

УДК 621.746.01

DOI:10.35211/1990-5297-2023-7-278-72-79

*С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев, Д. С. Афонин, Н. А. Бурлаков***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ И СПОСОБА РАЗЛИВКИ РАСПЛАВА
НА РАЗВИТИЕ ОСЕВОЙ ЗОНЫ В МОДЕЛЬНЫХ СЛИТКАХ*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: tecmat@vstu.ru.

В работе представлены результаты лабораторных исследований влияния способа и скорости разливки расплава на процесс затвердевания и особенности формирования осевой зоны крупного слитка. Исследования проводили методом физического (холодного) моделирования на модели слитка массой 19,6 тонн. В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватистокислый (кристаллический гипосульфит). Разливка расплава в изложницу-кристаллизатор выполнялась сверху. Показано, что изменение скорости разливки расплава оказывает существенное влияние на протяженность осевой зоны. Установлено, что уменьшение скорости разливки расплава приводит к увеличению направленности кристаллизации и улучшению структуры осевой зоны слитка. Установлено, что модельные слитки, которые были отлиты с доливкой прибыльной части расплавом через определенный интервал времени после заливки тела слитка, затвердевают в 1,4 раза быстрее, чем слиток, отлитый по классической технологии.

Ключевые слова: физическое моделирование, разливка сверху, доливка прибыли расплавом, изложница-кристаллизатор, скорость разливки расплава, процесс затвердевания, осевая зона, крупный слиток.

*S. B. Gamanyuk, D. V. Rutsii, N. A. Zyuban, M. V. Kirilichev, D. S. Afonin, N. A. Burlakov***INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE MELT CASTING SPEED
AND METHOD ON THE DEVELOPMENT OF THE AXIAL ZONE IN MODEL INGOTS****Volgograd State Technical University**

The paper presents the results of laboratory studies of the effect of the method and speed of casting the melt on the solidification process and the features of the formation of the axial zone of a large ingot. The research was carried out by the method of physical (cold) modeling on a model of an ingot weighing 19.6 tons. Sodium sulfurous acid (crystalline hyposulfite) was used as a modeling solution. The casting of the melt into the mold-mold was carried out from above. It is shown that the change in the melt casting rate has a significant effect on the length of the axial zone. It is established that a decrease in the melt casting rate leads to an increase in the direction of crystallization and an improvement in the structure of the axial zone of the ingot. It has been found that model ingots that were cast with refilling of the profitable part by melt after a certain time interval after pouring the ingot body, solidify 1.4 times faster than the ingot cast according to classical technology.

Keywords: physical simulation, pouring from above, topping up with melt, crystallization mould, teeming rate, solidification, axial zone, a large forging ingot.

Введение

Затвердевание крупных стальных слитков сопровождается образованием многочисленных внутренних дефектов, особенно в осевой зоне. Сокращение дефектов, сконцентрированных в осевой зоне, является важной задачей, так как ее значительное развитие не всегда устраняется при обработке давлением (свободная ковка, прокатка), что приводит к наследованию дефектов осевой зоны готовым изделием (поковка, прокат и т. д.) и, как следствие, последующей отбраковке при УЗК контроле готовой продукции [1–6].

В настоящее время существует довольно много способов, позволяющих уменьшить степень

развития дефектов, сосредоточенных в осевой зоне. Одним из основных способов получения относительно плотной осевой зоны в крупном слитке является увеличение объема прибыльной части до 25 %, что позволяет уменьшить осевую пористость и рыхлость в получаемых поковках [7–8].

Увеличение объема прибыльной части не является эффективным способом, так как приводит к снижению выхода годного металла. Общеизвестным является преобладающее влияние на развитие осевой зоны геометрических параметров слитка, таких как отношения H/D, конусности, типа слитка (укороченный, нормальный, удлиненный, сдвоенный постоянного и переменного сечения) [10–14].

