

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК В МНЛЗ

*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, зам. зав. кафедрой по уч. работе*

*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.** Изложены результаты исследования влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения металла в процессе непрерывной разливки цилиндрических заготовок из антикоррозионных марок сталей. Предполагается, что граничные условия неоднородны по длине заготовки. Приводится сравнительный анализ градиентов температур и возникающих термических напряжений в затвердевающей заготовке при разных режимах охлаждения, реализуемых в зоне вторичного охлаждения. На основе полученных результатов делаются выводы о влиянии интенсивности охлаждения на качество получаемых цилиндрических непрерывнолитых заготовок. Также даются рекомендации по организации рациональных тепловых режимов разливки цилиндрических непрерывнолитых заготовок.

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

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-9-650-655

При формировании круглой непрерывнолитой заготовки ее затвердевание обеспечивается за счет подачи охлаждающей водовоздушной смеси на поверхность заготовки. Известно, что одним из главных факторов скорости затвердевания заготовки является интенсивность ее охлаждения. Определяющим параметром при этом является величина коэффициента теплоотдачи между поверхностью заготовки и охлаждающей водой: чем выше интенсивность охлаждения заготовки, тем быстрее она затвердевает [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 внутренние трещины, что с большой вероятностью приведет к браку получаемой заготовки [3, 4].

На практике тепловое состояние затвердевающей непрерывнолитой заготовки определяется не только интенсивностью охлаждения (что учитывается граничными условиями при постановке задачи охлаждения), но и степенью неоднородности граничных условий по ее длине. Указанная неоднородность возникает при неправильной настройке системы охлаждения заготовки, возникновении возмущений, связанных с изменением

расходов подаваемых на охлаждение водо-воздушной смеси. 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. Неоднородность граничных условий задавалась графиком изменения распределения коэффициентов конвективной теплоотдачи по длине заготовки. В ходе исследований определялись температурные поля по длине заготовки в процессе непрерывной разливки стали. Затем по известным формулам рассчитывались градиенты температур в каждом сечении и термические напряжения, возникающие в затвердевающем металле с шагом 0,25 м.

Изменение градиентов по длине в каждом сечении определялось по уравнению [9]

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

где  $T_{\text{внутр}}$  – температура металла на границе раздела жидкой и твердой фазы, °С;  $T_{\text{пов}}$  – температура на по-

верхности заготовки, °С;  $L$  – толщина корочки затвердевшего металла, мм.

Термические напряжения, возникающие в затвердевающей цилиндрической заготовке, определялись по уравнению [10 – 12]

$$\sigma = \frac{\beta E}{2} (1 - \nu) (T_{\text{внутр}} - T_{\text{пов}}) 10^{-6}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент линейного расширения стали, °С<sup>-1</sup>;  $E$  – модуль упругости, Па;  $\nu$  – отношение Пуассон (для стали равно 0,3).

Для описания процесса затвердевания за основу принимается дифференциальное уравнение энергии с внутренними источниками теплоты, особенностью которого является учет выделения теплоты кристаллизации. В общем виде уравнение энергии при наличии внутренних источников теплоты записывается в виде [13, 14]

$$\rho \left( \frac{\Delta h}{d\tau} \right) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_v, \quad (3)$$

где  $\frac{\Delta h}{d\tau}$  – полная (субстанциальная) производная энтальпии по времени, Дж/(м<sup>3</sup>·с);  $q_v$  – плотность внутренних источников теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К).

Уравнение решалось по неявной разностной схеме Кранка-Николсона в цилиндрических координатах [15].

В таблице представлены характеристики исследованных режимов охлаждения, которые определяют различную степень неоднородности граничных условий, например недостаток количества охлаждаемой среды, изменения количества подаваемой охлаждающей смеси по длине заготовки и т.д. Во всех режимах на воздухе предполагается одинаковая интенсивность охлаждения, характеризуемая коэффициентом теплоотдачи  $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . При расчетах принималось, что имеется симметрия граничных условий по окружности.

В ходе исследований проводился анализ зависимости градиентов температур в сечениях от интенсивности охлаждения заготовки и возникающих термических напряжений, появляющихся в заготовке по мере ее охлаждения. Исследовались выбранные режимы для зоны вторичного охлаждения и воздуха.

