

УДК 621.771.2

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗГИБА ПЕРЕДНЕГО КОНЦА ПОЛОСЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Чикишев Д.Н.**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением» (chikishev\_denis@mail.ru)  
**Пожидаева Е.Б.**, аспирант (pzhidaeva.e@icloud.com)

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** Выполнен анализ причин образования дефекта «подгибка концов полосы» при горячей прокатке в условиях толстолистового стана 5000. Проведены исследования влияния кинематического, температурного и геометрического факторов асимметрии на возникновение дефекта «подгибка концов полосы». Детально изучено влияние величины рассогласования скоростей рабочих валков на изгиб переднего конца черного раската. Для этого проанализировано 1214 т раскатов (65 слэбов). Для каждого прохода рассмотрено влияние параметров процесса прокатки и величины рассогласования скоростей рабочих валков на форму переднего конца раската. Разработаны и смоделированы в среде программного комплекса DEFORM режимы асимметричной прокатки на стане 5000 листов из легированных трубных сталей для изучения формирования неплоскостности по длине раската. Предложены конкретные рекомендации, проведены промышленные испытания разработанных асимметричных режимов прокатки с их анализом и коррекцией. Данный метод может применяться для любого вида прокатки с возможностью регулирования скоростей верхнего и нижнего валков независимо друг от друга.

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, толстолистовая прокатка, метод конечных элементов, изгиб переднего конца полосы, режим прокатки, слэб, температурный градиент.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-204-208

При толстолистовой прокатке в валках, вращающихся с одинаковыми окружными скоростями, происходит вертикальный изгиб переднего конца полосы, так называемый дефект «лыжа». Повышенный вертикальный изгиб переднего конца приводит к «забуриванию» полосы в роликах машины предварительной правки и/или рольганга и, следовательно, остановам стана [1 – 5].

На черновой стадии прокатки главным фактором асимметрии является температура [6 – 8]. Нижняя поверхность слэба холоднее верхней, поэтому при прокатке изгиб происходит в сторону нижней более холодной поверхности. Значимым температурным градиентом является разница в 10 – 15 °С и более [9 – 15]. Изгиб раската вниз на черновой стадии прокатки приводит к проскальзыванию между роликами рольганга и нижней поверхностью полосы (рис. 1). В результате возникают трудности при кантовке раската. Поэтому для уменьшения негативного влияния температурной асимметрии по толщине раската применяется рассогласование скоростей рабочих валков. Для изгиба раската вверх оператор увеличивает скорость нижнего валка на 1,0 – 8,0 % в зависимости от марки стали и визуальной информации в ручном режиме (рис. 2). Автоматический режим на черновой стадии прокатки не работает. Без наличия нижних пирометров, величина рассогласования скоростей рабочих валков может быть установлена только в ручном режиме.

В некоторых случаях изгиб переднего конца черного раската является достаточно высоким, однако в следующих деформационных проходах изгиб снижается.

Нижняя поверхность раската более холодная из-за наличия контакта с водоохлаждаемыми роликами рольганга, поворотного стола (рис. 3).

Температурный градиент формируется по всей длине раската на следующих этапах:

- при транспортировании слэба от печей до рабочей клетки (за 50 – 100 с);

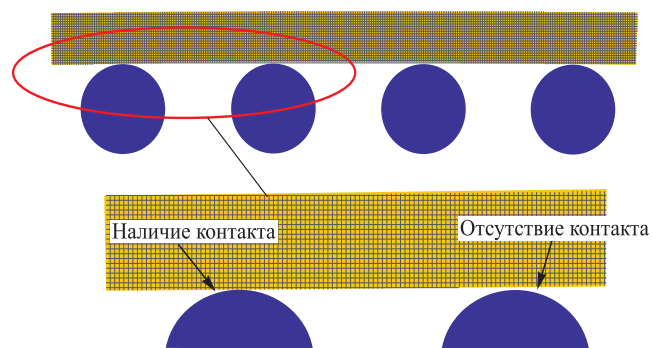


Рис. 1. Изгиб раската вниз на черновой стадии прокатки приводит к проскальзыванию между роликами рольганга и нижней поверхностью полосы

