

УДК 621.746.27.047.669.041:596.24

## ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

*Краюшкин Н.А., ведущий инженер-программист кафедры энергоэффективных  
и ресурсосберегающих промышленных технологий (KNA-1989@mail.ru)*

*Прибытков И.А., к.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий*

*Шатохин К.С., к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** В работе изложены результаты исследования влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения металла в процессе непрерывной разливки цилиндрических заготовок из коррозионностойких марок сталей. Предполагается, что граничные условия неоднородны по периметру заготовки. В продольном направлении интенсивность охлаждения считается постоянной в рамках выделенного охлаждаемого сектора заготовки. В ходе исследований принималось наличие перетоков теплоты между секторами охлаждения. Приводится сравнительный анализ градиентов температур и возникающих термических напряжений в затвердевающей заготовке при различных интенсивностях охлаждения, реализуемых в зоне вторичного охлаждения. Значения термических напряжений сравниваются с предельно допустимыми для каждой марки стали с целью определения условий охлаждения, при которых термические напряжения не будут превышать допустимую величину. На основе полученных результатов делаются выводы о влиянии интенсивности охлаждения на возникновение наружных и внутренних дефектов в получаемых цилиндрических непрерывнолитых заготовках. Также делаются выводы о влиянии неоднородности граничных условий на формирование температурных полей в затвердевающей цилиндрической непрерывнолитой заготовке. Результаты проведенных исследований представляются в графическом виде и проводится их детальный анализ. Для расчета температурных полей в затвердевающей заготовке использована специально разработанная математическая модель, в основе которой лежит уравнение нестационарной теплопроводности. Для расчета термических напряжений использованы известные методики, которые позволяют рассчитывать величины термических напряжений, возникающих между зонами охлаждения в затвердевающей заготовке. Результаты исследований могут быть использованы для разработки рациональных режимов охлаждения, при которых не будет наблюдаться превышения допустимых термических напряжений. Это, как следствие, позволит уменьшить количество внутренних и наружных дефектов, возникающих в затвердевающей непрерывнолитой заготовке.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, зона вторичного охлаждения, интенсивность охлаждения, неоднородность граничных условий, коэффициент теплоотдачи, скорость разливки, градиенты температур, термические напряжения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-57-61

При формировании цилиндрической непрерывнолитой заготовки ее затвердевание обеспечивается за счет подачи охлаждающей водовоздушной смеси на поверхность заготовки. Известно, что одним из главных определяющих факторов скорости затвердевания заготовки является интенсивность ее охлаждения. Определяющим параметром при этом является величина коэффициента теплоотдачи между поверхностью заготовки и охлаждающей средой: чем выше интенсивность охлаждения заготовки, тем выше скорость ее затвердевания [1, 2].

Однако затвердевание заготовки невозможно рассматривать без учета качества получаемого литого металла. Помимо скорости затвердевания, крайне важно учитывать термические напряжения, возникающие в охлаждаемой заготовке. При превышении допустимых напряжений  $\sigma_{\text{доп}}$  могут возникать наружные и вну-

тренние трещины, что с большой вероятностью приведет к браку получаемой заготовки [3, 4].

На практике тепловое состояние затвердевающей непрерывнолитой заготовки определяется не только интенсивностью ее охлаждения (что учитывается граничными условиями при постановке задачи охлаждения), но и степенью неоднородности граничных условий по периметру заготовки. Указанная неоднородность возникает при неправильной настройке системы охлаждения заготовки, возникновении возмущений, связанных с изменением расходов водовоздушной смеси, подаваемой на охлаждение. Неоднородность граничных условий может вызывать термические напряжения не только в радиальном направлении, но и в осевом, т. е. по длине заготовки [5, 6].