Все исследования проводились с целью найти те условия охлаждения, при которых максимальные термические напряжения, возникающие в заготовке  $\sigma_{\text{max}}$ , будут меньше допустимых термических напряжений  $\sigma_{\text{доп}}$  для антикоррозионных марок сталей. Это важно, так как в случае превышения допустимых термических напряжений велика вероятность появления наружных и внутренних трещин, что ведет к браку получаемой заготовки.

Необходимо отметить, что при прогнозировании разрушения стали от температурных напряжений не-

обходимо использовать временное сопротивление  $\sigma_{\text{в}}$  в качестве  $\sigma_{\text{доп}}$ . Согласно данным работ [16, 17]  $\sigma_{\text{доп}}$  принимают равным  $0,9\sigma_{\text{в}}$ . Для антикоррозионных марок сталей  $\sigma_{\text{в}}$  примерно равняется 1010 МПа [5]. Следовательно  $\sigma_{\text{доп}} = 0,9 \cdot 1000 \text{ МПа} = 909 \text{ МПа}$ .

На рис. 1 – 7 показано изменение градиентов и термических напряжений, возникающих при охлаждении заготовки по ее длине.

Как видно из рис. 1, градиенты температур при коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  на поверхности затвердевающей заготовки получаются значительно ниже допустимых. Это объясняется тем, что при таком режиме интенсивность отвода теплоты от поверхности заготовки станет минимальной. Благодаря этому заготовка будет охлаждаться гораздо медленнее, чем при более интенсивном охлаждении. Это приведет к уменьшению градиентов температур по длине заготовки.

При коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  по длине ЗВО термические напряжения постепенно увеличиваются, достигая максимума на выходе из зоны вторичного охлаждения (рис. 2). В зоне воздушного естественного охлаждения происходит постепенное снижение термических напряжений, что объясняется уменьшением разностей температур на границе раздела фаз и поверхностью заготовки.

При коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  также происходит постепенное увеличение термических напряжений, что объясняется увеличением перепада температур по сечению в затвердевшем металле (рис. 3). Причем термические напряжения при таком режиме будут больше, чем в режимах I и II, что объясняется большей интенсивностью отвода тепла от затвердевшего металла.

Из рис. 4 видно, что при постепенном снижении интенсивности теплоотдачи по длине заготовки термические напряжения тоже постепенно снижаются, несмотря на небольшой рост в начале. Это объясняется тем, что

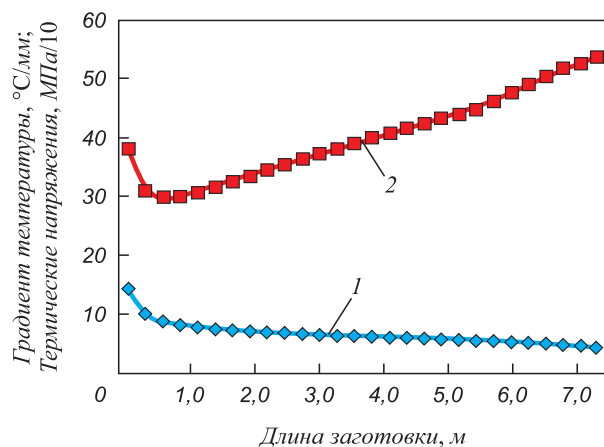


Рис. 1. График изменения градиентов температур (1) и термических напряжений (2) в режиме I

Fig. 1. Diagram of temperature gradients (1) and thermal stresses (2) at the mode I

Исследуемые режимы охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) и на воздухе