© Гаманюк С. Б., Руцкий Д. В., Зюбан Н. А., Кириличев М. В., Афонин Д. С., Бурлаков Н. А., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00973, <https://rscf.ru/project/23-29-00973/>.

В связи с тем, что процесс образования осевой зоны неразрывно связан с усадочными явлениями, которые определяются температурными условиями и теплофизическими процессами во время разливки и затвердевания, способ и скорость разливки металла должны оказывать существенное влияние на формирование осевых дефектов слитка.

В работах С. Я. Скобло [14] и А. Н. Смирнова [9] проведен анализ данных по влиянию скорости разливки на качество поверхности слитков. Показано, что пониженная скорость разливки так же, как и пониженная температура приводят к появлению заворотов корки, а разливка с недостаточной скоростью ведет к усиленному образованию и заворотам корочки.

Для гарантированного формирования твердой корочки надлежащей толщины, устранения или минимизирования формирования продольных трещин крупные кузнечные слитки заполняют с меньшей скоростью. Уменьшение скорости разливки приводит к увеличению времени наполнения изложниц, в результате чего охлаждается зеркало металла, поднимающееся в изложнице при разливке, что приводит к образованию на ней твердой окисленной «корочки» и к ее заворотам [15].

Целью данной работы являлось изучение влияния способа и скорости разливки на процесс затвердевания, особенности формирования и развитие осевой зоны в модели слитка массой 19,6 тонн.

Материал и методика проведения исследований

В настоящее время для проведения предварительных исследований процесса затвердевания слитков пользуются методами моделирования. Для описания процессов затвердевания широкое распространение получают методы компьютерного [13, 15] и физического моделирования [16–21]. Физическое моделирование позволяет наглядно определить кинетику процесса продвижения твердой и твердожидкой фаз, при одновременном протекании процессов конвективного перемешивания металлического расплава.

В данной работе использовался метод физического моделирования слитков, для проведения которого была разработана и изготовлена лабораторная установка (изложница-кристаллизатор) [22], с помощью которой визуально изучали процессы, происходящие при затвердевании и структурообразовании модельных слитков. Изложница-кристаллизатор представляет собой плоский алюминиевый кристаллизатор, имеющий форму наружного контура слитка. Внутри кристаллизатора находятся технологические отверстия для подвода хладагента (охлаждающей жидкости – воды), которая подавалась в обе стенки кристаллизатора для обеспечения равномерного теплоотвода. С боковых сторон пространство между стенками кристаллизатора закрывается органическим стеклом. Геометрические параметры реального промышленного и модельного слитков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры промышленного и модельного слитков

Наименование параметра	Промышленный слиток (19,6 т)	Модельные слитки
H/D	2,15	2,3
Конусность тела слитка ($K_{т.сл}$), %	4,1	4,4
Конусность прибыльной надставки ($K_{пр}$), %	14,7	14,7
Объем тела слитка ($V_{т.сл}$), %	77,4	79,7
Объем прибыльной части слитка ($V_{пр}$), %	18	15,7
Объем донной части слитка ($V_{дон}$), %	4,6	4,5

В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватистоокислый (кристаллический гипосульфит) – $Na_2S_2O_3 \times 5H_2O$. Температура начала затвердевания находится в пределах 48–52 °С.

Соответствие процессов, происходящих на модели и в реальных условиях отливки промышленных слитков, оценивалось с помощью

критериев подобия: критерия Фруда (Fr), критерия Рейнольдса (Re), критерия Вебера (We), критерия Био (Bi), критерия гомохронности Фурье (Fo), полученных на основе теории размерностей исходя из анализа физико-химических процессов, происходящих при разливке и кристаллизации слитка. Кроме приведенных выше известных критериев использовали также

критерий затвердевания (фазового перехода) N , который описывает отношение теплоты фазового перехода к теплоте охлаждения [16, 20, 21]. Расчет критериев подобия (Bi , N , Fo , Fr , We) для данного вещества показал, что они находятся в одном порядке, как и для стали.

