

*Оригинальная статья*

УДК 621.746.01

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-814-823

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2436>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА И СКОРОСТИ РАЗЛИВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСЕВОЙ ЗОНЫ КРУПНОГО СЛИТКА

С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан,  
М. В. Кириличев, М. С. Никитин, Д. Н. Гурулев

Волгоградский государственный технический университет (Россия, 400005, Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28)

**Аннотация.** Работа посвящена изучению влияния способа и скорости разливки расплава на процесс затвердевания и особенности формирования осевой зоны крупного слитка. Исследования проводились с использованием метода физического моделирования, для проведения которого разработана и изготовлена лабораторная установка (изложница-кристаллизатор), позволяющая визуально изучать процессы, происходящие при затвердевании и структурообразовании модельных слитков. В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватистокислый (кристаллический гипосульфит) –  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Соответствие процессов, происходящих на модели и в реальных условиях отливки промышленных слитков, оценивалось с помощью критериев подобия. Они были получены на основе теории размерностей, исходя из анализа физико-химических процессов, происходящих при разливке и кристаллизации слитка. Разливку расплава в изложницу-кристаллизатор выполняли двумя способами: сверху и сифоном. При моделировании слитков геометрические и технологические параметры отливки оставались неизменными, изменялась только скорость разливки расплава. Определялась протяженность и средняя ширина осевой зоны модельного слитка. С целью оценки изменения поля температур при разливке и кристаллизации слитка в течение всего времени затвердевания проводили термометрирование поверхности модели изложницы. Обработка тепловизионных изображений позволила получить изменение температуры поверхности модели изложницы по высоте слитков, отлитых с различными скоростями разливки расплава сверху. Анализ результатов исследований показал, 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.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, разливка сифоном, разливка сверху, изложница-кристаллизатор, скорость разливки расплава, процесс затвердевания, осевая зона, крупный кузнечный слиток

**Для цитирования:** Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Кириличев М.В., Никитин М.С., Гурулев Д.Н. Использование физического моделирования для оценки влияния способа и скорости разливки на формирование осевой зоны крупного слитка // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 814–823. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-814-823>

Original article

## APPLICATION OF PHYSICAL SIMULATION TO EVALUATE THE IMPACT OF TEEMING METHOD AND RATE ON AXIAL ZONE FORMATION OF LARGE INGOTS

S. B. Gamanyuk, D. V. Rutsikii, N. A. Zyuban,  
M. V. Kirilichev, M. S. Nikitin, D. N. Gurulev

Volgograd State Technical University (28 Lenina Ave., Volgograd 400005, Russian Federation)

**Abstract.** The article presents the results of evaluation of the impact of teeming method and rate on solidification and formation of the axial zone of large ingots. The research is based on a physical simulation. With this aim a laboratory-scale plant (a crystallization mould) was designed and built which enabled to visualize and monitor solidification and structural formation of the model ingots. Sodium thiosulphate (crystal hyposulphite) –  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  was used as a modeling solution. Matching of the processes in the model and in real industrial conditions of ingot teeming was assessed with similarity criteria obtained on the basis of the dimension theory with consideration of the physical and chemical processes in the ingot during its teeming and crystallization. Two methods – downhill casting and uphill casting – were used to teem the melt into the mould. During teeming the geometry and technological parameters of the model ingots remained unchanged while the teeming rate was altered. Length and medium width of the model ingot axial zone were measured. The thermal profiling of the surface of the mould model was monitored over the entire period

of solidification to evaluate the thermal field alteration while the ingot was teemed and crystallized. Thermal imaging processing made it possible to observe temperature changes of the surface of the model mould from top to bottom for downhill cast ingots teemed at different rates. The results obtained demonstrate that teeming rate has a noticeable impact on the axial zone length. It was established that a decreased rate leads to an increased directionality of crystallization and improvement of the ingot axial zone structure.

**Keywords:** physical simulation, uphill casting, downhill casting, crystallization mould, teeming rate, solidification, axial zone, large forging ingot

**For citation:** Gamanyuk S.B., Rutsii D.V., Zyuban N.A., Kirilichev M.V., Nikitin M.S., Gurulev D.N. Application of physical simulation to evaluate the impact of teeming method and rate on axial zone formation of large ingots. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 814–823. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-814-823>

## ВВЕДЕНИЕ

Затвердевание больших масс металла всегда сопровождается образованием значительного количества внутренних дефектов, особенно в осевой зоне. Особенности образования и развития осевой зоны определяются разными факторами, и этому процессу посвящено много работ. Однако и в настоящее время решение этой проблемы представляет сложную научно-техническую задачу в связи с многообразием физико-химических и тепловых процессов, протекающих при кристаллизации крупного слитка [1 – 3].

Для получения относительно плотной осевой зоны крупные слитки отливают с большим объемом избыточной части, достигающей до 25 %, что способствует снижению осевой пористости и рыхлости в получаемых поковках [4, 5].

Установленное на сегодняшний день является преобладающим влияние на развитие осевой зоны геометрических параметров слитка – отношения  $H/D$ , конусности, и, соответственно, типа слитка (укороченный, нормальный, удлиненный) [6 – 12].

Поскольку процесс образования осевой пористости неразрывно связан с усадочными явлениями, которые, в свою очередь, определяются температурными условиями и теплофизическими процессами при разливке и кристаллизации слитка, то существенное влияние на формирование осевых дефектов слитка должны оказывать способ и скорость разливки металла [13 – 15].

Повышенная скорость разливки приводит к увеличению количества продольных трещин на поверхности слитка и появлению заворотов корочки. Разливка с недостаточной скоростью ведет к усиленному образованию и заворотам корочки, особенно при разливке стали сифоном. Скорость разливки чаще всего характеризуют скоростью подъема стали в изложнице, которая находится в пределах 0,15 – 5,00 м/мин. Ее регулируют изменением диаметра разливочного стакана, а также частичным перекрытием вытекающей из стакана струи с помощью стопора или шибера [2].