Для анализа влияния неоднородности граничных условий на охлаждение заготовки была разработана

математическая модель [7, 8]. В основе модели лежит дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах [9–11]. Уравнение решалось по неявной разностной схеме Кранка–Николсона в цилиндрических координатах [12–14]. Неоднородность граничных условий формировалась распределением коэффициента конвективной теплоотдачи по периметру заготовки. В ходе исследований определялись температурные поля по длине заготовки в процессе непрерывной разливки стали. Затем по известным методикам [15, 16] рассчитывались термические напряжения в каждом сечении, возникающие в затвердевающем металле. Термические напряжения определялись с учетом возникающих перетоков теплоты между секциями с различной интенсивностью охлаждения.

В ходе исследований предполагалось, что несимметричность охлаждения заготовки наблюдается только по ее окружности. В продольном направлении интенсивность охлаждения сохраняется постоянной в рамках выделенных секторов охлаждения по периметру. При расчете учитывалось влияние каждой зоны охлаждения друг на друга. Длины окружностей секторов охлаждения равны между собой. Рассматриваются термические напряжения, возникающие между областями в соседних зонах охлаждения в каждом сечении.

Несимметричность теплоотвода, представленная на рис. 1, 2, может возникнуть из-за постепенного ухудшения работы водовоздушных форсунок по причине выхода из строя охлаждающих устройств или из-за ошибок в организации процесса охлаждения заготовок. Вследствие этих причин в разных секторах охлаждения интенсивность теплоотвода может отличаться в несколько раз. Для изучения влияния несимметричности нагрева по длине окружности были проведены соответствующие исследования при различных интенсивностях теплоотвода по периметру заготовки.

Градиенты температуры в каждом сечении заготовки определялись по уравнению [15]

$$\text{grad}T = \frac{T_{\text{внутр}} - T_{\text{пов}}}{L}, \text{ К/м}, \quad (1)$$

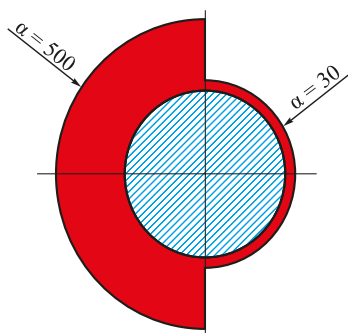


Рис. 1. Распределение интенсивности охлаждения для двух секторов периметра заготовки

Fig. 1. Intensity distribution for two sectors of billet perimeter

где  $T_{\text{внутр}}$  – температура металла на границе раздела жидкой и твердой фазы, °C;  $T_{\text{пов}}$  – температура на поверхности заготовки, °C;  $L$  – толщина корочки затвердевшего металла, мм.

Термические напряжения, возникающие в затвердевающей цилиндрической заготовке, определялись по методикам, представленным в работах [16]:

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\mu} \frac{qS}{2\lambda} \left[ \frac{1}{2} - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right], \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент линейного удлинения стали, °C<sup>-1</sup>;  $E$  – модуль упругости, Па;  $\mu$  – отношение Пуассона (для стали равно 0,3);  $q$  – плотность теплового потока на поверхности заготовки, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – характерный размер заготовки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К);  $r$  – текущий радиус заготовки, м;  $R$  – радиус заготовки, м.

Компоненты термических напряжений определялись по следующим зависимостям [17, 18]:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{\beta E}{1-\mu} \left( \frac{2}{R^2} \int_0^R t r dr - t \right); \\ \sigma_t &= \frac{\beta E}{1-\mu} \left( \frac{1}{R^2} \int_0^R t r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r t r dr - t \right); \\ \sigma_r &= \frac{\beta E}{1-\mu} \left( \frac{1}{R^2} \int_0^R t r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r t r dr \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_t$  и  $\sigma_r$  – осевые, тангенциальные и радиальные напряжения соответственно, МПа.