**Tested cooling modes in the secondary billet cooling zone (SBCZ) and on air**

Режим	Коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Схема распределения интенсивности охлаждения <i>1</i> – заготовка, <i>2</i> – коэффициент теплоотдачи	Описание режима
I	$\alpha = 30$		Равномерное охлаждение заготовки по всей длине с минимальной интенсивностью охлаждения на воздухе
II	$\alpha = 250$		Равномерное охлаждение заготовки по всей длине в ЗВО
III	$\alpha = 500$		Равномерное охлаждение заготовки по всей длине в ЗВО
IV	$\alpha_1 = 400,$ $\alpha_2 = 300,$ $\alpha_3 = 200,$ $\alpha_4 = 100,$ $\alpha_5 = 30$		Постепенное снижение интенсивности охлаждения заготовки по всей длине
V	$\alpha_1 = 30,$ $\alpha_2 = 100,$ $\alpha_3 = 200,$ $\alpha_4 = 300,$ $\alpha_5 = 400$		Постепенное увеличение интенсивности охлаждения заготовки по всей длине
VI	$\alpha_1 = 400,$ $\alpha_2 = 30,$ $\alpha_3 = 400$		Резкое снижение интенсивности охлаждения заготовки на локальном участке в ЗВО
VII	$\alpha_1 = 30,$ $\alpha_2 = 400,$ $\alpha_3 = 30$		Резкое увеличение интенсивности охлаждения заготовки на локальном участке в ЗВО

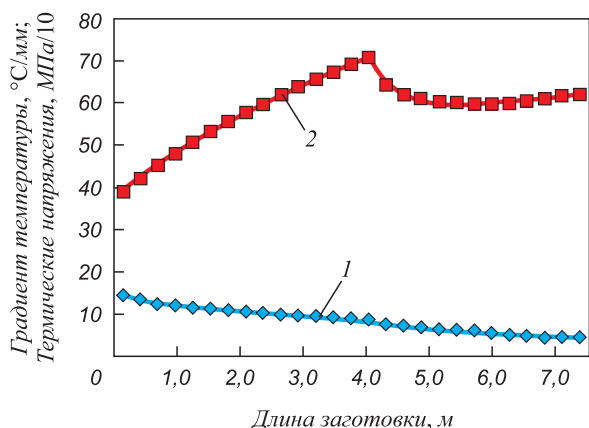


Рис. 2. График изменения градиентов температур (1) и термических напряжений (2) в режиме II

Fig. 2. Diagram of temperature gradients (1) and thermal stresses (2) at the mode II

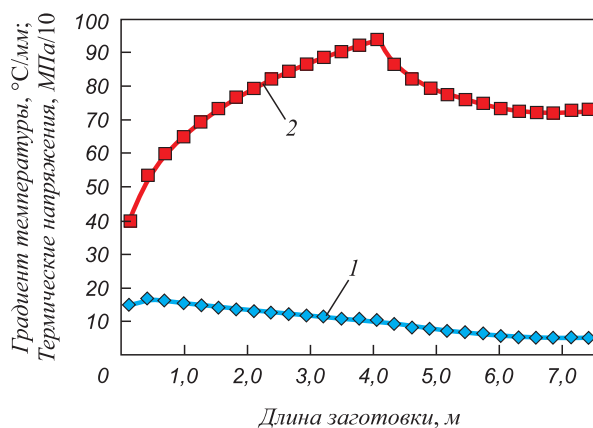


Рис. 3. График изменения градиентов температур (1) и термических напряжений (2) в режиме III

Fig. 3. Diagram of temperature gradients (1) and thermal stresses (2) at the mode III

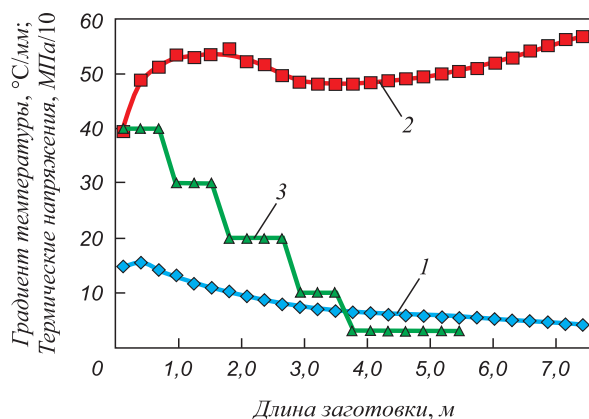


Рис. 4. График изменения градиентов температур (1) и термических напряжений (2) при постепенном снижении коэффициентов теплоотдачи,  $\alpha/10$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) (3) по всей длине ЗВО (режим IV)