При разливке слитков сифонным способом одной из важных особенностей является скорость заполнения изложницы. Большие кузнечные слитки обычно заполняют с меньшей скоростью. Это необходимо для гарантированного формирования твердой корочки надлежащей толщины для устранения или минимизации образования продольных трещин. Уменьшение ско-

рости разливки сопровождается увеличением продолжительности наполнения изложниц, вследствие чего усиливается охлаждение открытой поверхности металла, поднимающегося в изложнице при разливке. Это приводит к образованию на ней твердой окисленной «корочки» и к ее заворотам [16]. Для предотвращения образования такого типа дефектов применяют защиту зеркала металла от вторичного окисления, используют теплоизолирующие и шлакообразующие смеси, поддерживают необходимую температуру разливки.

Для изучения особенностей структурообразования и развития внутренних дефектов в крупных кузнечных слитках пользуются методами компьютерного [8, 17 – 21] и физического моделирования [22 – 26]. Физическое моделирование позволяет наглядно определить кинетику процесса продвижения твердой и твердожидкой фаз при одновременном протекании процессов конвективного перемешивания металлического расплава, развития внутренних дефектов. Большая часть работ, в которых проводится моделирование, посвящена влиянию геометрических параметров слитков [5, 7, 8, 16, 21, 23], а также внешнего воздействия (электромагнитное перемешивание, вибровоздействие и т. д.) на затвердевающий расплав [22, 27, 28]. При этом отсутствуют работы, в которых проводится физическое моделирование влияния скоростных режимов разливки. Необходимо отметить, что физическое моделирование показывает качественную картину влияния технологических факторов разливки на особенности структурообразования и степень развития дефектных зон. Результаты моделирования позволяют исключить проведение трудо- и энергозатратных экспериментов в реальных промышленных условиях.

В связи с этим целью данной работы является изучение влияния способа и скорости разливки расплава на процесс затвердевания и особенности формирования осевой зоны слитка.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе использовался метод физического моделирования слитков. Была разработана и изготовлена лабораторная установка (изложница-кристаллизатор) [29], 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 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.

В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватистоокислый (кристаллический гипосульфит) –  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Температура начала затвердевания – 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) и критерия гомотронности Фурье (Fo). Они получены 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 [7, 26].

Приведенный в работе [7] 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 выполнялась двумя способами: сверху и сифоном. При разливке сверху заливка расплава в изложницу-кристаллизатор производилась через промежуточный ковш. Заливку расплава сифонным способом осуществ-

ляли через разливочные стаканы различного диаметра (табл. 2). Применение при сифонном способе разливочного стакана большего размера ограничивалось фиксированным диаметром подводящего штуцера к изложнице-кристаллизатору.

При моделировании слитков геометрические и технологические параметры отливки оставались неизменными, изменялась только скорость разливки расплава. Для этого использовали разливочные стаканы различного диаметра (см. табл. 1, 2).

Скорость разливки выбиралась, исходя из линейной скорости разливки кузнечного слитка массой 19,0 т, которая, в зависимости от марки стали, согласно технологическим инструкциям составляет 0,233 – 0,395 м/мин. Для обеспечения максимального подобия при моделировании выбран диаметр разливочного отверстия в модели промежуточной разливочной воронки (см. табл. 2), равный 11 и 18 мм. Для получения более полной картины влияния скорости разливки смоделировано затвердевание при минимально возможной скорости для условий моделирования.

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 мин по сечению слитка в верхней подприбыльной части от края к центру и по оси слитка от низа к верхней части слитка измеряли толщину затвердевшего слоя. По окончании процесса кристаллизации расплава гипосульфита проводилось измерение

Таблица 1

**Геометрические параметры промышленного и модельного слитков**

Table 1. Geometrical parameters of industrial and model ingots

Параметр	Слиток	
	промышленный (19,6 т)	модельный
$H/D$	2,15	2,3
Конусность тела слитка ( $K_{\text{т.сл}}$ ), %	4,1	4,4
Конусность прибыльной надставки ( $K_{\text{пр}}$ ), %	14,7	14,7
Объем тела слитка ( $V_{\text{т.сл}}$ ), %	77,4	79,7
Объем прибыльной части слитка ( $V_{\text{пр}}$ ), %	18,0	15,7
Объем донной части слитка ( $V_{\text{дон}}$ ), %	4,6	4,5

Таблица 2

**Технологические параметры отливки модельных слитков при разливке расплава сверху и сифоном**

Table 2. Technological parameters of downhill cast and uphill cast model ingots

Параметр	Разливка				
	сверху			сифоном	
Температура заливки тела слитка ( $T_{\text{зал}}$ ), °С	80				
Температура хладагента ( $T_{\text{охл}}$ ), °С	7				
Время заливки тела слитка ( $\tau_{\text{т.сл}}$ ), с	25				
Время заливки прибыли ( $\tau_{\text{пр}}$ ), с	25				
Масса расплава ( $M_{\text{распл}}$ ), г	685				
Диаметр разливочного стакана/отверстия ( $D_{\text{ст}}$ ), мм	3	11	18	3	6
Массовая скорость разливки тела слитка ( $v_{\text{масс}}^{\text{т.сл}}$ ), г/с	20	51	72	5	7,5

параметров осевой зоны модельного слитка: определялись протяженность и средняя ширина осевой зоны.

Для оценки изменения поля температур при разливке и кристаллизации слитка в работе проводили термометрирование поверхности модели изложницы в течение всего времени затвердевания. После окончания разливки в течение 30 мин производили фотосъемку кристаллизующегося расплава с интервалом в 5 мин, затем интервал съемки увеличивали до 20 мин. Термометрирование проводилось тепловизором Testo 875i. Полученные тепловизионные изображения обрабатывались с помощью программного обеспечения Testo IRSofT. Поскольку тепловизор позволяет произвести лишь термометрирование поверхности без непосредственного измерения температуры расплава, то в работе условно считали динамику изменения температуры расплава равной динамике изменения температуры поверхности модели изложницы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки полученных данных построена зависимость влияния скорости разливки расплава на динамику нарастания твердой фазы в вертикальном (рис. 1, а) и горизонтальном (рис. 1, б) направлениях.