Необходимо отметить, что при прогнозировании разрушения стали от термических напряжений необходимо использовать временное сопротивление  $\sigma_{\text{в}}$  в качестве допустимого  $\sigma_{\text{доп}}$ . Согласно данным [19, 20],  $\sigma_{\text{доп}}$  принимают равным  $0,9\sigma_{\text{в}}$ . Для коррозионностойких марок сталей  $\sigma_{\text{в}}$  примерно равняется 1010 МПа [16]. Следовательно  $\sigma_{\text{доп}} = 0,9 \cdot 1010 \text{ МПа} = 909 \text{ МПа}$ .

Результаты расчетов представлены на рис. 3 – 6.

На рис. 6 приведены результаты расчетов термических напряжений между соседними секторами охлаж-

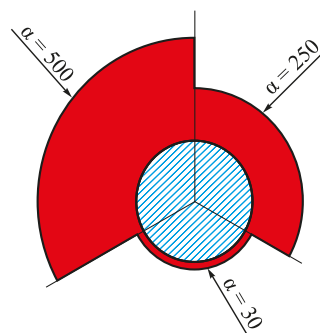


Рис. 2. Распределение интенсивности охлаждения для трех секторов периметра заготовки

Fig. 2. Intensity distribution for three sectors of billet perimeter

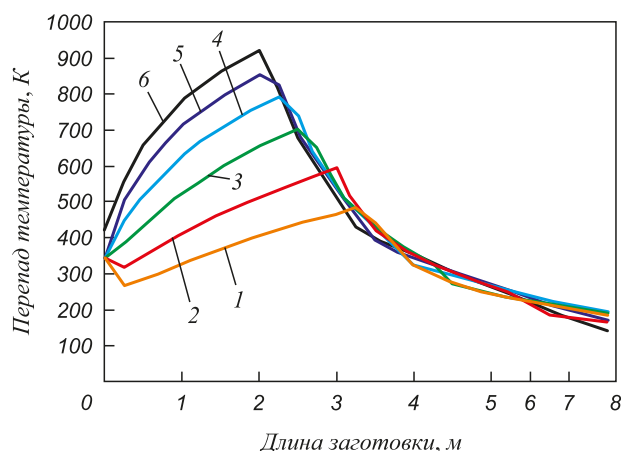


Рис. 3. Изменение перепада температур между центром и поверхностью затвердевающей заготовки по длине заготовки во времени при  $\alpha$ :  
1 – 30; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400; 6 – 500

Fig. 3. Change in the temperature difference between center and surface of the solidifying billet in time along the length of it at  $\alpha$ :  
1 – 30; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400; 6 – 500

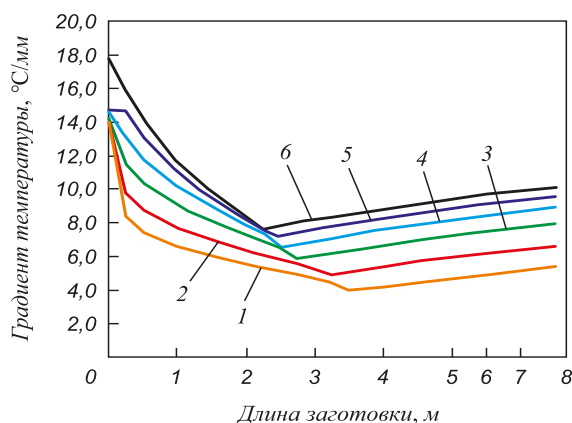


Рис. 4. Изменение градиентов температур по длине заготовки во времени при различной интенсивности теплоотвода при  $\alpha$ :  
1 – 30; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400; 6 – 500

Fig. 4. Change in the temperature gradients along the length of the billet in time at different heat transfer intensities at  $\alpha$ :  
1 – 30; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400; 6 – 500

дения заготовки в каждом сечении с шагом 0,25 м. В каждом из этих секторов интенсивность охлаждения характеризуется различными значениями коэффициентов теплоотдачи. Прямой показана граница допустимых термических напряжений, равных 909 МПа.

Из анализа данных, представленных на рис. 3 – 6, можно сделать вывод о корреляции между величинами термических напряжений и изменением температурных полей. При увеличении разности температур между центром и поверхностью соответственно увеличиваются и значения термических напряжений.