Разливка расплава в изложницу-кристаллизатор осуществлялась сверху через промежуточный ковш. Технологические параметры от-

ливки модельных слитков, отлитых с различной скоростью разливки расплава сверху, представлены в табл. 2. Для изменения скорости разливки расплава использовали разливочные стаканы различного диаметра. Характеристика условий проведения экспериментов по доливке прибыльной части слитка расплавом через определенный интервал времени после заливки тела слитка представлена в табл. 3.

Таблица 2

Технологические параметры отливки модельных слитков при разливке расплава сверху

Параметр	Условное обозначение	Разливка сверху		
Температура заливки тела слитка, °C	$T_{\text{разл}}$	80		
Температура хладагента, °C	$T_{\text{охл}}$	7		
Время заливки тела слитка, сек	$\tau_{\text{т.сл.}}$	25		
Время заливки прибыли, сек	$\tau_{\text{пр.}}$	25		
Масса расплава, г	$M_{\text{распл}}$	685		
Диаметр разливочного стакана/отверстия, мм	$D_{\text{ст}}$	3	11	18
Массовая скорость разливки, г/сек	$v_{\text{масс.}}^{\text{т.сл.}}$	20	51	72

Таблица 3

Характеристика условий проведения эксперимента

Технология разливки	Классическая технология разливки сверху	Доливка прибыльной части слитка расплавом, через определенный интервал времени после заливки тела слитка	
		10 мин	20 мин
T заливки тела слитка, °C	60	60	60
Время заливки тела слитка τ , сек	30	30	30
Температура заливки прибыли T , °C	60	60	60
Время заливки прибыли τ , сек	30	30	30
Температура охлаждающей жидкости, °C	7	7	7
Масса тела слитка/прибыльной части, г	550/150	550/150	550/150

В процессе моделирования продвигающийся фронт кристаллизации разделяли на две составляющие: горизонтальная кристаллизация – твердая фаза, нарастающая последовательно от стенок к центру изложницы, – и вертикальная кристаллизация – продвижение твердой фазы в вертикальном направлении от низа к центру изложницы.

После заливки расплава в изложницу-кристаллизатор через каждые 5 минут по сечению слитка на трех уровнях по горизонтали, высоте (центр слитка) измеряли толщину твердой и двухфазной области. По окончании процесса кристаллизации расплава гипосульфита проводилось измерение параметров осевой зо-

ны модельного слитка: определялись протяженность и средний диаметр осевой зоны.

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам лабораторных исследований были построены зависимости влияния скорости разливки расплава сверху на динамику нарастания твердой фазы в вертикальном (рис. 1, а) и горизонтальном направлениях (рис. 1, б).

Установлено, что изменение скорости разливки расплава не влияет на рост твердой фазы в вертикальном направлении и приближается к линейному закону (рис. 1, а). Результаты показывают, что изменение скорости разливки расплава влияет на рост твердой фазы в горизон-

тальном направлении, для которого характерно наличие горизонтального участка спустя 50 % от времени затвердевания слитков (рис. 1, б). Опре-

делено, что у слитков, отлитых при меньших скоростях, на протяжении большего времени затвердевания величина твердой фазы выше (рис. 1).