Анализ результатов показал, что изменение скорости разливки расплава не влияет на рост твердой фазы

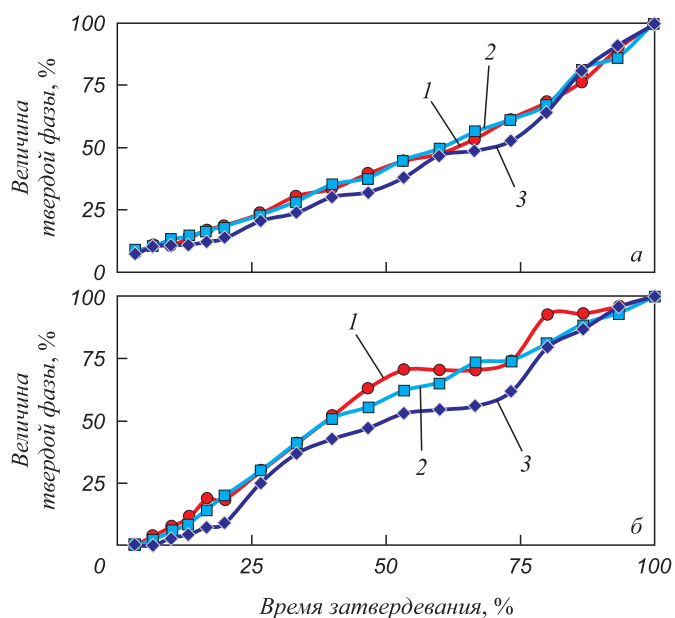


Рис. 1. Динамика нарастания твердой фазы в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях при отливке слитков сверху с различными скоростями разливки расплава:

1 – 20 г/с ( $D_{ст} = 3$  мм); 2 – 51 г/с ( $D_{ст} = 11$  мм);  
3 – 72 г/с ( $D_{ст} = 18$  мм)

Fig. 1. Dynamics of solid phase growth in the vertical (а) and horizontal (б) directions for uphill and downhill casting at different teeming rates:

1 – 20 g/s ( $D_{st} = 3$  mm); 2 – 51 g/s ( $D_{st} = 11$  mm);  
3 – 72 g/s ( $D_{st} = 18$  mm)

в вертикальном направлении и является идентичным, приближаясь к линейному закону (см. рис. 1, а).

Изменение скорости разливки расплава оказывает влияние на нарастание твердой фазы в горизонтальном направлении и описывается более сложной зависимостью с наличием горизонтального участка после половины времени затвердевания расплава (см. рис. 1, б). На протяжении практически всего времени затвердевания в вертикальном и горизонтальном направлениях величина твердой фазы выше у слитков, отлитых при меньших скоростях.

Анализ динамики нарастания твердой фазы в вертикальном и горизонтальном направлениях показал, что в течение первой четверти затвердевания слитков рост твердой фазы в горизонтальном направлении практически совпадает с вертикальным, а затем существенно ее опережает. Такой характер в нарастании твердой фазы можно объяснить уменьшением температурного градиента (рис. 2), возникающего вследствие роста слоя затвердевшего расплава от стенок изложницы к центру, что и приводит к снижению интенсивности затвердевания в этот момент времени.

Дальнейшее нарастание твердой фазы в горизонтальном направлении обусловлено тем, что перед плоскостью раздела в жидком расплаве скапливаются примеси и наступает эффект «концентрационного» пе-

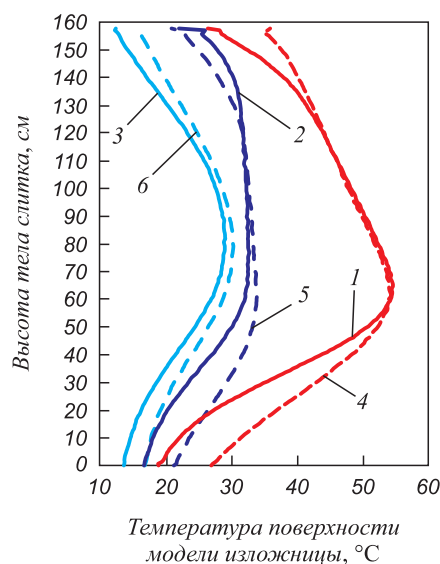


Рис. 2. Изменение температуры поверхности модели изложницы по высоте слитков, отлитых с различными скоростями разливки расплава сверху (на основании обработки тепловизионных изображений с помощью программного обеспечения Testo IRSofT):

1 – 5 мин ( $D_{ст} = 3$  мм); 2 – 60 мин ( $D_{ст} = 3$  мм);  
3 – 140 мин ( $D_{ст} = 3$  мм); 4 – 5 мин ( $D_{ст} = 11$  мм);  
5 – 60 мин ( $D_{ст} = 11$  мм); 6 – 140 мин ( $D_{ст} = 11$  мм)

Fig. 2. Changes in the surface temperature of the mould model from top to bottom of downhill cast ingots teemed at different rates (as per the thermal imaging processed with the Testo IRSofT software):

1 – 5 min ( $D_{st} = 3$  mm); 2 – 60 min ( $D_{st} = 3$  mm);  
3 – 140 min ( $D_{st} = 3$  mm); 4 – 5 min ( $D_{st} = 11$  mm);  
5 – 60 min ( $D_{st} = 11$  mm); 6 – 140 min ( $D_{st} = 11$  mm)

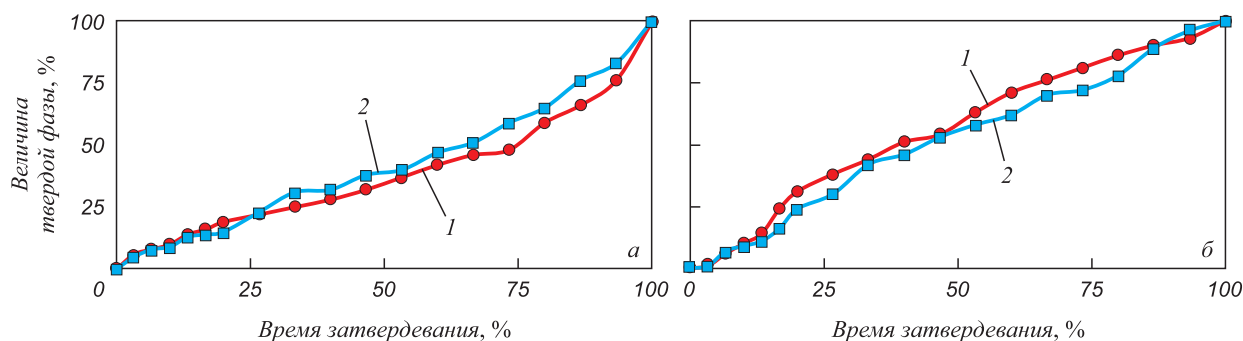


Рис. 3. Динамика нарастания твердой фазы в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях при отливке слитков сифоном с различными скоростями разливки расплава: 1 – 5 г/с ( $D_{ст} = 3$  мм); 2 – 7,5 г/с ( $D_{ст} = 6$  мм)

