



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-50-55>
УДК 620.18:620.192.41

Поступила 23.05.2025
Received 23.05.2025

ИССЛЕДОВАНИЯ УСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ РАЗЛИВКЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКИ ДИАМЕТРОМ 200 ММ

И. О. ПИСАРЕНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: stol.tu@bmz.gomel.by

В работе проведены исследования влияния усадочных процессов в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок на образование поверхностных дефектов при разливке непрерывнолитой круглой заготовки диаметром 200 мм. Определены необходимые критерии усадки непрерывнолитой заготовки для образования оптимальной корочки заготовки путем выбора гильз с определенным геометрическим исполнением, а также подбора шлакообразующих смесей индивидуального химического состава.

Ключевые слова. Непрерывнолитая заготовка, кристаллизатор, гильза, конусность, геометрия, усадка, воздушный зазор, шлакообразующая смесь.

Для цитирования. Писаренко, И. О. Исследования усадочных процессов в кристаллизаторе при разливке непрерывнолитой круглой заготовки диаметром 200 мм / И. О. Писаренко // Литье и металлургия. 2025. № 3. С. 50–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-50-55>.

STUDY OF SHRINKAGE PROCESSES IN THE MOLD DURING CASTING OF CONTINUOUSLY CAST ROUND BILLET WITH DIAMETER OF 200 MM

I. O. PISARENKO, OJSC “BSW – Management Company of “BMC” Holding”,
Zhlobin, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: stol.tu@bmz.gomel.by

The study investigates the influence of shrinkage processes in the mold of a continuous casting machine on the formation of surface defects during the casting of a 200 mm diameter round billet. The necessary shrinkage criteria for the continuously cast billet were determined to form an optimal shell by selecting molds with a specific geometric configuration and by using slag-forming mixtures of customized chemical composition.

Keywords. Continuously cast billet, mold, sleeve, taper, geometry, shrinkage, air gap, slag-forming mixture.

For citation. Pisarenko I. O. Study of shrinkage processes in the mold during casting of continuously cast round billet with diameter of 200 mm. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 3, pp. 50–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-50-55>.

Одной из основных задач системы скоростной разливки стали является организация оптимальной и равномерной передачи теплоты от корки непрерывнолитой заготовки к гильзе кристаллизатора. Качество слитка, полученного при непрерывной разливке стали, во многом определяется характером образования тонкой твердой корочки (оболочки) в пределах кристаллизатора. Значительная часть дефектов непрерывного слитка появляется в кристаллизаторах из-за нерациональных условий теплоотвода. Теплопередача в кристаллизаторе, равномерность роста корочки слитка, линейная скорость разливки и распределение в ней напряжений зависят от характера контакта между гильзой кристаллизатора и слитком. Затвердевание металла в кристаллизаторе происходит на основе представлений о частичном контакте слитка со стенками, образуя по периметру усадки некоторые зазоры. Характер контакта и величина образуемых зазоров определяются в первую очередь геометрическим исполнением внутренней конструкции самой гильзы, химическим составом разливаемой марки стали, а также рядом других факторов, таких как скорость разливки, свойства используемых шлакообразующих смесей и др. Правильный выбор данных параметров обеспечивает оптимальные условия для формирования первичной корочки слитка и исключает образование поверхностных дефектов.

Таким образом, для предотвращения поверхностных дефектов и обеспечения постоянства формирования толщины корочки слитка необходимо обеспечить образование низких температурных градиентов при формировании корочки слитка.

Объектом исследования в данной работе является процесс формирования корочки непрерывнолитого слитка диаметром 200 мм для дальнейшего производства горячекатаных бесшовных труб.

Цель работы – определение оптимальных условий формирования корочки в слитке и предотвращения образования поверхностных дефектов путем исследования усадки слитка при работе на гильзах с разным геометрическим исполнением внутренней поверхности и шлакообразующих смесей с различным химическим составом и свойствами.