Из рис. 5, 6 видно, что величины радиальных термических напряжений постепенно растут до определенных значений, а затем начинают уменьшаться при

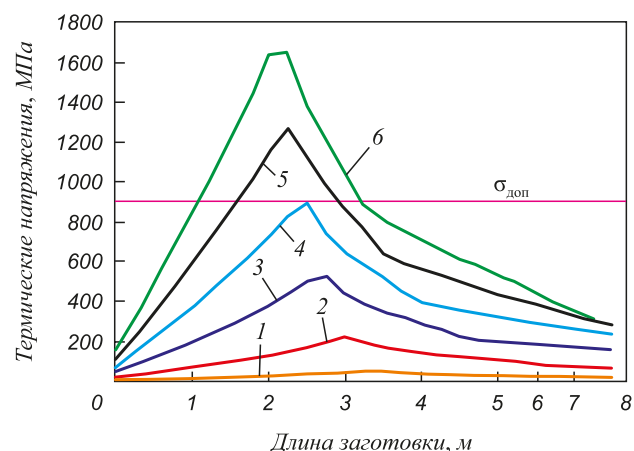


Рис. 5. Изменение термических напряжений при различной интенсивности теплоотвода без учета перетоков теплоты между секторами охлаждения при  $\alpha$ :  
1 – 30; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400; 6 – 500

Fig. 5. Change in thermal stresses at different heat transfer intensities without taking into account the heat transfer between the cooling sectors at  $\alpha$ :  
1 – 30; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400; 6 – 500

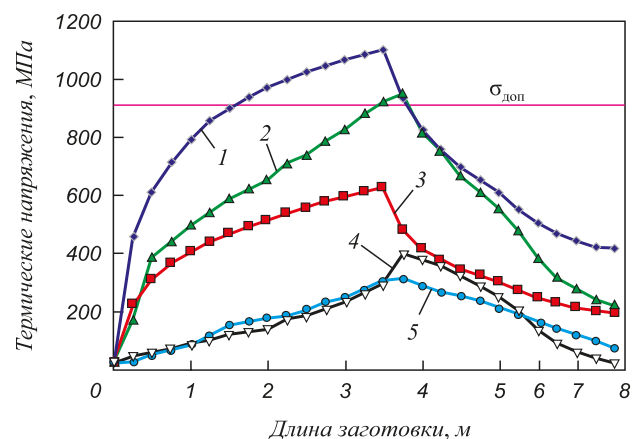


Рис. 6. Изменение термических напряжений при различной интенсивности охлаждения заготовок и учете перетока теплоты между секторами охлаждения при  $\alpha$ :  
1 – 30/500; 2 – 30/400; 3 – 30/250; 4 – 250/400; 5 – 400/500

Fig. 6. Change in thermal stresses at different intensities of billet cooling taking into account heat transfer between the cooling sectors at  $\alpha$ :  
1 – 30/500; 2 – 30/400; 3 – 30/250; 4 – 250/400; 5 – 400/500

различных режимах охлаждения. Однако величины термических напряжений между соседними секторами достигают существенно меньших значений, чем в рамках одного сектора охлаждения (без учета перетоков тепловой энергии). Обусловлено это тем, что разность температур между соседними участками зон охлаждения меньше, чем между поверхностью и центром. Максимальные радиальные термические напряжения возникают между участками с наибольшим и наименьшим теплоотводом от поверхности, что объясняется наибольшей разностью температур в этих областях. При этом видно, что в этом случае величины терми-

ческих напряжений становятся больше  $\sigma_{доп}$ , что существенно увеличивает риск появления наружных и внутренних дефектов.