Fig. 3. Solid phase propagation in the vertical (a) and horizontal (б) directions for uphill cast ingots teemed at different teeming rates: 1 – 5 g/s ( $D_{st} = 3$  мм); 2 – 7.5 g/s ( $D_{st} = 6$  мм)

реохлаждения. Он приводит к интенсивной кристаллизации расплава по объемному механизму за счет образования в этой зоне отдельных глобулярных дендритов на «подложках» мелких частиц и включений.

По сравнению с разливкой сверху при сифонном способе наблюдается более интенсивный рост твердой фазы в вертикальном направлении (рис. 3, а). При этом повышению интенсивности кристаллизации в вертикальном направлении способствует большая скорость разлики расплава 7,5 г/с ( $D_{ст} = 6$  мм), а для кристаллизации в горизонтальном направлении более значимой является малая скорость разлики расплава 5 г/с ( $D_{ст} = 3$  мм).

Полученные результаты можно объяснить следующими особенностями процесса кристаллизации модельного слитка при его отливке сифоном. При большей

скорости разлики расплав заполняет изложницу при относительно высоких температурах, что обеспечивает образование значимого температурного градиента между тепловым центром слитка и его более холодной донной частью. Это и способствует интенсификации процесса кристаллизации в вертикальном направлении. При меньшей скорости разлики прохождение расплава через сифонные каналы вызывает его дополнительное охлаждение. Соприкасаясь с холодными стенками изложницы, расплав охлаждается в еще большей степени, что и вызывает ускорение процесса кристаллизации в горизонтальном направлении.

После затвердевания модельных слитков проводилась оценка влияния скорости разлики расплава на протяженность и ширину осевой зоны (рис. 4 – 6). Анализ полученных результатов показал, что изменение

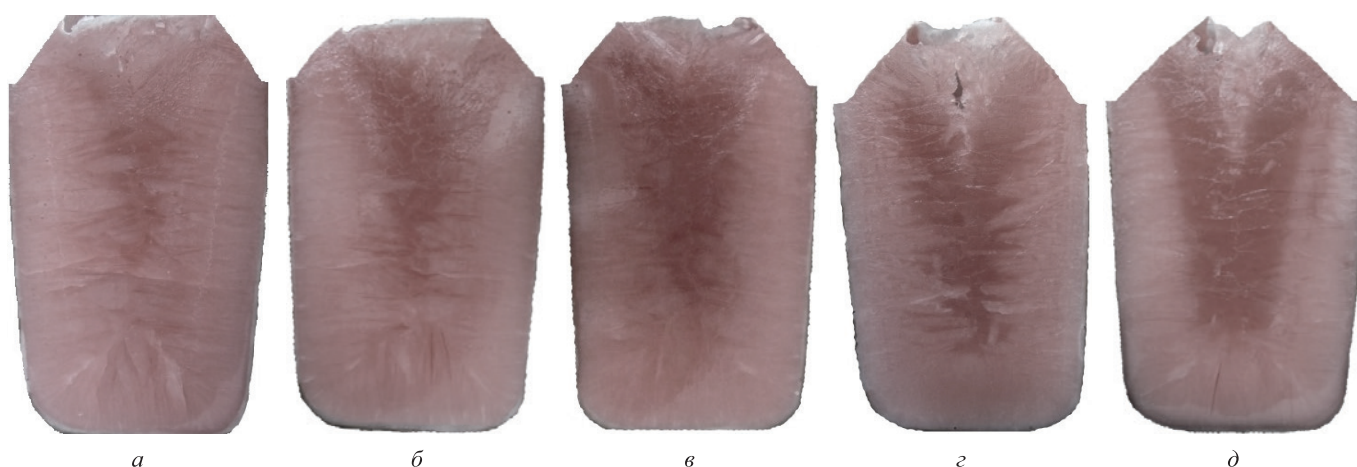


Рис. 4. Макроструктура модельных слитков, отлитых при различных скоростях разлики расплава сверху и сифоном: а – массовая скорость разлики расплава сверху 20 г/с ( $D_{ст} = 3$  мм); б – массовая скорость разлики расплава сверху 51 г/с ( $D_{ст} = 11$  мм); в – массовая скорость разлики расплава сверху 72 г/с ( $D_{ст} = 18$  мм); г – массовая скорость разлики расплава сифоном 5 г/с ( $D_{ст} = 3$  мм); д – массовая скорость разлики расплава сифоном 7,5 г/с ( $D_{ст} = 6$  мм)

Fig. 4. Macrostructure of downhill and uphill cast model ingots teemed at different rates: а – mass downhill teeming rate 20 g/s ( $D_{st} = 3$  мм); б – mass uphill teeming rate 51 g/s ( $D_{st} = 11$  мм); в – mass downhill teeming rate 72 g/s ( $D_{st} = 18$  мм); г – mass uphill teeming rate 5 g/s ( $D_{st} = 3$  мм); д – mass uphill teeming rate 7.5 g/s ( $D_{st} = 6$  мм)

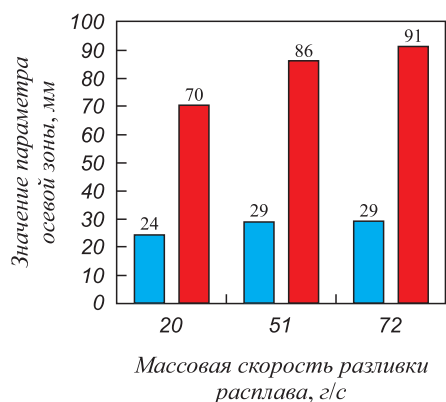


Рис. 5. Изменение протяженности (■) и средней ширины (■) осевой зоны модельных слитков, отлитых при различных скоростях разливки расплава сверху