По статистическим данным, большинство дефектов металлургического происхождения при производстве горячекатаных бесшовных труб в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (далее – предприятие) являются трещинами кристаллизационного характера (рис. 1). Количество несоответствующей продукции по данному виду дефекта за 2020–2024 гг. находится на уровне 4,4%, что влечет большие издержки на обратный передел бракованных труб и увеличение себестоимости выпускаемой продукции. Таким образом, определение закономерностей теплообмена между слитком и кристаллизатором и снижение уровня кристаллизационных дефектов при производстве непрерывнолитой заготовки – одна из наиболее актуальных задач сталеплавильного производства.

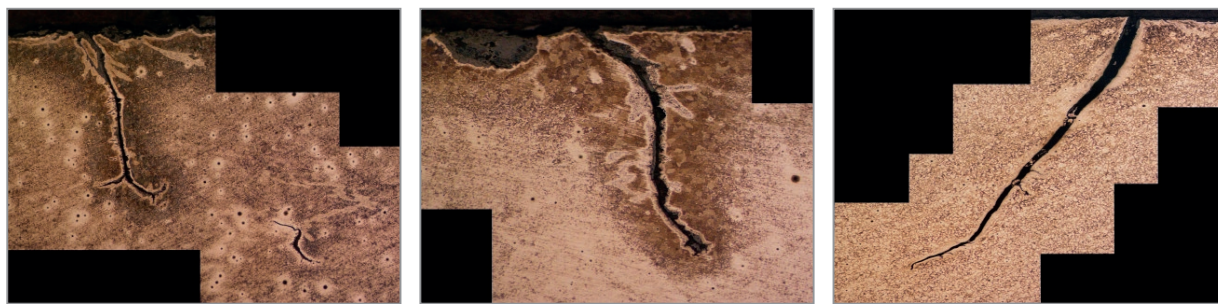


Рис. 1. Микроструктура марки стали 30ХГСА в зоне дефектов горячекатаных бесшовных труб, $\times 100$

Поперечные микрошлифы образцов в зонах дефектов труб представляют собой полости, суживающиеся вглубь, расположенные под углом к поверхности, извилистые, с окисленными стенками. От полостей в стороны отходят дорожки мелких диффузионных оксидов, вдоль полостей наблюдаются мелкие диффузионные оксиды. После травления микрошлифов в реактиве Nital наблюдается обезуглероживание. Травление реактивом Обергоффера показало наличие ликвации в зоне дефектов. Трещины кристаллизационного происхождения.

Причинами выявленных дефектов являются температурные напряжения, возникающие в определенных условиях при кристаллизации стали. Эти условия создаются при нарушениях технологических факторов и качественных параметров стали, вызывающих понижение механической прочности первичной корочки и увеличение разрывающих усилий в момент образования трещин [1].

Опыт промышленного производства показывает, что наиболее часто поверхностные дефекты кристаллизационного характера возникают при содержании углерода в стали на уровне 0,20% и достигают своего максимума при C более 0,35%. Это объясняется тем, что при таком содержании углерода усадка стали достигает максимальных значений, а прочность на растяжение падает при сохранении относительно низкой пластичности. Легирование стали такими элементами, как хром, марганец, кремний, оказывает дополнительное существенное ослабляющее влияние на прочность корки слитка.

Поскольку в гильзе кристаллизатора формируется оболочка слитка необходимой толщины и прочности, такие дефекты слитка, как наружные поперечные и продольные трещины, находятся в прямой зависимости от конструктивных и теплофизических характеристик гильзы кристаллизатора. Выбор конусности кристаллизатора, соответствующий усадке слитка из конкретных сталей, является одной из наиболее важных задач для снижения поверхностных дефектов кристаллизационного характера. Теплопередача в кристаллизаторе, линейная скорость разливки, равномерность роста корочки слитка и распределение напряжений в ней во многом зависят от контакта слитка с рабочими стенками и в свою очередь определяют ее.

На предприятии производится широкий спектр марок сталей сечением $\varnothing$ 200 мм, что требует определенного универсального внутреннего профиля гильзы. В рамках освоения производства сечения формата $\varnothing$ 200 мм в условиях сталеплавильного цеха опробована разливка с использованием четырех типов

исполнения гильз кристаллизаторов. На рис. 2 представлены графики, построенные по точкам результатов лазерной съемки гильз с радиального вида.

