

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ «НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
ШКОЛА ДЛЯ МОЛОДЫХ МЕТАЛЛУРГОВ» – 2023

ON THE MATERIALS OF THE INTERNATIONAL
CONFERENCE “SCIENTIFIC AND PRACTICAL
SCHOOL FOR YOUNG METALLURGISTS” – 2023



УДК 621.746.01

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-750-759



Оригинальная статья
Original article

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОЛИВКИ РАСПЛАВА В ПРИБЫЛЬНУЮ ЧАСТЬ СЛИТКА НА ПРОЦЕСС ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ

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

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

 gamanuk@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты лабораторного исследования эффекта доливки прибыльной части слитка расплавом на процесс затвердевания и структурообразование модельного слитка. Доливка производилась через определенный интервал времени после заливки тела слитка. Исследования проводили методом физического (холодного) моделирования, для которого была разработана и изготовлена лабораторная установка (изложница-кристаллизатор), позволяющая визуально изучать процессы, происходящие при затвердевании и структурообразовании на модели слитка массой 19,6 т. В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватистокислый (кристаллический гипосульфит). Соответствие процессов, происходящих на модели и в реальных условиях отливки промышленных слитков, оценивалось с помощью критериев подобия. Они получены на основе теории размерностей исходя из анализа физико-химических процессов, происходящих при разливке и кристаллизации слитка. Разливка расплава в изложницу-кристаллизатор выполнялась сверху. С целью оценки изменения поля температур при разливке и кристаллизации слитка в течение всего времени затвердевания проводили термометрирование поверхности изложницы. Анализ результатов проведенных исследований показал, что доливка расплава до 40 мин приводит к стимулированию раннего оседания кристаллов («дождь кристаллов»), что способствует увеличению направленности кристаллизации в вертикальном направлении. Установлено, что в обычном слитке до 40 мин затвердевание идет по последовательному механизму, а после начинается оседание кристаллов («дождь кристаллов») и затвердевание слитка проходит по объемно-последовательному механизму. Доливка прибыльной части слитка расплавом спустя 40 мин после заливки тела слитка способствовала продолжению последовательного механизма затвердевания слитка. Это привело к образованию монолитной бездефектной структуры в теле слитка и наименьшему развитию усадочной раковины в объеме прибыли. Полученные результаты обуславливают возможность разработки технологии дифференцированной разливки слитков при наполнении их прибылью расплавом через определенный интервал времени после заливки тела слитка. Это позволит воздействовать на процесс формирования структуры металла и сокращение дефектных зон.

Ключевые слова: физическое моделирование, разливка сверху, изложница-кристаллизатор, доливки прибыльной части слитка, процесс затвердевания, осевая зона, крупный кузнечный слиток

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

Для цитирования: Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Кириличев М.В., Никитин М.С. Физическое моделирование влияния доливки расплава в прибыльную часть слитка на процесс затвердевания и структурообразование. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(6):750–759. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-750-759>

PHYSICAL MODELING OF THE EFFECT OF REFILLING THE MELT INTO AN INGOT KNOCK-OFF HEAD ON SOLIDIFICATION AND STRUCTURE FORMATION

S. B. Gamanjuk , D. V. Rutskaa, N. A. Zyuban,
M. V. Kirilichev, M. S. Nikitin

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

✉ gamanuk@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of a laboratory study of the effect of refilling the ingot knock-off head with melt in a certain time interval after pouring the ingot body on solidification and structure formation of the model ingot. The research was carried out by the method of physical (cold) modeling for which a laboratory installation (casting form-mold) was developed and manufactured. It allows visually studying the processes occurring during solidification and structure formation on a 19.6-ton model ingot. We used sodium sulfuric acid (crystalline hyposulfite) as a modeling solution. Correspondence of the processes occurring on the model and in real conditions of industrial ingots casting was evaluated using similarity criteria obtained on the basis of dimension theory with analysis of physico-chemical processes occurring during casting and crystallization of the ingot. Casting of the melt into the casting form-mold was downhill. In order to assess changes in the temperature field during casting and crystallization of the ingot in the entire solidification time, we performed thermometry of the mold model surface. Analysis of the conducted studies results showed that refilling the melt before 40 min leads to stimulation of early settling of crystals (“rain of crystals”), which contributes to an increase in the crystallization directivity in vertical direction. It was established that in a conventional ingot up to 40 min solidification proceeds by a sequential mechanism, and after that the crystals begin to settle (“rain of crystals”) and the solidification of the ingot passes through a volume-sequential mechanism. Refilling the ingot knock-off head with melt 40 min after pouring the ingot body contributed to the continuation of the sequential mechanism of ingot solidification, which led to the formation of a monolithic defect-free structure in the ingot body and the least development of shrinkage shell in the knock-off head. The results obtained make it possible to develop a technology for differentiated ingots casting when filling their knock-off heads with melt in a certain time interval after pouring the ingot body, which will affect the process of metal structure formation and reduce defective zones.

Keywords: physical simulation, downhill casting, casting form – mold, refilling the ingot knock-off head, solidification, axial zone, large forging ingot

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00973, <https://rscf.ru/project/23-29-00973/>.