Fig. 5. Change in length (■) and medium width (■) of the axial zone of model ingots teemed at different downhill teeming rates

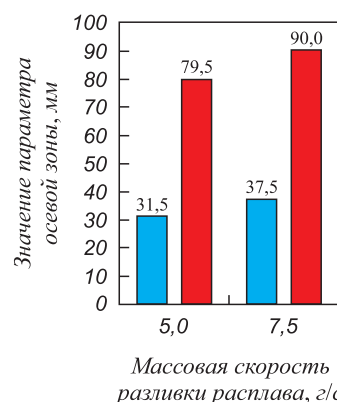


Рис. 6. Изменение протяженности (■) и средней ширины (■) осевой зоны модельных слитков, отлитых при различных скоростях разливки расплава сифоном

Fig. 6. Changes in length (■) and medium width (■) of the axial zone of model ingots teemed at different uphill rates

скорости разливки расплава оказывает влияние на протяженность осевой зоны, с увеличением которой значения параметров возрастают. Наименьшими значениями ширины и протяженности осевой зоны обладают модельные слитки, отлитые при малой скорости разливки расплава. Это можно объяснить тем, что при разливке расплава с малой скоростью увеличивается его степень переохлаждения, которая приводит к возрастанию скорости кристаллизации, а, следовательно, и увеличению скорости нарастания твердой фазы.

На рис. 7, 8 приведены поля распределения температур в модельных слитках. Термометрирование поверхности модели изложницы при затвердевании модельного слитка, отлитого при разливке сверху, показало (рис. 7), что тепловой центр к концу процесса затвердевания перемещается на уровень 2/3 высоты тела слитка, что соответствует существующим представлениям о процессе затвердевания крупных слитков [1, 2]. В процессе затвердевания температура расплава в слитке, отлитом с большей скоростью разливки

сверху (см. рис. 2 – пунктирные линии) выше температуры расплава в слитке, отлитом с меньшей скоростью (см. рис. 2 – сплошные линии).

Термометрирование поверхности модели изложницы при затвердевании модельного слитка, отлитого при разливке сифоном, показало (рис. 8), что после окончания разливки тепловой центр находится в нижней части слитка, что свидетельствует о нахождении в этой области более горячего расплава. Исследование полученных термограмм продемонстрировало влияние изменения скорости наполнения изложницы при разливке сифонным способом на динамику тепловых процессов, происходящих при кристаллизации слитка. При разливке с меньшей скоростью (рис. 8, а) тепловой центр на пятой минуте затвердевания находится еще в нижней части слитка, как в наиболее горячей области после окончания разливки. Однако в этот же период времени, но при разливке с большей скоростью (рис. 8, б), тепловой центр перемещается в верхнюю половину слитка. На десятой минуте после окончания разливки тепловой

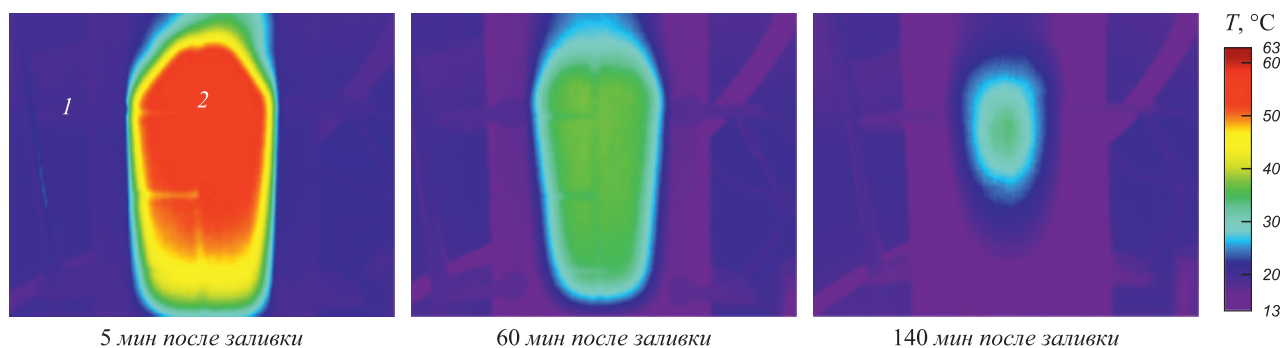


Рис. 7. Динамика перемещения теплового центра при затвердевании модельного слитка, отлитого сверху при массовой скорости разливки 20 г/с ( $D_{ст} = 3$  мм):  
1 – стенки изложницы; 2 – расплав

Fig. 7. Dynamics of thermal center movement during solidification of downhill cast model ingots teemed at mass teeming rate of 20 g/s ( $D_{st} = 3$  mm):  
1 – walls of the mould; 2 – the melt