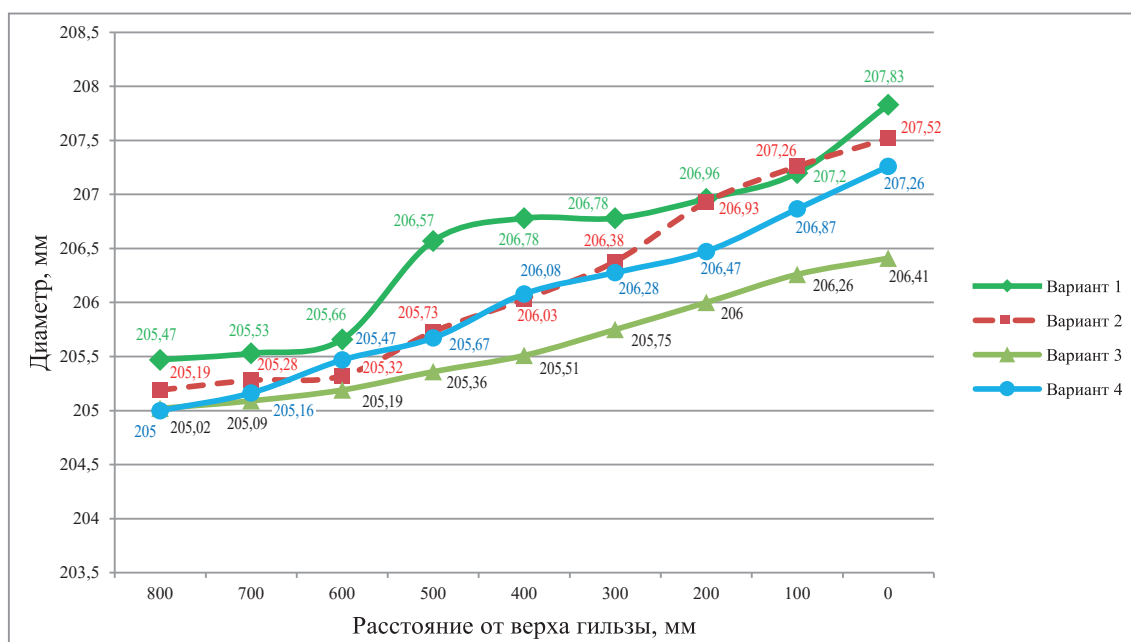


Рис. 2. Внутренняя геометрия использованных гильз кристаллизаторов для разлива формата сечения Ø 200 мм

Каждая из используемых гильз имеет индивидуальное исполнение и, соответственно, обладает индивидуальными закономерностями усадочных процессов.

Вариант 1. Гильзы с параболическим исполнением внутренней геометрии. При таком исполнении заложен принцип компенсации усадки выпуклой синусоидальной затвердевающей корочки ее постепенным выпрямлением. Амплитуды синусоид монотонно убывают на верхнем торце гильзы на границе выпуклой и плоской частей.

Вариант 2. Гильзы с двухконусным исполнением внутренней геометрии. При использовании гильз конусности в верхней части кристаллизатора наблюдается большая степень усадки, чем в его нижней части, срединная часть гильзы является центром дополнительных напряжений и повышенных сил трения.

Вариант 3. Гильзы с переменным сечением рабочей полости, где в параболической полости внедрены четыре синусоидальные воронки. В данной конструкции гильзы средняя конусность составляет 2,5 %, длина участка распрямления синусоидальной поверхности – 300 мм от уровня мениска. Центрирование слитка в верхней половине гильзы кристаллизатора приводит к снижению термических напряжений в затвердевающей оболочке слитка. Выпрямление синусоидальных участков позволяет довести до минимума газовый зазор между оболочкой и стенкой гильзы. Это создает условия для равномерного теплоотвода и образования жесткой равномерной оболочки затвердевающей круглой заготовки.

Вариант 4. Гильзы с трехконусным исполнением внутренней геометрии. Средняя конусность составляет 2,7 %, длина синусоидальной поверхности – 300 мм от уровня мениска в кристаллизаторе.