Fig. 1. Down roll bend on the rough rolling step results in slippage between rollers of the roller table and lower surface of the strip

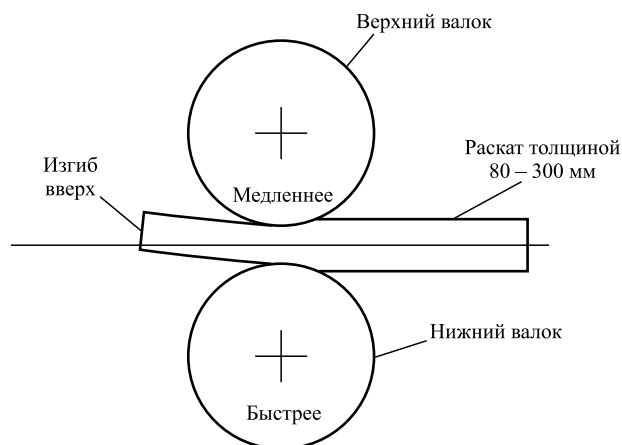


Рис. 2. Схема изгиба переднего конца раската толщиной 80 – 300 мм при прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков

Fig. 2. Scheme of bending of the front end of roll with thickness of 80 – 300 mm at the rolling velocity misalignment with work rolls

- во время первой фазы прокатки за 60 – 120 с (машинное время + паузы 5 – 7 с между проходами и 15 – 20 с при кантовке);
- во время охлаждения промежуточного раската за 200 – 900 с;
- во время второй (третьей) фазы прокатки за 120 – 240 с (машинное время + паузы 5 – 7 с между проходами).

При транспортировании сляба от печей до рабочей клетки температура верхней и нижней поверхности сляба изменяется в соответствии с графиком (рис. 4, 5).

Перед первым деформационным проходом (первая фаза прокатки) температурный градиент между верхней и нижней поверхностью сляба составляет 14 – 15 °С (рис. 6).

Если сляб имеет более холодную нижнюю поверхность, то при прокатке без рассогласования скоростей