Fig. 4. Diagram of temperature gradients (1) and thermal stresses (2) at the gradual reduction of heat transfer coefficients,  $\alpha/10$ , W/(m<sup>2</sup>·K) (3) over the entire secondary cooling length (mode IV)

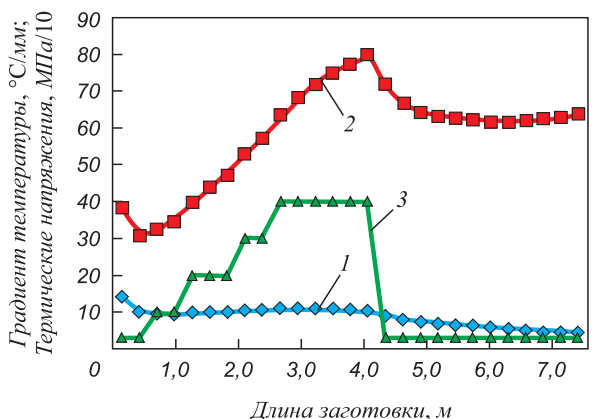


Рис. 5. График изменения градиентов температур (1) и термических напряжений (2) при постепенном увеличении коэффициентов теплоотдачи,  $\alpha/10$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) (3) по всей длине ЗВО (режим V)

Fig. 5. Diagram of temperature gradients (1) and thermal stresses (2) at the gradual increasing of heat transfer coefficients,  $\alpha/10$ , W/(m<sup>2</sup>·K) (3) over the entire secondary cooling length (mode V)

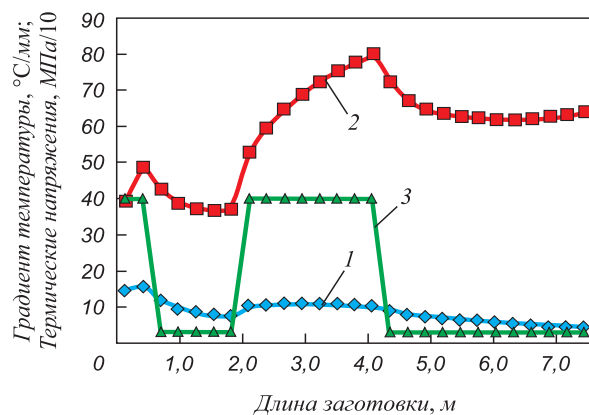


Рис. 6. График изменения градиентов температур (1) и термических напряжений (2) при резком снижении коэффициента теплоотдачи,  $\alpha/10$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) (3) в ЗВО (режим VI)

Fig. 6. Diagram of temperature gradients (1) and thermal stresses (2) at the sharp reduction of heat transfer coefficient,  $\alpha/10$ , W/(m<sup>2</sup>·K) (3) in the secondary cooling zone (mode VI)

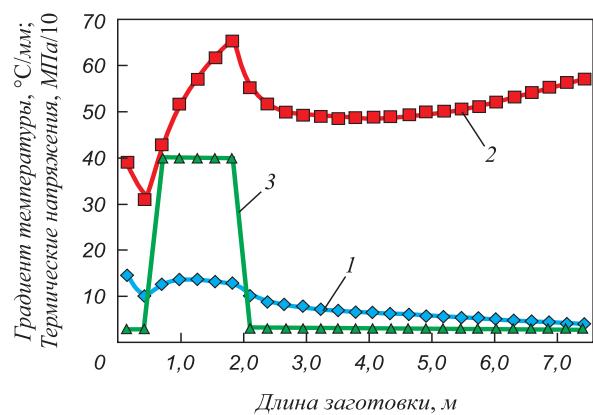


Рис. 7. График изменения градиентов температур (1) и термических напряжений (2) при резком увеличении коэффициента теплоотдачи,  $\alpha/10$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) (3) в ЗВО (режим VII)

Fig. 7. Diagram of temperature gradients (1) and thermal stresses (2) at the sharp increasing of heat transfer coefficient,  $\alpha/10$ , W/(m<sup>2</sup>·K) (3) in the secondary cooling zone (mode VII)

при уменьшении значений коэффициентов теплоотдачи разность температур по сечению тоже становится меньше и, следовательно, термические напряжения падают.