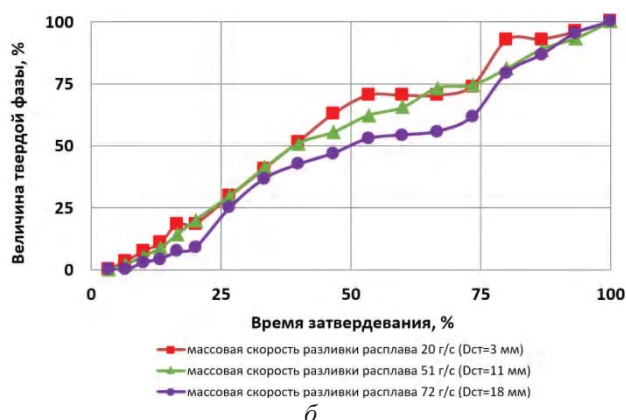
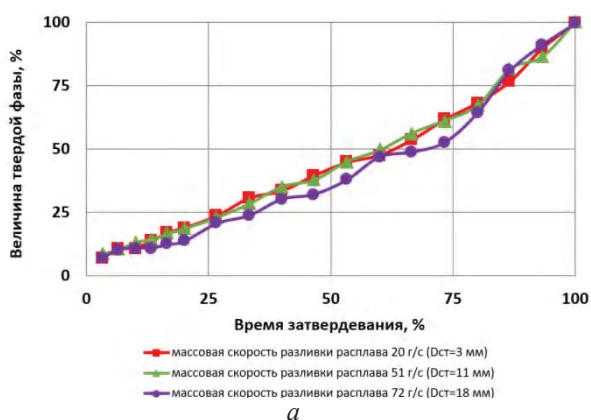


Рис. 1. Динамика нарастания твердой фазы в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях

Установлено, что в начале затвердевания слитков (до 25 %) рост твердой фазы в горизонтальном направлении близок к вертикальному, а затем существенно его опережает (рис. 1). Данный рост, по-видимому, связан с уменьшением температурного градиента, который возникает в результате роста толщины затвердевшего расплава от стенок изложницы-кристаллизатора к центру, что, в свою очередь, приводит к замедлению процесса затвердевания на данном промежутке времени.

Продолжению роста твердой фазы в гори-

зонтальном направлении способствует эффект «концентрационного» переохлаждения, который возникает в результате накопления примесей перед плоскостью раздела в жидком расплаве, что, в свою очередь, и приводит к кристаллизации расплава по объемному механизму, за счет образования в данной области отдельных кристаллов на «подложках» мелких частиц.

В табл. 4 и на рис. 2 и 3 представлены результаты влияния скорости разлива расплава на протяженность и ширину осевой зоны модельных слитков.

Таблица 4

Параметры осевой зоны в модельных слитках

Наименование показателя	Массовая скорость разлива, (г/с)		
	20	51	72
Средняя ширина осевой зоны, (мм)	24	29	29
Протяженность осевой зоны, (мм)	70	86	91
Протяженность осевой зоны, (%)	51,9	63,7	67,4



Рис. 2. Макроструктура модельных слитков:

а – массовая скорость разлива расплава 20 г/с ($D_{ст}=3$ мм); б – массовая скорость разлива расплава 51 г/с ($D_{ст}=11$ мм); в – массовая скорость разлива расплава 72 г/с ($D_{ст}=18$ мм)



Рис. 3. Изменение протяженности и средней ширины осевой зоны модельных слитков

Результаты показали, что с увеличением скорости разливки расплава возрастает протяженность и ширина осевой зоны (рис. 2, 3). Установлено, что модельные слитки, отлитые при малой скорости разливки расплава, обладают минимальными значениями ширины и протяженности осевой зоны. По-видимому, это связано с тем, что при малой скорости разливки расплава увеличивается его степень переохлаждения, что способствует возрастанию скорости кристаллизации.

По результатам обработки данных слитков,

отлитых с различным интервалом доливки при избыточной части расплавом, были построены графики, отражающие скорость нарастания твердой фазы в горизонтальном (рис. 4, а) и вертикальном (рис. 4, б) направлениях. В отличие от слитка, отлитого по классической технологии для всех опытных слитков с доливкой при избыточной части, в начальный период затвердевания характерно возрастание скорости кристаллизации в вертикальном направлении и последующее плавное понижение (см. рис. 4, б).