Возникновение и рост твердой корочки на стенке кристаллизатора, наличие газовой и шлаковой прослойки (60–70 % от всей суммы термического сопротивления) создает дополнительное термическое сопротивление для теплоотвода (потери составляют 25–30 %), в связи с чем плотность теплового потока постепенно снижается в направлении от мениска расплава к нижней кромке кристаллизатора, где она опускается до значений 250 Вт/м² [2, 3].

Определяющую величину теплового потока оказывает воздушный зазор между стенкой кристаллизатора и корочкой слитка. Увеличением или уменьшением величины теплового зазора достигается минимизация сил трения и усадочных напряжений. Передача теплоты от корки слитка к стенкам кристаллизатора сильно уменьшается при потере контакта между слитком и кристаллизатором, при этом изменяется характер усадки слитка, что может привести к возникновению дефектов в корке [2].

В процессе разлива величину воздушного зазора между стенкой кристаллизатора и корочкой слитка можно вычислить по формуле

$$\delta = \omega^P + \omega^t + \Delta_y + \Delta_p + \omega^{t_k}, \quad (1)$$

где ω^p – изгиб корочки слитка под действием ферростатического давления, м; ω^t – то же под действием термических напряжений, м; Δ_y – усадка корочки слитка, м; Δ_p – растяжение корочки слитка под действием ферростатического давления, м; ω^k – коробление стенок кристаллизатора, м.

Каждое из слагаемых должно быть со своим знаком в выбранной системе координат, для решения уравнения используется понятие кажущегося теплового зазора, т.е. сплошного воздушного зазора, аналогичного тому, что имеет место в действительности (рис. 3) [2].

Толщина кажущегося зазора определяется формулой

$$\Delta_{з.к} = \lambda_v (T_{\Pi} + T_c) / (g_1 - g_2), \quad (2)$$

где λ_v – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·К; T_{Π} – температура поверхности слитка, К; T_c – то же стенки кристаллизатора, обращенной к металлу, К; g_1 – плотность теплового потока, направленного от слитка к стенке кристаллизатора, Вт/м²; g_2 – плотность теплового потока излучения, Вт/м².

При физико-математическом рассмотрении принимаем следующие допущения. Отсутствует тепловой барьер тепловому потоку на поверхности между корочкой и кристаллизатором. Охлаждение водой кристаллизатора достаточное, чтобы поддерживать температуру его внутренних стенок равномерной. Зависимость между толщиной корочки слитка и временем пребывания слитка в кристаллизаторе можно вычислить по формуле

$$\delta_k = 0,335 \left(\sqrt{1 - 0,95\tau} - 1 \right). \quad (3)$$

При постоянстве разности между температурой ликвидуса и поверхности корочки

$$\delta_k = 0,28\sqrt{\tau}. \quad (4)$$

Время полного затвердевания

$$\tau = \left(\frac{D + 52 \cdot 10^{-3}}{74,5 \cdot 10^{-3}} \right), \quad (5)$$

где D – диаметр круга, 200 мм.

По мере нарастания корочки затвердевшего металла тепловой поток к стенке кристаллизатора уменьшается. Неравномерное распределение тепловых потоков при продвижении слитка приводит к неравномерному прогреву стенки кристаллизатора. Различная температура твердых слоев корочки затвердевшего металла вызывает их различную усадку и деформацию, что ведет к возникновению сложнапряженного состояния затвердевшей оболочки слитка.

При вариантах работы на гильзах с двухконусной и трехконусной конфигурациями отмечены следы торможения и ускорения при формировании роста корочки слитка в период 40–60 с после начала формирования (рис. 3), что связано с избыточной конусностью в соответствии с рис. 2. Передача теплоты от корки слитка к стенкам кристаллизатора сильно уменьшается при потере контакта между слитком и кристаллизатором, при этом изменяется характер усадки слитка, что может привести к возникновению