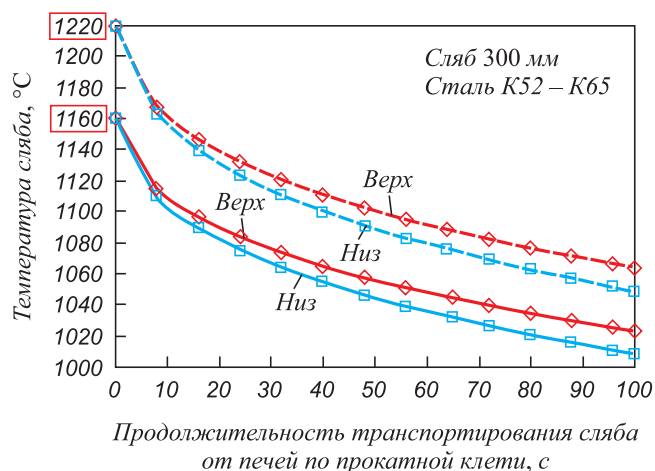


Рис. 4. График изменения температуры верхней и нижней поверхности сляба

Fig. 4. Temperature graph of the upper and lower surfaces of the slab

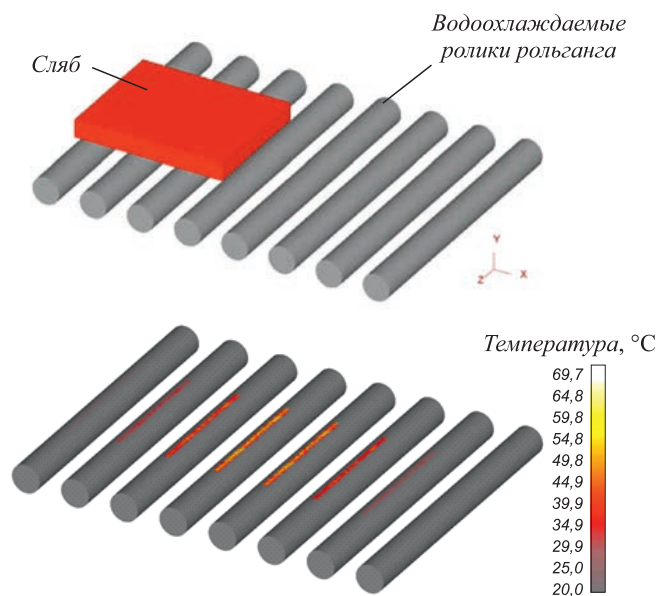


Рис. 3. Разогрев роликов рольганга при контакте с нижней поверхностью сляба (раската) (диаметр роликов 450 мм; расстояние между осями 800 мм)

Fig. 3. Heating of the roller table rollers in contact to a lower surface of the slab (breakdown bar) (roller diameter of 450 mm, the distance between the axles 800 mm)

рабочих валков происходит смещение раската от линии прокатки вниз ( $H_0 = 300$  мм;  $\Delta h = 40$  мм; температурный градиент  $\Delta T = 15$  °С). При этом, чем больше длина раската, тем больше величина неплоскостности по длине. Загиб раската вниз объясняется более высокой скоростью течения верхней поверхности (более пластичной) в сравнении с нижней (менее пластичной).

При прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков в 1,0 и 2,0 % на всей длине (2000 мм) раската происходит его изгиб вверх ( $H_0 = 300$  мм;  $\Delta h = 40$  мм; температурный градиент  $\Delta T = 15$  °С и  $H_0 = 300$  мм;

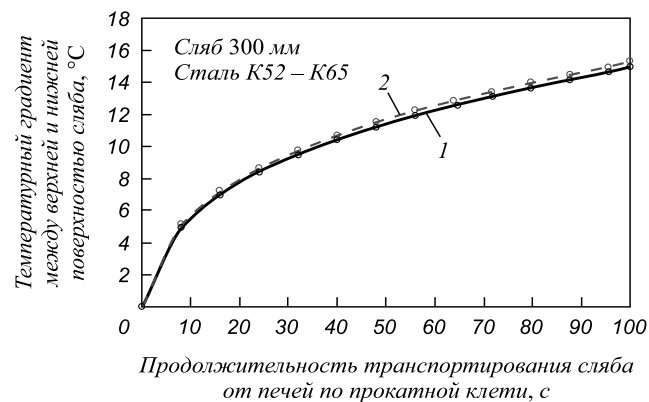


Рис. 5. График изменения температурного градиента между верхней и нижней поверхностями сляба при температуре нагрева, °С: 1 – 1160; 2 – 1220

Fig. 5. Temperature graph of the gradient between the upper and lower surfaces of the slab at heating temperature, °С: 1 – 1160; 2 – 1220

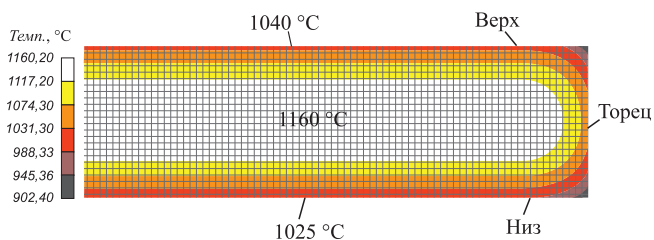


Рис. 6. Распределение температуры по толщине сляба перед первым деформационным проходом ( $H = 300$  мм;  $\Delta T = 15$  °C)

Fig. 6. Temperature distribution through the thickness of the slab prior to the first deformation pass ( $H = 300$  mm;  $\Delta T = 15$  °C)

$\Delta h = 40$  мм; температурный градиент  $\Delta T = 20$  °C). Величина изгиба вверх зависит от величины рассогласования скоростей рабочих валков, температурного градиента между верхней и нижней поверхностью раската, толщины раската, обжатия за проход, длины участка, на котором реализуется рассогласование скоростей. Для получения требуемой плоскостности по длине раската необходим точный выбор величины рассогласования скоростей рабочих валков в зависимости от параметров процесса прокатки.