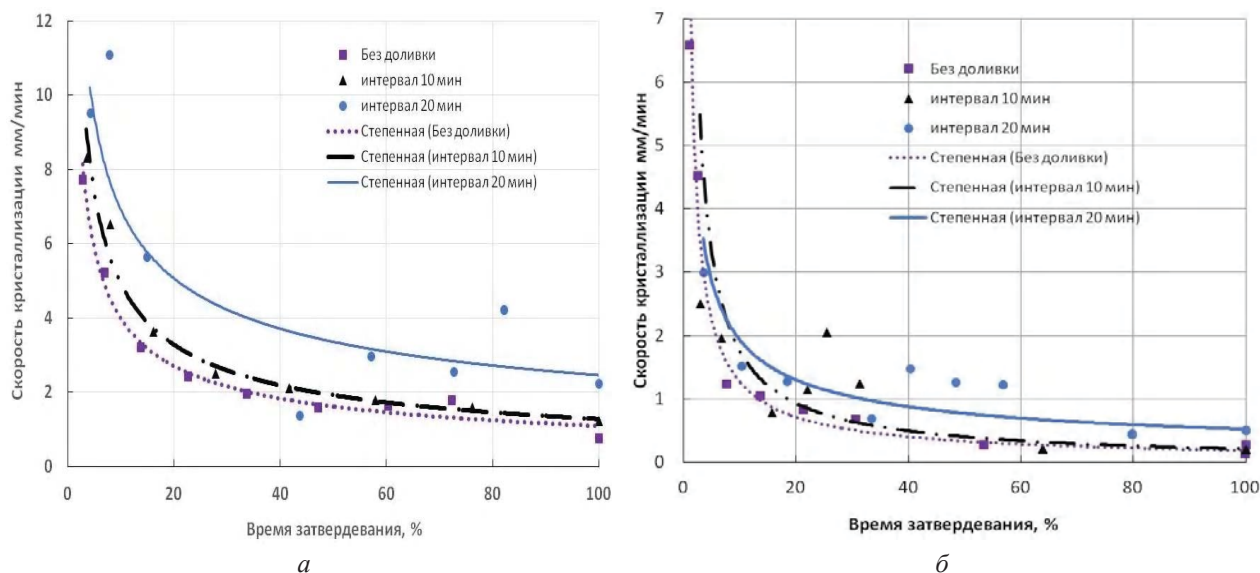


Рис. 4. Скорость кристаллизации модельных слитков в горизонтальном (а) и вертикальном направлениях (б)

Полученные результаты показали (см. рис. 4), что доливка при избытке приводит к увеличению скорости затвердевания, и чем позже происхо-

дит доливка, тем больше увеличивается динамика продвижения твердой фазы. При этом максимальные скорости затвердевания харак-

Таблица 5

Общее время затвердевания
модельных слитков

Модельный слиток	Без доливки	Интервал доливки прибыли	
		10 мин	20 мин
Время затвердевания, мин	234	183	174

терны для горизонтальной составляющей продвигающейся твердой фазы (см. рис. 4, а). После доливки прибыльной части горячим расплавом через 10 мин, после окончания заливки тела слитка, происходит небольшое увеличение динамики продвижения твердой фазы. После 20-минутной выдержки и заливки скорость продвижения твердой фазы увеличивается в 1,5–2,0 раза – при этом максимальное увеличение скорости характерно для горизонтальной составляющей затвердевания (см. рис. 4, а).

Такая динамика затвердевания при заливке модельных слитков может быть связана со значительным перепадом температуры между долитыми горячими порциями расплава и затвердевшей твердой фазой.

В слитке, отлитом по классической технологии, нарастание твердой фазы в вертикальном направлении равномерное, а в слитках с доливкой прибыли расплавом наблюдаются пики, что связано с увеличением толщины затвердевшего слоя по оси слитков за счет смыкания горизонтальных фронтов затвердевания из-за большей скорости в горизонтальном направлении (см. рис. 4, а).

Данные, приведенные в табл. 5, показывают, что доливка прибыли расплавом приводит к увеличению скорости затвердевания модельного слитка и, как следствие, к уменьшению общего времени затвердевания в 1,4 раза.