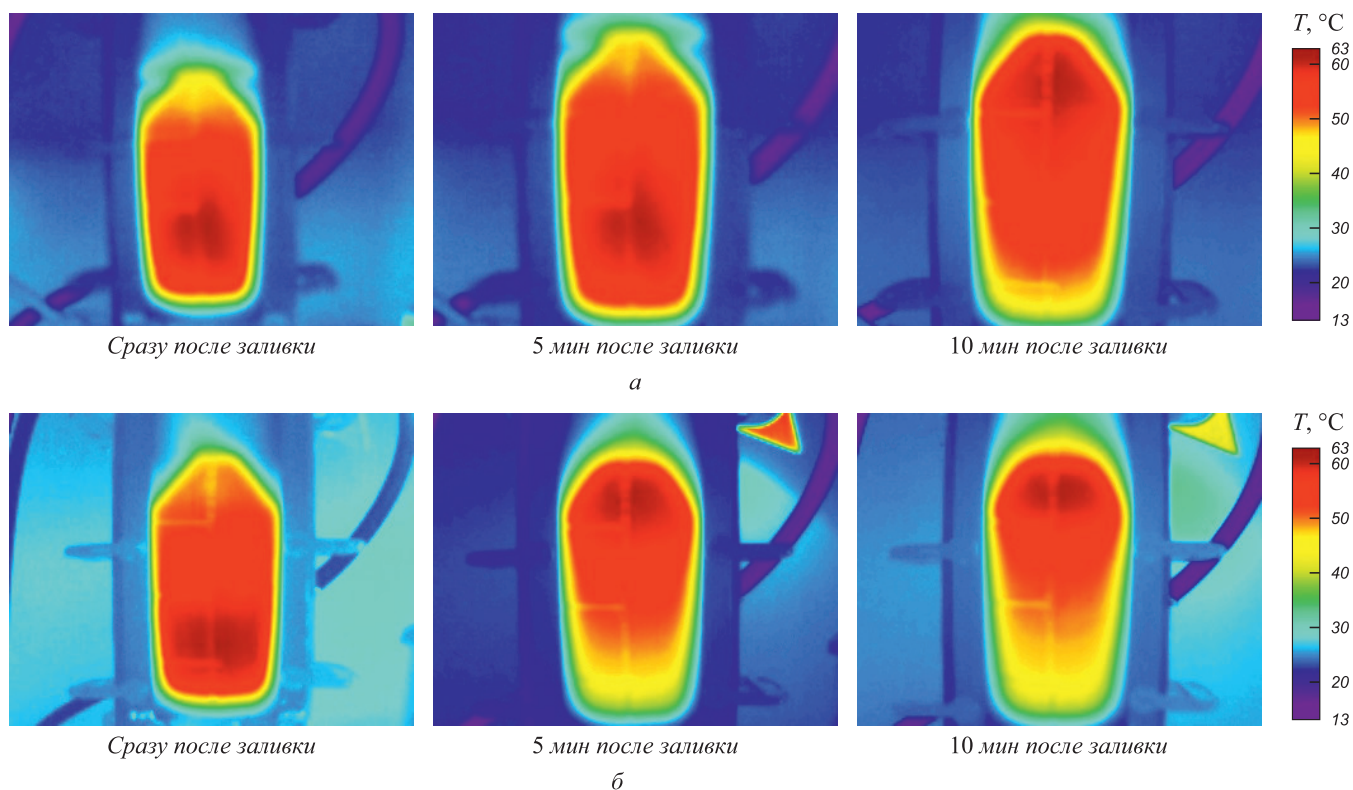


Рис. 8. Динамика перемещения теплового центра при затвердевании модельных слитков, отлитых сифоном при различной скорости разливки:

а – массовая скорость разливки расплава 5 г/с ( $D_{ст} = 3$  мм); б – массовая скорость разливки расплава 7,5 г/с ( $D_{ст} = 6$  мм)

Fig. 8. Dynamics of thermal center movement during solidification of uphill cast model ingots teemed at different rates: а – mass teeming rate 5 g/s ( $D_{st} = 3$  mm); б – mass teeming rate 7.5 g/s ( $D_{st} = 6$  mm)

центр в обоих случаях располагается в верхней части слитка.

## Выводы

На основании проведенных лабораторных исследований установлено, что скорость разливки расплава оказывает влияние на область формирования осевой зоны слитка. Ее возрастание приводит к увеличению протяженности осевой зоны, что обусловлено более высокими температурными режимами, при которых протекает процесс кристаллизации, и активным фор-

мированием осадочных дефектов. При этом ширина осевой зоны меняется незначительно.

Установлено, что уменьшение скорости разливки расплава приводит к увеличению направленности кристаллизации и улучшению литой структуры осевой зоны слитка, затвердевающей в последнюю очередь в самых неблагоприятных условиях.

Таким образом, за счет соответствующего подбора скоростных режимов отливки крупного слитка можно оказывать воздействие на процесс затвердевания стали в изложнице и особенности формирования осевой зоны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Скобло С.Я., Казачков Е.А. Слитки для крупных поковок. Москва: Metallurgiya, 1973. 247 с.
2. Смирнов А.Н., Макуров С.Л., Сафонов В.М., Цупрун А.Ю. Крупный слиток. Донецкий национальный технический университет. Донецк: Вебер, 2009. 279 с.
3. Жульев С.И., Зюбан Н.А. Производство и проблемы качества кузнечного слитка. Волгоград: РПК «Политехник», 2003. 168 с.
4. Qian S., Hu X., Cao Y., Kang X., Li D. Hot top design and its influence on feeder channel segregates in 100-ton steel ingots // *Materials & Design*. 2015. Vol. 87. P. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.150>

1. Skoblo S.Ya., Kazachkov E.A. *Ingots for Large Forgings*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 247 p. (In Russ.).
2. Smirnov A.N., Makurov S.L., Safonov V.M., Tsuprun A.Yu. *Large Ingots*. Donetsk: Veber, 2009, 279 p. (In Russ.).
3. Zhul'ev S.I., Zyuban N.A. *Production of Forging Ingots and Problems with Their Quality*. Volgograd: RPK "Politekhnik", 2003, 168 p. (In Russ.).
4. Qian S., Hu X., Cao Y., Kang X., Li D. Hot top design and its influence on feeder channel segregates in 100-ton steel ingots. *Materials & Design*. 2015, vol. 87, pp. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.150>