На рис. 5 постепенный рост термических напряжений по длине заготовки также объясняется постепенным ростом коэффициентов теплоотдачи. При выходе на воздух снова наблюдается снижение величин термических напряжений вместе со снижением интенсивности теплоотдачи.

При резком повышении интенсивности охлаждения затвердевающей заготовки на локальном участке в этой области происходит снижение величин термических напряжений (рис. 6). При возвращении коэффициентов теплоотдачи на прежний уровень термические напряжения также начинают расти, что связано с увеличением перепада температур в сечениях.

При резком увеличении интенсивности теплоотдачи на локальном участке наблюдается увеличение термических напряжений, что полностью согласуется с предыдущими результатами исследований (рис. 7).

Из анализа результатов исследований следует, что наименьшие термические напряжения происходят в режиме I. Однако при этом виден их рост при неизменной интенсивности теплоотдачи. Увеличение термических напряжений наблюдается по всей ЗВО также в режимах II и III. Более того, как видно из рис. 3, при коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  термические напряжения достигают значений выше допустимых  $\sigma_{\text{доп}}$  для антикоррозионных марок сталей, что с большой долей вероятности может привести к внутренним и наружным трещинам.

В случаях с режимами VI и VII, когда происходит локальное резкое снижение или увеличение интенсивности охлаждения заготовки, видно, что аналогично реагируют и термические напряжения. При резком снижении интенсивности охлаждения вследствие уменьшения перепада температур по сечению значения термических напряжений также падают. И, наоборот, при резком увеличении интенсивности охлаждения, как в режиме VII, наблюдается рост термических напряжений. Резкое изменение термических напряжений при температурах ведения процесса непрерывной разливки стали также может привести к появлению наружных и внутренних дефектов.

В режиме V значения термических напряжений не превышают допустимых, но наблюдается существенная неоднородность их распределения по длине заготовки, что также может привести к появлению дефектов в заготовке.

Наиболее рациональным с точки зрения допустимых термических напряжений можно считать режим IV. Объясняется это тем, что в данном режиме в силу высокой интенсивности теплоотдачи в начале ( $\alpha = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ) термические напряжения растут, но с постепенным уменьшением интенсивности теплоотдачи практически монотонно снижается и величина термических

напряжений, не превышая при этом допустимых значений  $\sigma_{\text{доп}}$ . При достижении минимальных значений интенсивности теплоотдачи видно, что термические напряжения снова начинают расти, что, впрочем, свойственно для всех семи режимов. Объясняется это тем, что в зоне выхода металла из ЗВО на воздух внутри, где заготовка полностью затвердела, ее температура в центре также уменьшается, но медленнее, чем на поверхности. Именно поэтому начинают увеличиваться градиенты температур. Это, в свою очередь, ограничивает время охлаждения заготовки до того момента, пока не будут достигнуты допустимые термические напряжения.

Из проведенного анализа хорошо видна прямая корреляция между неоднородностью граничных условий охлаждения заготовки и величинами термических напряжений, возникающих в радиальном направлении: чем выше интенсивность охлаждения, тем больше термические напряжения. Это позволяет управлять режимами охлаждения и прогнозировать вероятность появления наружных и внутренних трещин в отливаемых заготовках в зависимости от количества подаваемой охлаждающей среды.

**Выводы.** Показано, что неоднородность граничных условий оказывает сильное влияние на тепловое состояние затвердевающей непрерывнолитой заготовки и может приводить к появлению различных дефектов в получаемой заготовке.

При организации охлаждения заготовок в ЗВО необходимо выбирать рациональную схему формирования граничных условий по длине заготовки с учетом ее геометрических размеров и теплофизических свойств металла.