Оценка развития структурных зон модельных слитков, представленная на рис. 5, показала, что по сравнению со слитком, отлитым по классической технологии, в слитках, отлитых с доливкой прибыли через определенный интервал времени после заливки тела слитка, увеличивается на 20 % объемная доля зоны столбчатых кристаллов и на 28 % – зона конуса осаждения. При этом объемная доля корковой зоны и зоны различно ориентированных кристаллов уменьшилась на 52 и 54 %, соответственно. Определено, что зона столбчатых кристаллов существенно увеличилась в слитках, у которых доливка прибыли расплавом проводилась через 15 и 20 минут после заливки тела слитка.

Результаты показали (рис. 5), что у слитка, отлитого с доливкой прибыли расплавом через 10 минут после заливки тела слитка, возрастает протяженность осевой зоны, а для слитка, отлитого с доливкой прибыли расплавом через 20 минут, она наименьшая.



Рис. 5. Структурные зоны модельных слитков:

а – слиток, отлитый по классической технологии; б – слиток, отлитый с доливкой прибыльной части расплавом, через 10 минут после заливки тела слитка; в – слиток, отлитый с доливкой прибыльной части расплавом, через 20 минут после заливки тела слитка; 1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона конуса осаждения; 4 – зона различно ориентированных кристаллов; 5 – зона осевой протяженности; 6 – усадочная раковина

Анализ структурных зон модельных слитков (рис. 5), отлитых с доливкой прибыльной части расплавом, показал, что с увеличением интервала доливки сокращается зона различно ориентированных кристаллов. Это происходит вследствие увеличения скорости кристаллизации от поверхности стенок изложницы-кристаллизатора к оси, что, в свою очередь, ведет к снижению внутренних дефектов слитков.

Заключение

Результатами лабораторных исследований по физическому (холодному) моделированию установлено:

- увеличение скорости разливки расплава приводит к росту протяженности осевой зоны;
- уменьшение скорости разливки расплава приводит к увеличению направленности кристаллизации и улучшению структуры осевой зоны модельного слитка.
- модельные слитки, отлитые с доливкой прибыльной части расплавом через определенный интервал времени после заливки тела слитка, затвердевают в 1,4 раза быстрее, чем слиток отлитый по классической технологии;
- для слитка, отлитого с доливкой прибыли расплавом через 20 минут после заливки тела слитка, в начальный период затвердевания характерна максимальная скорость затвердевания в горизонтальном направлении;

Регулируя скорость разливки расплава в изложницу можно оказывать воздействие на процесс затвердевания стали и развитие дефектов усадочного происхождения.