Результаты расчета, приведенные на рис. 6, показывают, что величины радиальных термических напряжений между секторами охлаждения будут тем меньше, чем меньше разница между интенсивностями теплоотвода в сравниваемых секторах охлаждения. Кроме того видно, что термические напряжения между секторами с интенсивностью охлаждения, характеризующимися коэффициентами теплоотдачи 30 и 400 Вт/(м<sup>2</sup>·К) меньше, чем при коэффициентах теплоотдачи 30 и 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Важно отметить, что значения термических напряжений между зонами с интенсивностью охлаждения при коэффициентах теплоотдачи 30 и 400 Вт/(м<sup>2</sup>·К) превышают допустимые значения на небольшом участке заготовки в третьем секторе зоны вторичного охлаждения. Это позволяет говорить о допустимости применения режимов с данной интенсивностью охлаждения в течение непродолжительного времени в начале процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки.

Во избежание появления дефектов рекомендует-ся по всей длине окружности охлаждаемой заготовки поддерживать одинаковую интенсивность теплоотвода. Это позволит поддерживать температурные поля по толщине заготовки одинаковыми и обеспечить равномерное постепенное затвердевание металла.

**Выводы.** Реализация процесса охлаждения при интенсивности теплоотвода, характеризующейся коэффициентами теплоотдачи 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и выше, может привести к дефектам непрерывнолитой заготовки в силу превышения величины допустимых термических напряжений.

Неоднородные граничные условия охлаждения по периметру цилиндрической заготовки оказывают влияние на формирование температурных полей и могут привести к появлению дефектов литой заготовки.

Вследствие перетоков теплоты между секторами периметра с разной интенсивностью охлаждения температурные поля частично выравниваются, а величины термических напряжений в сечениях становятся меньшими. Последнее обстоятельство требует учета процесса перетока теплоты при разработке математических моделей охлаждения непрерывнолитых заготовок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литье стали. – М.: Металлургия, 1984. С. 131 – 135.

2. Кан Ю.Е. Управление технологическим процессом производства непрерывнолитых заготовок // Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургия, 1989. С. 9 – 16.
3. Лин Дж. Б. Исследование непрерывной разливки стали / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. С.159 – 168.
4. Стальной слиток. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Ю.А. Самойлович и др. – Минск: Белорусская наука, 2000. – 640 с.
5. Малиночка Я.Н., Моисеева Л.А., Есаулова Т.В. Некоторые дефекты непрерывнолитых слитков и улучшение качества металла // Сталь. 1987. № 10. С. 27 – 30.
6. Мищенко И.О. Управление уровнем дефектов поверхности и макроструктуры непрерывнолитых слэбов МНЛЗ: Автореф. дис... канд. тех. наук. – М.: МИСиС, 2006. – 25 с.
7. Краюшкин Н.А., Кузнецова Н.П. Исследование тепловых режимов затвердевания круглых сортовых заготовок из высококачественных марок сталей при полунепрерывной разливке стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 7. С. 45 – 48.
8. Кузнецова Н.П., Краюшкин Н.А. Сравнительный анализ процесса полунепрерывной разливки стали в России и Европе // 66-ые Дни науки МИСиС. – М.: МИСиС, 2011. С. 365.
9. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: Учеб. пособие. – М.: Металлургия, 1988. – 142 с.
10. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков. – М.: Металлургия, 1991. – 216 с.
11. Дождиков В.И. Теплофизические закономерности формирования непрерывного слитка и совершенствование систем его охлаждения: Автореф. дисс... док. техн. наук. – М., 1995. – 46 с.
12. Кузнецова Н.П., Краюшкин Н.А. Исследование тепловых режимов затвердевания при полунепрерывной разливке круглых стальных слитков для производства бесшовных труб // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 3. С. 34 – 38.
13. Иерусалимов И.П., Суковатин И.В. Исследование динамики продвижения слитка в МНЛЗ // Сталь. 2003. № 4. С. 26 – 29.
14. Журавлев В.А., Колодкин В.М. САПР технологии металлургических процессов кристаллизации // Литейное производство. 1986. № 4. С. 27 – 28.
15. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей: Учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
16. Темлянцева М.В., Осолкова Т.Н. Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения сталей и сплавов. – М.: Флинта: Наука, 2005. – 195 с.
17. Краснокутский П.Г., Кривандин В.А., Безруков В.И., Оляк В.Д. Температурные напряжения в условиях скоростного струйного нагрева металла // Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 11. С. 25 – 27.
18. Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка. – М.: Металлургия, 1990. – 151 с.
19. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.
20. Краснокутский П.Г., Кривандин В.А., Оляк В.Д., Безруков В.И. Определение допустимой интенсивности нагрева металла // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 7. С. 115 – 119.