#### 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. – В кн.: Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургия, 1989. С. 9 – 16.
3. Лин Дж.Б. Исследование непрерывной разливки стали. – М.: Металлургия, 1982. – 200 с.
4. Стальной слиток. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, В.В. Филиппов. – Минск: Бел. наука, 2000. – 640 с.
5. Малиночка Я.Н., Моисеева Л.А., Есаулова Т.В. Некоторые дефекты непрерывнолитых слябов и улучшение качества металла // Сталь. 1987. № 10. С. 27 – 30.
6. Мищенко И.О. Управление уровнем дефектов поверхности и макроструктуры непрерывнолитых слябов МНЛЗ: Автореф. дис... канд. техн. 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., Никитин Д.А. // 66-е дни науки НИТУ «МИСиС». С. 287 – 294.
9. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей: Учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
10. Темлянцева М.В., Осолкова Т.Н. Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения сталей и сплавов. – М.: Флинта: Наука, 2005. – 195 с.



11. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 567 с.
12. Metallurgicheskaya teplotekhnika. T. 1. Teoreticheskie osnovy: Uchebnyk dlya vuzov / V.A. Krivandin, V.A. Arutyunov, B.S. Mastryukov i dr. – М.: Metallurgiya, 1986. – 424 с.
13. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: Учеб. пособие. – М.: Metallurgiya, 1988. – 142 с.
14. Акименко А.Д., Коротков, К.П., Майоров Н.П. Освоение непрерывной разливки стали. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 227 с.
15. 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.
16. 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.
17. 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 3 ноября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 9, PP. 650–655.

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS HETEROGENEITY ON THE COOLING RATE OF CYLINDRICAL BILLETS AT CCM

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

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

**Abstract.** The article presents the results of the investigation of influence of the boundary conditions heterogeneity on the rate of cooling of the metal during the continuous casting of cylindrical billets of high-quality steel grades. It was assumed that the boundary conditions are not uniform along the length of the billet. The authors have made the comparative analysis of temperature gradients and thermal stresses occurring in solidifying billet at different cooling modes implemented in the secondary cooling zone. The conclusions about the impact of the cooling intensity on the quality of the cylindrical cast billets were obtained on the basis of these results. The article also provides recommendations on the organization of rational heating modes of casting of cylindrical cast billets.

**Keywords:** continuous casting, secondary cooling zone, cooling intensity, boundary conditions heterogeneity, heat transfer coefficient, casting mode, temperature gradients, thermal stress.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-9-650-655

### REFERENCES

1. Evteev D.P., Kolybalov I.N. *Nepreryvnoe 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: *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting]. Moscow: Metallurgiya, 1989, pp. 9–16. (In Russ.).
3. *A study of the continuous casting of steel*. International Iron and Steel Institute, Brussels, 1977. (Russ.ed.: Lean J.B. *Issledovanie nepreryvnoi 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. navuka, 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 urovnem defektov poverkhnosti i makrostruktury nepreryvno-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. In: *66-e dni nauki NITU "MISiS" [66th Scientific Days]*. Moscow: MISiS, pp. 287–294. (In Russ.).
9. 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.).
10. Temlyantseva M.V., Oskolkova T.N. *Treshchinoobrazovanie v protsessakh nagreva i okhlazhdeniya staley i splavov* [Cracking in the heating and cooling processes of steels and alloys]. Moscow: Flinta: Nauka, 2005, 195 p. (In Russ.).
11. Taits N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Technology of steel heating]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 567 p. (In Russ.).
12. Krivandin V.A., Arutyunov V.A., Mastryukov B.S. etc. *Metallurgicheskaya teplotekhnika. T.1. Teoreticheskie osnovy: Uchebnyk dlya vuzov* [Metallurgical heat engineering. Vol.1. Theoretical foundations: A Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 424 p. (In Russ.).
13. 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.).
14. Akimenko A.D., Korotkov, K.P., Maiorov, N.P. *Osvoenie nepreryvnoi razlivki stali* [Development of continuous casting of steel]. Leningrad: Sudpromgiz, 1960, 227 p. (In Russ.).
15. 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.).
16. Krasnokutskii P.G., Krivandin V.A., Bezrukov V.I., Ol'yak V.D. Thermal stresses in a high-speed jet of metal heating. *Kuznechno-shampovochnoe proizvodstvo*. 1983, no. 11, pp. 25–27. (In Russ.).
17. Krasnokutskii P.G., Krivandin V.A., Ol'yak V.D., Bezrukov V.I. Determination of permissible metal heat intensity. *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 November 3, 2015