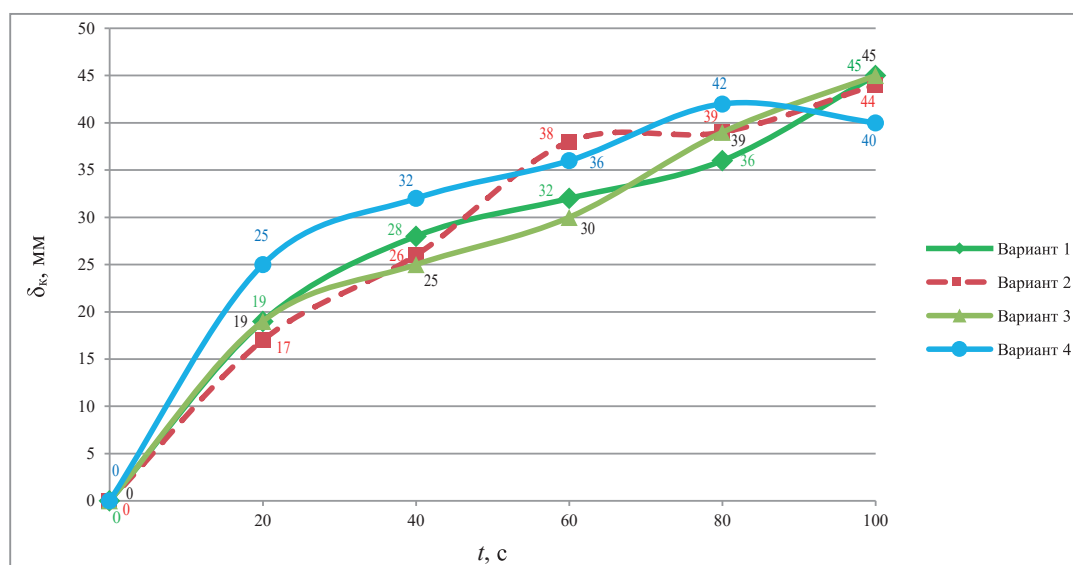


Рис. 3. Расчетные значения роста корочки слитка в кристаллизаторе при различной толщине кажущегося зазора в зависимости от типа применяемых гильз

дефектов. В результате в стенках возникают напряжения, которые постепенно накапливаются и превышают пределы упругости в условиях длительной ползучести. Гильзы с параболическим исполнением и переменным сечением рабочей плоскости создают минимальное сопротивление теплоты путем постоянства кажущегося зазора на протяжении всей длины рабочей поверхности.

Проведенные ранее исследования [4] показали, что применяемая смазка шлакообразующей смесью может уменьшать тепловой поток в кристаллизаторе на 5–18 % для сталей с содержанием углерода более 0,1 %. Наличие некоторой прослойки шлакообразующей смеси может вызывать увеличение коэффициента трения при вытягивании заготовки из кристаллизатора. При снижении вязкости шлака сила трения, тормозящая вытягивание заготовки из кристаллизатора, уменьшается, а сам шлак служит смазкой, однако образование такого типа смазки имеет высокую проницаемость и практически не компенсирует теплопередачу в месте контакта с жидкой сталью.

В условиях сталеплавильного производства предприятия при разливке формата Ø 200 мм использовались различные варианты шлакообразующих смесей с химическим составом в соответствии с таблицей.

Т а б л и ц а . Химический состав шлакообразующих смесей

Химический состав, %	C	SiO ₂	F	CaO	Mg	Al ₂ O ₃	Основность
Вариант 1	17,0	20,0	2,1	20,3	5,1	10,0	1,0
Вариант 2	5,5	34,4	3,5	23,2	2,4	11,1	0,7
Вариант 3	20,0	33,0	4,1	21,1	2,2	4,1	0,7
Вариант 4	18,2	22,8	3,0	24,6	4,1	8,7	0,9

В соответствии с рис. 4 произведен теоретический расчет термосопротивления шлаковой прослойки в зависимости от типа применяемой шлакообразующей смеси.