5. Зюбан Н.А., Рущкий Д.В., Гаманюк С.Б., Стяжин А.Н., Сидоров А.А. Исследование дефектов литой структуры осевой зоны слитков стали 38ХН3МФА и их поведение во время осадки // Сталь. 2011. № 4. С. 24–27.
6. Tashiro K., Watanabe S., Kitagawa I., Tamura I. Influence of mould design on the solidification and soundness of heavy forging ingots // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1983. Vol. 23. No. 4. P. 312–321.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.312>
7. Гаманюк С.Б. Исследование крупного кузнечного стального слитка измененной геометрии с целью повышения качества металла поковок: Диссертация ... кандидата технических наук. Волгоград, 2012. 162 с.
8. Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н., Толстых Д.С., Иванов И.А., Дуб В.С. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 1. С. 107–112.  
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-107-112>
9. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot // Materials & Design. 2012. Vol. 35. P. 446–456.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>
10. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M. Influence of casting parameters on shrinkage porosity of a 19-ton steel ingot // Metallurgia Italiana. 2016. Vol. 108. No. 1. P. 37–44.
11. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M., Guo B. Influence of casting parameters on the shrinkage porosity of a 40-ton steel ingot by numerical simulation // Proceedings of the 6<sup>th</sup> Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking. 2015. P. 543–546.
12. Yu Z., Zhang H., Wang X., Wu X. Study on heat transfer characteristics during solidification of 18-ton steel ingot with large ratio of height to diameter // Metallurgia Italiana. 2020. Vol. 112. No. 5. P. 37–47.
13. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Morin J.-B. FE modelling and prediction of macrosegregation patterns in large size steel ingots: Influence of filling rate // Metals. 2022. Vol. 12. No. 1. Article 29.  
<https://doi.org/10.3390/met12010029>
14. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Tremblay R., Lapierre L.-P. On the effect of filling rate on positive macrosegregation patterns in large size cast steel ingots // Applied Sciences (Switzerland). 2018. Vol. 8. No. 10. Article 1878. <https://doi.org/10.3390/app8101878>
15. Marx K., Rödi S., Schramhauser S., Seemann M. Optimization of the filling and solidification of large ingots // Metallurgia Italiana. 2014. Vol. 106. No. 11–12. P. 11–19.
16. Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н., Дуб В.С., Колпишон Э.Ю. Особенности технологии сифонной отливки слитков // Электрометаллургия. 2013. № 1. С. 18–23.
17. Duan Z., Shen H., Liu B. Numerical simulation of solidification and macrosegregation in water cooled heavy steel ingot // Proceedings of the 8<sup>th</sup> Pacific Rim Int. Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8). 2016. P. 3025–3032.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9\\_374](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9_374)
18. Chen Z., Zhai Q., Zhang J. Validation and numerical simulation for shrinkage porosity of a X12 steel ingot // TMS 2015 144<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition. 2015. P. 1209–1216.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-48127-2\\_146](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48127-2_146)
19. Lü N., Jin Y., Li S., Ai X., Yuan X. Numerical simulation on gradient cooling behavior of jumbo slab ingot // China Foundry. 2013. Vol. 10. No. 2. P. 87–91.
20. Kotásek O., Kurka V., Vindyš M., Jonšta P., Noga R., Dobiáš M. Comparison of casting and solidification of 12-ton steel ingot using two different numerical software // Proceedings 30<sup>th</sup> Anniversary Int. Conf. on Metallurgy and Materials. 2021. P. 147–152.  
<https://doi.org/10.37904/metal.2021.4091>
5. Zyuban N.A., Rutsikii D.V., Gamanyuk S.B., Styazhin A.N., Sidorov A.A. Cast-structure defects in the axial zone of 38ХН3МФА steel ingots and their behavior in upsetting. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 4, pp. 318–322.  
<https://doi.org/10.3103/S0967091211040255>
6. Tashiro K., Watanabe S., Kitagawa I., Tamura I. Influence of mould design on the solidification and soundness of heavy forging ingots. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1983, vol. 23, no. 4, pp. 312–321.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.312>
7. Gamanyuk S.B. *Investigation of a large forging steel ingot of modified geometry in order to improve the quality of metal forgings: Cand. Tech. Sci. Diss.* Volgograd: 2012, 162 p. (In Russ.).
8. Romashkin A.N., Malginov A.N., Tolstyh D.S., Ivanov I.A., Doub V.S. The ingot geometry effect on the axial shrinkage. *Computer Research and Modeling*. 2015, Vol. 7, no. 1, pp. 107–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-107-112>
9. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot. *Materials & Design*. 2012, vol. 35, pp. 446–456.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>
10. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M. Influence of casting parameters on shrinkage porosity of a 19 ton steel ingot. *Metallurgia Italiana*. 2016, vol. 108, no. 1, pp. 37–44.
11. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M., Guo B. Influence of casting parameters on the shrinkage porosity of a 40 ton steel ingot by numerical simulation. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking*, 2015, pp. 543–546.
12. Yu Z., Zhang H., Wang X., Wu X. Study on heat transfer characteristics during solidification of 18-ton steel ingot with large ratio of height to diameter. *Metallurgia Italiana*. 2020, vol. 112, no. 5, pp. 37–47.
13. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Morin J.-B. FE modelling and prediction of macrosegregation patterns in large size steel ingots: Influence of filling rate. *Metals*. 2022, vol. 12, no. 1, article 29.  
<https://doi.org/10.3390/met12010029>
14. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Tremblay R., Lapierre L.-P. On the effect of filling rate on positive macrosegregation patterns in large size cast steel ingots. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018, vol. 8, no. 10, article 1878. <https://doi.org/10.3390/app8101878>
15. Marx K., Rödi S., Schramhauser S., Seemann M. Optimization of the filling and solidification of large ingots. *Metallurgia Italiana*. 2014, vol. 106, no. 11–12, pp. 11–19.
16. Romashkin A.N., Mal'ginov A.N., Dub V.S., Kolpishon E.Yu. Features of uphill casting of ingots. *Elektrometallurgiya*. 2013, vol. 1, pp. 18–23. (In Russ.).
17. Duan Z., Shen H., Liu B. Numerical simulation of solidification and macrosegregation in water cooled heavy steel ingot. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Pacific Rim Int. Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8)*. 2016, pp. 3025–3032.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9\\_374](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9_374)
18. Chen Z., Zhai Q., Zhang J. Validation and numerical simulation for shrinkage porosity of a X12 steel ingot. *TMS 2015 144<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition*. 2015, pp. 1209–1216.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-48127-2\\_146](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48127-2_146)
19. Lü N., Jin Y., Li S., Ai X., Yuan X. Numerical simulation on gradient cooling behavior of jumbo slab ingot. *China Foundry*. 2013, vol. 10, no. 2, pp. 87–91.
20. Kotásek O., Kurka V., Vindyš M., Jonšta P., Noga R., Dobiáš M. Comparison of casting and solidification of 12 ton steel ingot using two different numerical software. *Proceedings 30<sup>th</sup> Anniversary Int. Conf. on Metallurgy and Materials*. 2021, pp. 147–152.  
<https://doi.org/10.37904/metal.2021.4091>