Поступила в редакцию 29 июня 2017 г.

После доработки 27 марта 2018 г.

Принята к публикации 25 декабря 2018 г.



## FORMATION OF TEMPERATURE FIELDS AND THERMAL STRESSES ARISING DURING SOLIDIFICATION OF CYLINDRICAL CONTINUOUSLY CAST STEEL BILLETS

N.A. Krayushkin, I.A. Pribytkov, K.S. Shatokhin

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),  
Moscow, Russia

**Abstract.** The article presents investigation results of the effect of inhomogeneity of boundary conditions on the intensity of metal cooling in the process of continuous casting of cylindrical billets from corrosion-resistant steels. It is assumed that the boundary conditions are nonuniform along the billet perimeter. In the longitudinal direction, the cooling intensity is assumed to be constant within the cooled sector of the billet. During the research it was believed that there are flows of thermal energy between the cooling sectors. A comparative analysis of temperature gradients and resulting thermal stresses in the solidified billet at different cooling intensities realized in the secondary cooling zone was carried out. The values of thermal stresses are compared with the maximum permissible for each grade of steel in order to find those cooling conditions in which the thermal stresses do not exceed the permissible values. Based on the results obtained, conclusions are drawn about the effect of cooling intensity on the occurrence of external and internal defects in the resulting cylindrical continuous cast billets. The authors have also made the conclusions about the effect of inhomogeneity of the boundary conditions on the formation of temperature fields in a solidified cylindrical continuously cast billet. The results of the conducted studies are presented in a graphic form and their detailed analysis is carried out. To calculate the temperature fields in the solidifying billet, a specially developed mathematical model was used, based on the equation of nonstationary heat conductivity. For the calculation of thermal stresses, known mathematical formulas have been used that allow calculating the values of thermal stresses arising between cooling zones in the solidifying billet during the continuous casting of steel. The obtained data are of high practical importance, since they can be used to develop rational cooling regimes, in which excess permissible thermal stresses will not be observed. This, as a consequence, will reduce the number of internal and external defects arising in the solidifying continuously cast billet.

**Keywords:** continuous casting, secondary cooling zone, cooling intensity, inhomogeneity of the boundary conditions, heat transfer coefficient, casting speed, temperature gradients, thermal stress.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-57-61