При прокатке с рассогласованием скоростей в режиме «загиб лыжи» раскат изгибается вверх только на длине лыжи (прокатка с рассогласованием скоростей 3,0 % (длина лыжи 1000 мм;  $H_0 = 300$  мм;  $L_0 = 2000$  мм;  $\Delta h = 40$  мм; температурный градиент  $\Delta T = 15$  °C)). Остальная (задняя часть раската) деформируется в режиме без рассогласования скоростей рабочих валков и в результате раскат «тянет» вниз. Таким образом, формируется неплоскостность по длине раската. Величина рассогласования скоростей рабочих валков должна быть достаточной для формирования загнутого вверх переднего участка раската. Параметры для управления лыжей зависят от условий процесса прокатки.

Таким образом, формирование неплоскостности по длине раската при прокатке на стане 5000 может быть

скомпенсировано следующими технологическими решениями:

- применением рассогласования скоростей рабочих валков по всей длине раската в зависимости от параметров прокатки (толщина раската, обжатие за проход, температурный градиент, величина рассогласования скоростей рабочих валков);
- применением рассогласования скоростей рабочих валков только на переднем участке раската (на длине лыжи) в зависимости от параметров прокатки (толщина раската, обжатие за проход, температурный градиент, величина рассогласования скоростей рабочих валков, длина раската перед проходом, длина лыжи).

Ниже рассмотрены различные варианты первой фазы прокатки стали К60. При прокатке за пять проходов с рассогласованием скоростей рабочих валков 1 % на всей длине раската формируется значительная неплоскостность [16]. При прокатке в режиме «Загиб лыжи» значительная неплоскостность наблюдается только на переднем участке раската, в остальной части неплоскостность имеет умеренный характер. При прокатке с рассогласованием скоростей по всей длине, но с определенной величиной рассогласования в каждом проходе (0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,60 %) неплоскостность раската минимальна.

За время первой фазы прокатки температурный градиент между верхней и нижней поверхностью раската возрастает на 3 – 5 °C до 17 – 20 °C.

Таким образом, при прокатке в первой фазе температурный градиент не превышает 20 °C (без учета температурного градиента по толщине сляба на выходе из печи). Во время охлаждения промежуточного раската температурный градиент изменяется в соответствии с графиками (рис. 7, 8).

За время междеформационной паузы (200 – 900 с) температурный градиент между верхней и нижней поверхностью промежуточного раската возрастает до

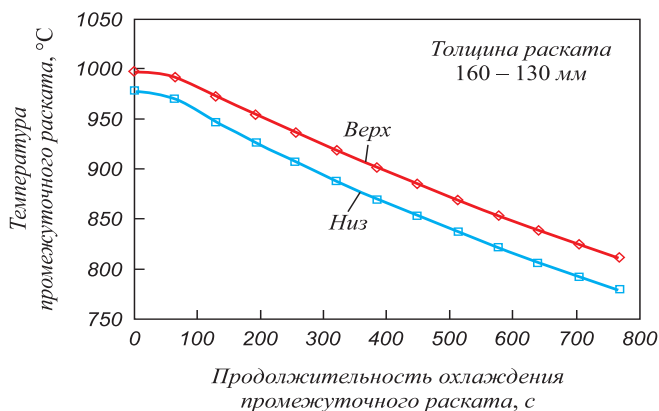


Рис. 7. График изменения температуры верхней и нижней поверхности промежуточного раската

Fig. 7. Temperature graph of the upper and lower surfaces of intermediate breakdown bar