21. Ромашкин А.Н., Дуб В.С., Иванов И.А., Марков С.И., Мальгинов А.Н., Толстых Д.С. Разработка сквозного технологического процесса производства заготовок для машиностроения на основе компьютерного моделирования // *Металлург*. 2014. № 9. С. 109–117.
22. Kang J., Zhang C., Dong C., Shen H., Liu B. Water analogy experiment on the multi-concentration pouring process of a 585-ton steel ingot // *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*. 2018. P. 107–121.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7_11)
23. Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Толстых Д.С., Мальгинов А.Н., Иванов И.А., Эхвая Г.А. Анализ кинетики затвердевания стальных кузнечных слитков различной конфигурации. Часть I. Результаты холодного моделирования // *Металлург*. 2015. № 11. С. 41–56.
24. Ludwig A., Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Wu M. Massive formation of equiaxed crystals by avalanches of mushy zone segments // *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2017. Vol. 48. P. 2927–2930. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4008-y>
25. Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Mogeritsch J., Wu M., Ludwig A. Review of ammonium chloride-water solution properties // *Journal of Chemical and Engineering*. 2018. Vol. 63. P. 3170–3183.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b01062>
26. Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование. Москва: Машиностроение, 2001. 208 с.
27. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Момот С.В., Амитан В.Н. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях. Донецк: Издательство «ВИК», 2002. 169 с.
28. Лейбензон В.А., Недопекин Ф.В., Кондратенко В.М. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование. Донецк: ООО «Юго-восток, Лтд», 2005. 231 с.
29. Пат. 169365 RU. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в изложнице / С.Б. Гаманюк, Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, С.В. Палаткин; заявлено 24.05.2016; опубликовано 15.03.2017. Бюллетень № 8.
21. Romashkin A.N., Dub V.S., Ivanov I.A., Markov S.I., Mal'ginov A.N., Tolstykh D.S. Development of an integral production process for manufacturing machinery billets based on computer simulation. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 9–10, pp. 821–830. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0002-z>
22. Kang J., Zhang C., Dong C., Shen H., Liu B. Water analogy experiment on the multi-concentration pouring process of a 585 ton steel ingot. *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*. 2018, pp. 107–121.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7_11)
23. Dub V.S., Romashkin A.N., Tolstykh D.S., Mal'ginov A.N., Ivanov I.A., Ekhvaya G.A. Analysis of the kinetics of the solidification of steel forging ingots of different configurations. Part I. Results from cold modeling. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11–12, pp. 1040–1052. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0213-y>
24. Ludwig A., Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Wu M. Massive formation of equiaxed crystals by avalanches of mushy zone segments. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2017, vol. 48, pp. 2927–2930. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4008-y>
25. Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Mogeritsch J., Wu M., Ludwig A. Review of ammonium chloride-water solution properties. *Journal of Chemical and Engineering*. 2018, vol. 63, pp. 3170–3183.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b01062>
26. El'darkhanov A.S., Efimov V.A., Nuratdinov A.S. *Casting Processes and Their Modeling*. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 208 p. (In Russ.).
27. Smirnov A.N., Pilyushenko V.L., Momot S.V., Amitan V.N. *Solidification of Metal Melt under External Influences*. Donetsk: VIK, 2002, 169 p. (In Russ.).
28. Leibenzon V.A., Nedopekin F.V., Kondratenko V.M. *Solidification of Metal Compositions: Production and Modeling*. Donetsk: Yugo-vostok Ltd., 2005, 231 p. (In Russ.).
29. Gamanyuk S.B., Zyuban N.A., Rutsikii D.V., Palatkin S.V. *Device for studying the process of ingots crystallization in a mill*. Patent RF no. 169365. MPK B22D 7/08. *Bulleten' izobretenii*. 2017, no. 8. (In Russ.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сергей Борисович Гаманюк**, к.т.н., доцент кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет  
**E-mail:** [gamanuk@mail.ru](mailto:gamanuk@mail.ru)

**Дмитрий Владимирович Руцкий**, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет  
**E-mail:** [drutskii@vstu.ru](mailto:drutskii@vstu.ru)

**Николай Александрович Зюбан**, д.т.н., профессор кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет  
**E-mail:** [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Михаил Владимирович Кириличев**, студент, Волгоградский государственный технический университет

**Макс Станиславович Никитин**, аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет  
**E-mail:** [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Дмитрий Николаевич Гурулев**, к.т.н., доцент кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет  
**E-mail:** [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Sergei B. Gamanyuk**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University  
**E-mail:** [gamanuk@mail.ru](mailto:gamanuk@mail.ru)

**Dmitrii V. Rutsikii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University  
**E-mail:** [drutskii@vstu.ru](mailto:drutskii@vstu.ru)

**Nikolai A. Zyuban**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University  
**E-mail:** [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Mikhail V. Kirilichev**, Student, Volgograd State Technical University

**Maks S. Nikitin**, Postgraduate of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University  
**E-mail:** [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Dmitrii N. Gurulev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University  
**E-mail:** [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**ВКЛАД АВТОРОВ**

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**С. Б. Гаманюк** – анализ литературных источников, обработка результатов исследований, написание основного текста статьи, подготовка библиографического списка.

**Д. В. Руцкий** – определение цели и задачи исследования, формирование концепции, редактирование финальной версии статьи.

**Н. А. Зюбан** – научное руководство, анализ результатов исследований.

**М. В. Кириличев** – проведение исследований, обработка результатов исследований.

**М. С. Никитин** – проведение исследований, обработка результатов исследований.

**Д. Н. Гурулев** – проведение исследований, обработка результатов исследований.

**S. B. Gamanyuk** – analysis of the literature, processing of the research results, writing the text, preparation of the references.

**D. V. Rutskii** – setting the research goals and objectives, formation of the article concept, editing of the final text.

**N. A. Zyuban** – scientific guidance, analysis of the research results.

**M. V. Kirilichev** – conducting the research, processing of the research results.

**M. S. Nikitin** – conducting the research, processing of the research results.

**D. N. Gurulev** – conducting the research, processing of the research results.

Поступила в редакцию 25.04.2022

После доработки 12.09.2022

Принята к публикации 07.10.2022

Received 25.04.2022

Revised 12.09.2022

Accepted 07.10.2022