### REFERENCES

1. Evteev D.P., Kolybalov I.N. *Nepriyryvnoe lit'e stali* [Continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1984, pp. 131–135. (In Russ.).
2. Kan Yu.E. Process control of cast billets production. In: *Nepriyryvnaya razlivka stali* [Continuous casting]. Moscow: Metallurgiya, 1989, pp. 9–16. (In Russ.).
3. *A study of the continuous casting of steel*. Brussels: International Iron and Steel Institute, 1977. (Russ.ed.: Lean J.B. *Issledovanie nepriyryvnoi razlivki stali*. Moscow: Metallurgiya, 1989, pp. 9–16).
4. Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A., Filippov V.V. *Stal'noi slitok: v 3-kh t. T. 2. Zatverdevanie i okhlazhdenie* [Steel ingot: in 3 vols. Vol. 2. Solidification and cooling]. Minsk: Bel. na-vuka, 2000, 637 p. (In Russ.).
5. Malinochka Ya.N., Moiseeva L.A., Esaulova T.V. Some defects in continuously cast slabs and metal quality improvement. *Stal'*, 1987, no. 10, pp. 27–30. (In Russ.).
6. Mishchenko I.O. *Upravlenie urovнем дефектов поверхности i makrostruktury nepriyryvno-litykh slyabov MNLZ: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk.* [Management of defects level of surface and macrostructure of cast slabs: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Moscow: MISiS, 2006, 25 p. (In Russ.).
7. Krayushkin N.A., Kuznetsova N.P. Investigation of thermal conditions of round billets of high-quality steel solidification for semi-continuous casting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 7, pp. 45–48. (In Russ.).
8. Kuznetsova N.P., Nikitin D.A. Comparative analysis of the process of semicontinuous casting of steel in Russia and Europe. In: *66-e dni nauki NITU "MISiS"* [66th Scientific Days in NUST MISiS]. Moscow: MISiS, pp. 287–294. (In Russ.).
9. Emel'yanov V.A. *Teplovaya rabota mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok: Uchebnoe posobie* [Thermal operation of continuous casting machines: Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 142 p. (In Russ.).
10. Skvortsov A.A., Akimenko A.D., Ul'yanov V.A. *Vliyaniye vneshnikh vozdeystvii na protsess formirovaniya slitkov* [Influence of external influences on the formation of ingots]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 216 p.
11. Dozhnikov V.I. *Teplofizicheskie zakonomernosti formirovaniya nepreryvnogo slitka i sovershenstvovanie sistem ego okhlazhdeniya: avtoref. diss... doktora tekhn. nauk* [Thermophysical regularities in the formation of a continuous ingot and the improvement of its cooling systems: Extended Abstract of Dr. Tech. Sci. Diss.]. Moscow: 1995, 46 p. (In Russ.).
12. Kuznetsova N.P., Krayushkin N.A. Research of thermal modes of solidification in semi-continuous casting of round steel ingots for the production of seamless tubes. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 3, pp. 34–38. (In Russ.).
13. Ierusalimov I.P., Sukovatn I.V. Investigation of dynamics of strand movement in caster. *Stal'*. 2003, no. 4, pp. 26–29. (In Russ.).
14. Zhuravlev V.A., Kolodkin V.M. CAD technology of metallurgical processes of crystallization. *Liteinoe proizvodstvo*. 1986, no. 4, pp. 27–28. (In Russ.).
15. Gusovskii V.L., Lifshits A.E. *Metodiki rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei: uchebno-spravochnoe izdanie* [Methods for calculating the heating and heat treatment furnaces: Educational and reference book]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, 400 p. (In Russ.).
16. Temlyantseva M.V., Oskolkova T.N. *Treshchinoobrazovanie v protsessakh nagreva i okhlazhdeniya staley i splavov* [Cracking in heating and cooling processes of steels and alloys]. Moscow: Flinta: Nauka, 2005, 195 p. (In Russ.).
17. Krasnokutskii P.G., Krivandin V.A., Bezrukov V.I., Ol'yak V.D. Thermal stresses in a high-speed jet of metal heating. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo*. 1983, no. 11, pp. 25–27. (In Russ.).
18. Mirsalimov V.M., Emel'yanov V.A. *Napryazhennoe sostoyaniye i kachestvo nepreryvnogo slitka* [Stress state and quality of continuous ingot]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 151 p. (In Russ.).
19. Taits N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Technology of steel heating]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 567 p. (In Russ.).
20. Krasnokutskii P.G., Krivandin V.A., Ol'yak V.D., Bezrukov V.I. Determination of permissible intensity of metal heating. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1984, no. 7, pp. 115–119. (In Russ.).

### Information about the authors:

N.A. Krayushkin, Senior Software Engineer of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”  
(KNA-1989@mail.ru)

I.A. Pribytkov, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, Deputy Head of the Chair

K.S. Shatokhin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”

Received June 29, 2017

Revised March 27, 2018

Accepted December 25, 2018