Доливка прибыльной части расплавом позволяет увеличить скорость затвердевания слитка, что способствует увеличению направленности процесса затвердевания и увеличению плотности структуры осевой зоны слитка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зюбан, Н. А. Развитие технологии получения крупных стальных слитков и проблемы качества металла / Н. А. Зюбан, С. И. Жульев // *Металлург.* – 2009. – № 6. – С. 48–50.
2. Жульев, С. И. Стальные слитки: проблемы качества и новые технологии : моногр. / С. И. Жульев, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 176 с.
3. Исследование дефектов литой структуры осевой зоны слитков стали 38ХНЗМФА и их поведение во время осадки / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, А. Н. Стяжин, А. А. Сидоров // *Сталь.* – 2011. – № 4. – С. 24–27.
4. Определение геометрии слитков с минимальным развитием дефектов осевой зоны и их применение для получения сортового проката диаметром более 300 мм / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, С. Б. Гаманюк, М. Ю. Чубуков, М. В. Кириличев // *Металлург.* – 2018. – № 11. – С. 33–39.
5. Галкин, А. Н. Исследование физической неоднородности и распределения неметаллических включений в слитке стали 38ХНЗМФА, отлитом с прибылью-холодильником / А. Н. Галкин, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий // *Металлург.* – 2014. – № 10. – С. 28–31.
6. Анализ внутренних дефектов слитка массой 103 т стали 38ХНЗМФА и оценка их влияния на качество поковок роторов турбогенераторов / Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, Н. А. Зюбан, М. Ю. Чубуков // *Технология металлов.* – 2010. – № 10. – С. 15–18.
7. Жульев, С. И. Производство и проблемы качества кузнечного слитка : моногр. / С. И. Жульев, Н. А. Зюбан ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2003. – 168 с.
8. Дурынин, В. А. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – Спб. : ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с.
9. Крупный слиток : моногр. / А. Н. Смирнов, С. Л. Макаров, В. М. Сафонов, А. Ю. Цупрун ; Донец. нац. техн. ун-т. – Донецк : Вебер, 2009. – 279 с.
10. Жульев, С. И. Разработка кузнечных слитков переменного сечения для получения полых ступенчатых поковок с повышенной однородностью механических свойств / С. И. Жульев, Д. В. Руцкий, К. Ю. Бод // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2009. – № 1. – С. 26–30.
11. Руцкий, Д. В. Development of defect zones and cast metal structure in elongated two-piece Cr–Ni–Mo steel ingots / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан // *CIS Iron and Steel Review (Москва).* – 2015. – № 10. – С. 14–18.
12. Руцкий, Д. В. Особенности строения и затвердевания удлинённых сдвоенных слитков для полых поковок. Часть I / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. Ю. Чубуков // *Металлург.* – 2016. – № 2. – С. 35–41.
13. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем / А. Н. Ромашкин [и др.] // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2015. – Т. 7. – № 1. – С. 107–112.
14. Скобло, С. Я. Слитки для крупных поковок / С. Я. Скобло, Е. А. Казачков. – М. : Металлургия, 1973. – 247 с.
15. Особенности технологии сифонной отливки слитков / А. Н. Ромашкин, А. Н. Мальгинов, В. С. Дуб, Э. Ю. Колпишон // *Электromеталлургия.* – № 1. – 2013. – С. 18–23.
16. Эльдарханов, А. С. Процессы формирования отливок и их моделирование / А. С. Эльдарханов, В. А. Ефимов, А. С. Нурадинов. – М. : Машиностроение, 2001. – 208 с.
17. Анализ кинетики затвердевания стальных кузнечных слитков различной конфигурации. Часть I. Результаты холодного моделирования / В. С. Дуб [и др.] // *Металлург.* – 2015. – № 11. – С. 41–56.
18. Massive Formation of Equiaxed Crystals by Avalanches of Mushy Zone Segments / A. Ludwig, M. Stefan-Kharicha, A. Kharicha and M. Wu // *Metallurgical and materials transaction A.* 2017. Volume 48A. Pp. 2927–2930.
19. Review of Ammonium Chloride-Water Solution Properties / M. Stefan-Kharicha, A. Kharicha, J. Mogeritsch, M. Wu and A. Ludwig // *Journal of chemical and engineering.* 2018. Volume 63. Pp. 3170–3183.
20. Исследование кинетики затвердевания слитков на основе физического моделирования разливки и кристаллизации расплава / С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зю-

бан, А. Я. Пузиков, Е. Р. Кофтунов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – Т. 75, № 7. – С. 818–827.

21. Использование физического моделирования для оценки влияния способа и скорости разливки на формирование осевой зоны крупного слитка (Application of physical simulation to evaluate the impact of teeming method and rate on axial zone formation of large ingots) / С. Б. Гаманюк, Д. В. Рущкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев, М. С.

Никитин, Д. Н. Гурулев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия / Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Chernaya Metallurgiya / Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. – Т. 65, № 11. – С. 814–823. – DOI: 10.17073/0368-0797-2022-11-814-823.

22. П. м. 169365 U1 РФ, МПК В22D7/08. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в изложнице / С. Б. Гаманюк, Н. А. Зюбан, Д. В. Рущкий, С. В. Палаткин ; ВолгГТУ. – 2017.