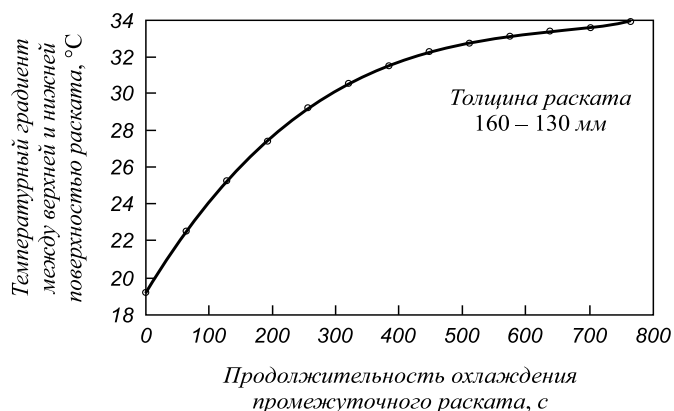


Рис. 8. График изменения температурного градиента между верхней и нижней поверхностью промежуточного раската

Fig. 8. Schedule of changes of the temperature gradient between the upper and the lower surfaces of the intermediate breakdown bar

28 – 34 °С. Таким образом, в первом чистовом проходе (начало второй фазы прокатки) температурный градиент между верхней и нижней поверхностью раската составляет 28 – 34 °С.

Минимизация подгибки концов раската в условиях стана 5000 возможна за счет рассогласования скоростей рабочих валков в двух режимах: автоматическом и ручном.

Автоматический режим характеризуется недостаточным рабочим диапазоном рассогласования скоростей рабочих валков (0 – 0,5 %). Ручной режим, в противоположность автоматическому, имеет слишком большой диапазон (1 – 15 %). Последнее приводит к перерегулированию и возникновению дефекта «загиб концов вверх» на черновой стадии прокатки.

