail: kawalek@wip.pcz.pl

Tatiana S. Zhuchkova – Postgraduate Student
State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: izuchksi@yandex.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): To be able to control the structural and mechanical properties of the material going through a hot strip mill, it is necessary to build a mathematical model for the recrystallization kinetics of deformed austenite under the conditions that simulate the strain rates and the temperatures characteristic of a real rolling operation. **Objectives:** This research aimed to develop a mathematical model for the static recrystallization of austenite in carbon and low-alloy steels under hot rolling conditions. **Methods Applied:** 3D recrystallization graphs showing the recrystallization of austenite in carbon and low-alloy steels were used for recrystallization model development. The above graphs were built following an experimental study of the austenite structure formed under the conditions that simulate the strain rates and the temperatures found within the finishing mill of a real hot strip mill. The method of multiple regression analysis was applied for obtaining the factors of the recrystallization kinetics equations. **Originality:** A model of the austenite recrystallization kinetics has been developed that, alongside the strain parameters, considers the chemical composition of steel, as well as the austenite grain size prior to deformation. **Findings:** With the help of the developed model, the effect of the chemical composition on the recrystallization kinetics in low-alloy steels has been analysed. The article demonstrates that a change in the chemical composition of different low-alloy steel grades may change the recrystallization time of deformed austenite by more than twenty times. Variations of the chemical composition within a steel grade may also

produce a considerable impact on the recrystallization kinetics, which should be taken into account when developing processes for hot rolling of steel. **Practical Relevance:** The austenite recrystallization model can be used for predicting changes in the austenite structure, as well as for hot strip rolling optimization.

Keywords: Recrystallization, austenite, hot rolling, hot strip mill, modeling, steel, chemical composition.

This research has been carried out as part of the project # '11.1446.2017/PCh' of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

References

1. Zahiri S. H., Byon S.M., Kim S.-I., Lee Y. and Hodgson P.D. Static and Metadynamic Recrystallization of Interstitial Free Steels during Hot Deformation. ISIJ International, 2004, vol. 44, no. 11, pp. 1918–1923.
2. Nakata N. and Militzer M. Modelling of Microstructure Evolution during Hot Rolling of a 780 MPa High Strength Steel. ISIJ International, 2005, vol. 45, no. 1, pp. 82–90.
3. Hodgson P. D., Zahiri S. H. and Whale J. J. The Static and Metadynamic Recrystallization Behaviour of an X60 Nb Microalloyed Steel ISIJ International, 2004, vol. 44, no. 7, pp. 1224–1229.
4. Siciliano F, Jonas J.J. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Microalloyed Nb, Multiply-Alloyed Cr-Mo, and Plain C-Mn Steels. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, vol. 31A, pp. 511–529.
5. Cho S.-H., Kang K.-B. and Jonas J.J. Mathematical Modeling of the Recrystallization Kinetics of Nb Microalloyed Steels. ISIJ International, 2001, vol. 41, no. 7, pp. 766–773.

6. Fernandez A.I., Uranga P., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J.M. Static recrystallization behaviour of a wide range of austenite grain size in microalloyed steels. *ISIJ International*, 2000, vol. 40, no. 9, pp. 893–901.
7. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow: MISIS, 2005, 432 p. (In Russ.)
8. Medina S. F., Quispe A. Improved Model for Static Recrystallization Kinetics of Hot Deformed Austenite in Low Alloy and Nb/V Microalloyed Steels. *ISIJ International*, 2001, vol. 41, no. 7, pp. 774–781.
9. Konovalov Yu.V. *Spravochnik prokatchika. Kn.1 Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos* [Rolling mill operator handbook. Vol. 1: Production of hot-rolled sheets and strips]. Moscow: Heating engineer, 2008, 640 p. (In Russ.)
10. Konovalov Yu.V. The present and the future of hot sheet and strip mills. Message 6: Hot wide strip mills. *Proizvodstvo prokata* [Production of rolled metal], 2008, no. 6, pp. 11–21. (In Russ.)
11. Shkatov V.V. *Modelirovaniye i optimizatsiya strukturoobrazovaniya pri nepreryvnoy goryachey prokatke listovykh staley: avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Modeling and optimization of structure formation during continuous hot rolling of sheet steels: Extended abstract of doctoral dissertation]. L'ipetsk, 1998, 39 p.
12. Lizunov V.I., Shkatov V.V., Molyarov V.G., Kaneev V.P. Quality management by structure during hot rolling. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals], 1999, no. 4, pp. 52–56. (In Russ.)

Received 27/03/17

Accepted 27/04/17

Образец для цитирования

Модель кинетики статической рекристаллизации аустенита в углеродистых и низколегированных сталях при горячей прокатке / Шкатов В.В., Мазур И.П., Кавалек А., Жучкова Т.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №2. С. 69–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-69-74>

For citation

Shkatov V.V., Mazur I.P., Kawalek A., Zhuchkova T.S. Model of static recrystallization kinetics of austenite in carbon and low-alloy steels during hot strip rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 69–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-69-74>