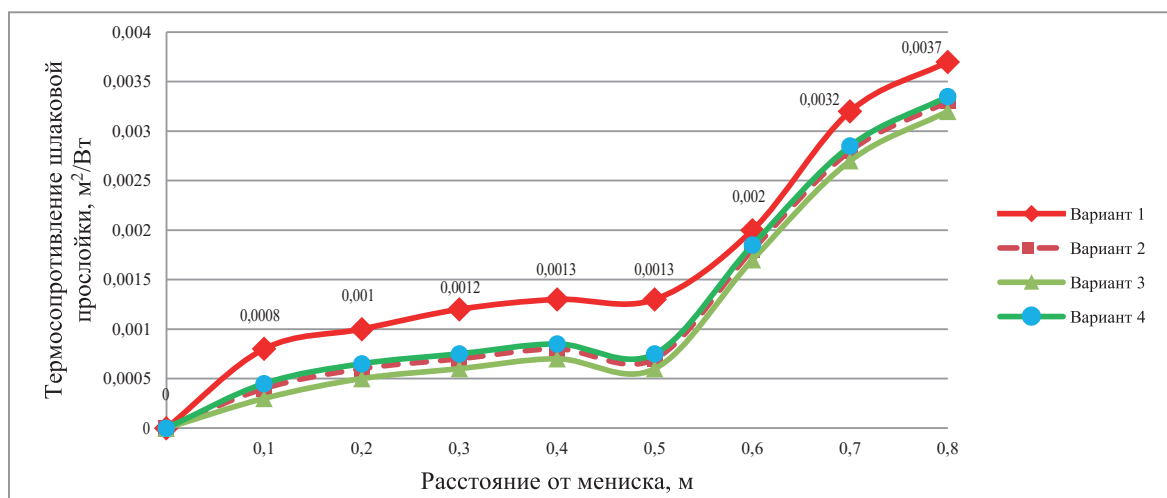


Рис. 4. Термосопротивление в зависимости от химического состава шлакообразующей смеси

Чтобы компенсировать увеличение теплопередачи и снизить градиенты температур между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора, при работе на вариантах гильз 2, 4 для качественных легированных сталей необходимо поддержание соотношения $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) \geq 1$. Наличие прослойки шлака уменьшает температуру внутренней поверхности кристаллизатора за счет большего термосопротивления, так как при затвердевании такого шлака внутри него образуется множество микропор, которые являются причиной снижения теплопроводности [3, 5].

Выводы

Проведенные исследования влияния исполнения внутренней геометрии гильз и использования высокоосновных шлакообразующих смесей позволили снизить количество поверхностных дефектов горячекатаных бесшовных труб на легированных марках сталей более чем на 40 %, а при разливке качественного углеродистого сортамента — не менее чем на 10 %. Работа по совершенствованию технологического процесса в настоящее время продолжается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дефекты стальных слитков и проката: справ. изд. / В.В. Правосудович [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 41 с.
2. **Козырев, Н.А.** Непрерывная разливка стали и сплавов: учеб. пособие / Н.А. Козырев, Р.А. Гизатулин, Д.В. Валуев. – Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2011. – С. 313–315.
3. **Огурцов, А.П.** Непрерывная разливка стали: учеб. пособие / А.П. Огурцов. – Киев: Наукова думка, 2001. – 47 с.
4. Непрерывная разливка сортовой заготовки / А.Н. Смирнов [и др.]. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 139 с.
5. **Смирнов, А.Н.** Непрерывная разливка стали: учебник / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 161 с.

REFERENCES

1. **Pravosudovich V.V.** [et al.] *Defekty stal'nyh slitkov i prokata: sprav. izd.* [Defects of steel ingots and rolled products: reference publication]. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2006, 41 p.
2. **Kozyrev N.A., Gizatulin R.A., Valuev D.V.** *Nepreryvnaya razlivka stali i splavov: ucheb. posobie* [Continuous casting of steel and alloys: a tutorial]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2011, pp. 313–315.
3. **Ogurtsov A.P.** *Nepreryvnaya razlivka stali: ucheb. posobie* [Continuous casting of steel: a tutorial]. Kyiv, Naukova dumka, 2001, 47 p.
4. **Smirnov A.N.** [et al.] *Nepreryvnaya razlivka sortovoj zagotovki* [Continuous casting of billets]. Doneck, Cifrovaya tipografiya Publ., 2012, 139 p.
5. **Smirnov A.N., Kubersky S.V., Shtepan E.V.** *Nepreryvnaya razlivka stali: uchebnik* [Continuous casting of steel: textbook]. Doneck, DonNTU, 2011, 161 p.