**Выводы.** Детально исследовано влияние величины рассогласования скоростей рабочих валков на изгиб переднего конца чернового раската. Для этого проанализировано 1214 т раскатов (65 слябов). Для каждого прохода изучено влияние параметров процесса прокатки и величины рассогласования скоростей рабочих валков на форму переднего конца раската. Проведена визуальная оценка формы передних концов раската (фотосъемка). Получено полное соответствие фактических форм передних концов с прогнозируемыми при данных технологических параметрах процесса. Это позволило разработать четкие количественные рекомендации для минимизации подгибки концов раската на черновой стадии прокатки в величинах: «технологические параметры (толщина от 180 до 300 мм), обжатие (от 10 до 16 %), температурный градиент» – «регулирующее воздействие (рассогласование скоростей рабочих валков)».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2254943 РФ, МПК7 В 21В 1/22. Устройство для асимметричной прокатки толстолистового металла / А.М. Песин, В.М. Салганик, Э.М. Дригун, Д.Н. Чикишев; опубл. 27.06.2005. Бюл. № 18.
2. Шебанич Э.Н., Климанчук В.В., Хлестов В.М. и др. Совершенствование температурного режима контролируемой прокатки штрипсовых сталей с целью стабилизации их микроструктуры и механических свойств // *Металл и литье Украины*. 2007. № 1 – 2. С. 50 – 54.
3. Морозов Ю.Д., Науменко А.А., Лясоцкий И.В. Влияние термомеханических режимов прокатки и ускоренного охлаждения на формирование механических свойств листового проката из стали класса прочности Х80 // *Металлург*. 2010. № 10. С. 56 – 62.
4. Лоренц У., Херциг К., Блек В., Эвартц Т. И. др. Влияние деформации в двухфазной области  $\gamma+\alpha$  на свойства материала и технологию получения тонкой горячекатаной полосы // *Черные металлы*. Апрель. 2003. С. 42 – 49.
5. Эфрон Л.И. и др. *Металловедческие основы получения хладостойких трубных сталей путем высокотемпературной контролируемой прокатки* // *Сталь* 2003. № 6. С. 69 – 72.
6. Круглова А.А., Орлов В.В., Хлусова Е.И. Влияние горячей пластической деформации в аустенитной области на формирование структуры низколегированной низкоуглеродистой стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. № 12. С. 8 – 12.
7. Эфрон Л.И., Морозов Ю.Д., Голи-Оглу Е.А. Исследование влияния температурно-деформационных режимов контролируемой прокатки на микроструктуру и механические свойства микролегированных сталей для газонефтепроводных труб большого диаметра // *Металлург*. 2011. №1. С. 69 – 74.
8. Романов П.В., Радченко В.П. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении стали: Атлас термокинетических диаграмм. Ч.1. – Новосибирск: Изд-во Сиб. Отд. АН СССР, 1960. – 51 с.
9. Попов В.В. Моделирование превращения карбонитридов при термической обработке сталей. – Екатеринбург: УрО-РАН, 2003. – 279 с.
10. Рыжков М.А., Попов А.А. Методические вопросы построения термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита в низколегированных сталях // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 12. С. 3
11. Ouchi C, Okita T. Austenitic Grain Refinement through Static Recrystallization Immediately after Hot Rolling // *Transactions ISIJ*. 1984. Vol. 24. P. 726 – 733.
12. Kozasu I., Ouchi C., Sampei T., Okita T. Hot rolling as a high-temperature thermo-mechanical process // *Micro Alloying 75*. 1975. Session 1. P. 100 – 115.
13. Ouchi C., Sampei T., Kozasu I. The Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on the Onset Temperature of  $\gamma \rightarrow \alpha$  Transformation after Hot Rolling // *Transactions ISIJ*. 1982. Vol. 22. P. 214 – 222.
14. Коцарь С.Л., Белянский А.Д., Мухин Ю.А. *Технология листопркатного производства*. – М.: *Металлургия*, 1997. – 272 с.
15. Чикишев Д.Н., Пожидаева Е.Б. Математическое моделирование изменения прочностных характеристик микролегированных сталей в процессе термомеханической обработки // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014. Т. 16. № 4 – 3. С. 664 – 668.
16. ASTM 1033-04. Standart practice for quantative measurement and re-orting of hypoeutectoid carbon and low alloy steel phase transformation. ASTM, 2004. – 14 p.

Поступила 3 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 1, pp. 204–208.

## ANALYSIS OF THE CAUSES OF VERTICAL BENDING OF THE STRIP FRONT END AT HOT ROLLING ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING

*D.N. Chikishev, E.B. Pozhidaeva*

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The analysis of the causes of the defect “strip ends bending” was made in conditions of hot rolling at the plate mill 5000. The influ-

ence of kinematic, thermal and geometrical factors on the occurrence of the defect “strip ends bending” was investigated. The influence of the misalignment velocity of work rolls to the bending of front end of a rough billet was studied in details. Therefore 1214 tons of rolls (65 slabs) were examined. The influence of rolling process parameters and misalignment velocity of the work rolls to the shape of the strip front end for each pass was analyzed. The modes of asymmetric rolling

of alloyed pipe steels at the plate mill 5000 have been developed and simulated in DEFORM environment software package. The authors have proposed concrete recommendations. The production tests of developed asymmetric rolling modes were performed with their analysis and correction. This method can be applied to any type of rolling velocity to adjust the upper and lower rollers independently.

**Keywords:** asymmetric rolling, plate rolling, finite element technique, bending of the front end of the strip, rolling mode, slab, temperature gradient.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-204-208

#### REFERENCES

1. Pesin A.M., Salganik V.M., Drigun E.M., Chikishev D.N. *Ustroistvo dlya asimmetrichnoi prokalki tolstolistovogo metalla* [Device for the asymmetric rolling of metal plate]. Patent RF no. 2254943, MPK7 V 21V 1/22. *Byulleten' izobretenii*. 2005, no. 18. (In Russ.).
2. Shebanits E.N., Klimanchuk V.V., Khlestov V.M., Murashkin A.A., Rubets A.S. Improvement of temperature mode of steel strips controlled rolling in order to stabilize its microstructure and mechanical properties. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2007, no. 1–2, pp. 50–54. (In Russ.).
3. Morozov Yu.D., Naumenko A.A., Lyasotskii I.V. Effect of rolling heating and deformation and accelerated cooling regimes on mechanical property formation for rolled steel sheet of strength class Kh80. *Metallurgist*. 2011, vol. 54, no. 9–10, pp. 686–695.
4. Lorents U., Khertsig K., Blek V., Evarits T. etc. Effect of deformation in two-phase  $\alpha + \gamma$  field on the material properties and the technology of producing of thin hot-rolled strip. *Chernye metally*. 2003, no. 4, pp. 42–49. (In Russ.).
5. Efron L.I., Il'inskii V.I., Golovanov A.V., Morozov Yu.D. Production of cold-resistant tube steels by controlled high-temperature rolling. *Steel in Translation*. 2003, vol. 33, no. 6, pp. 60–65.
6. Kruglova A.A., Orlov V.V., Khlusova E.I. Effect of hot plastic deformation in the austenite interval on structure formation in low-alloyed low-carbon steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 2007, vol. 49, no. 11–12, pp. 556–560.
7. Efron L.I., Morozov Yu.D., Goli-Oglu E.A. Effect of controlled rolling regimes on the structure and properties of microalloyed steels for large diameter pipes. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 1–2, pp. 46–53.
8. Romanov P.V., Radchenko V.P. *Prevrashchenie austenita pri neprevyvnom okhlazhdenii stali: Atlas termokineticheskikh diagramm* [Transformation of austenite under continuous cooling of steel: Atlas of thermo-kinetic diagrams]. Part 1. Novosibirsk: Izd-vo Sib. Otd. AN SSSR, 1960. 51 p. (In Russ.).
9. Popov V.V. *Modelirovanie prevrashcheniya karbonitridov pri termicheskoj obrabotke stali* [Modeling of carbonitrides transformation during heat treatment of steels]. Ekaterinburg: UrO-RAN. 2003. 279 p. (In Russ.).
10. Ryzhkov M.A., Popov A.A. Methodological aspects of plotting of thermokinetic diagrams of transformation of supercooled austenite in low-alloy steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2011, vol. 52, no. 11–12, pp. 612–616.
11. Ouchi C., Okita T. Austenitic Grain Refinement through Static Recrystallization Immediately after Hot Rolling, *Transactions ISIJ*. Vol. 24. 1984, pp. 726–733.
12. Kozasu I., Ouchi C., Sampei T., Okita T. Hot rolling as a high-temperature thermo-mechanical process. *Micro Alloying 75*. 1975. Session 1, pp. 100–115.
13. Ouchi C., Sampei T., Kozasu I. The Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on the Onset Temperature of  $\gamma \rightarrow \alpha$  Transformation after Hot Rolling. *Transactions ISIJ*. Vol. 22. 1982, pp. 214–222.
14. Kotsar' S.L., Belyanskii A.D., Mukhin Yu.A. *Tekhnologiya listoprokatnogo proizvodstva* [Rolling production technology]. Moscow: Metallurgiya, 1997. 272 p. (In Russ.).
15. Chikishev D.N., Pozhidaeva E.B. Mathematical modeling of changes in the strength characteristics of micro-alloyed steels at thermal deformation processing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2014, vol. 16, no. 4-3, pp. 664–668. (In Russ.).
16. ASTM 1033-04. *Standart practice for quantative measurement and reporting of hypoeutectoid carbon and low alloy steel phase transformation*. ASTM, 2004. 14 p.

#### Information about the authors:

**D.N. Chikishev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming" (chikishev\_denis@mail.ru)

**E.B. Pozhidaeva**, Postgraduate (pozhidaeva.e@icloud.com)

Received December 3, 2014