For citation: Gamanyuk S.B., Rutskiy D.V., Zyuban N.A., Kirilichev M.V., Nikitin M.S. Physical modeling of the effect of refilling the melt into an ingot knock-off head on solidification and structure formation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):751–759. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-751-759>

ВВЕДЕНИЕ

Из теории и практики получения слитков известно, что время затвердевания крупных слитков составляет несколько суток, в течение которых значительное развитие получают ликвационные и усадочные явления. Они приводят к появлению в литом металле химической и физической неоднородности, которые при их значительном развитии не всегда удаляются при ковке. Это может создавать отбраковку заготовок на стадии их изготовления или во время сдаточных испытаний изделий, что вызывает убытки предприятия.

В настоящее время разработано достаточно много способов, позволяющих повысить качество металла. Но все они основаны на применении различных технологических приемов на стадии выплавки и разливки. Положительный эффект, полученный на стадии выплавки, может быть полностью утрачен во время разливки и затвердевания крупных слитков, единичная масса которых составляет не менее 14 т.

В работах [1 – 3] показано, что трудности получения качественной структуры и равномерности механических свойств по высоте и радиусу поковок обусловлены различием условий затвердевания различных частей слитка, а также протеканием процессов усадки, значительной ликвацией примесей, входящих в состав стали, формой и размерами слитка.

Общеизвестным на сегодняшний день является превалирующее влияние на развитие осевой зоны геометрических параметров слитка: отношения высоты к среднему диаметру H/D [4 – 7], конусности [8 – 10], и, соответственно, типа слитка (укороченный, нормальный, удлиненный).

Процесс образования осевой пористости неразрывно связан с усадочными явлениями, которые, в свою

очередь, определяются температурными условиями и теплофизическими процессами при разливке и кристаллизации слитка. Поэтому особое влияние на формирование осевых дефектов слитка должны оказывать способ и скорость разливки металла [11 – 13].

Для повышения качества крупных слитков необходимо искать эффективные способы, оказывающие воздействие на процесс затвердевания. Для этого необходимо знать механизм и условия, при которых происходит образование локальных дефектных областей, способствующих развитию макродефектов, не устраняемых во время деформации. Выявление особенностей затвердевания крупных слитков является сложным процессом, для анализа которого необходимо учитывать множество факторов, которые влияют на протекание кристаллизационных явлений.

Одним из способов исследования процессов затвердевания крупных слитков является физическое (холодное) моделирование, которое проводится на моделях изложниц [14 – 16]. Данный метод позволяет наглядно определить кинетику процесса продвижения твердой и твердожидкой фаз при одновременном протекании процессов конвективного перемешивания моделирующего расплава и развития внутренних дефектов. Необходимо отметить, что физическое моделирование показывает качественную картину влияния технологических факторов разливки на особенности структурообразования и степень развития дефектных зон.

Исходя из условий, которые были определены в работах [2; 3; 17], показано, что доливку прибыли целесообразно проводить, когда отношение величины интервала кристаллизации к величине температурного градиента $\Delta T_{кр} / \delta T \geq 1$. Авторами работы [18] показано, что процесс доливки прибыли горячим расплавом может существенно влиять на условия формирования

структурных зон слитка, увеличивая значение параметра δT до значений, при которых механизм затвердевания возвращается к последовательному, с образованием более плотной дендритной структуры.

Целью исследования является изучение влияния доливки прибыльной части слитка расплавом на процесс затвердевания и структурообразование модельного слитка. При этом доливка производится через определенный интервал времени после заливки тела слитка.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе использовался метод физического (холодного) моделирования слитков, для проведения которого разработана и изготовлена лабораторная установка (изложница-кристаллизатор) [16], с помощью которой визуально изучены процессы, происходящие при затвердевании и структурообразовании модельных слитков. 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 находится в пределах 48 – 52 °С. Соответствие процессов, происходящих на модели и в реальных условиях отливки промышленных слитков, оценивалось с помощью критериев подобия: Фруда (Fr), Рейнольдса (Re), Вебера (We), Био (Bi) и 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

Таблица 2

Значения критериев подобия в образце и модели

Table 2. Values of similarity criteria in the sample and model

Тип слитка	Критерий подобия				
	Bi	N	Fo	Fr	We
Модель слитка	$1,02 \cdot 10^{-8}$	0,52	$1,083 \cdot 10^{-4}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$	$7,56 \cdot 10^{-4}$
Реальный слиток	$1,73 \cdot 10^{-7}$	4,01	$6,340 \cdot 10^{-4}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-3}$

перехода) N , который описывает отношение теплоты фазового перехода к теплоте охлаждения [4; 19].

Приведенный в работе [4] расчет критериев подобия (Bi, N, Fo, Fr, We) показал (табл. 2), что их значения для модели и реальных условий отличаются не более, чем на один порядок, что свидетельствует о соответствии исследуемых процессов [19].

Для изучения гидродинамических особенностей движения жидкости по окончании ее разливки в изложницу-кристаллизатор и поведения конвективных потоков (нисходящие и восходящие) в расплаве на протяжении процесса затвердевания использовался прямой теневой метод (шлирен-метод). Его применение позволило визуализировать, а также количественно оценить характер и скорость изменения конвективных потоков во время затвердевания модельных слитков.

Суть прямого теневого метода состоит в том (рис. 1), что с помощью светового источника и собирающей линзы 1 генерируется параллельный пучок света 2 , которым «просвечивают» исследуемый объект (изложница-кристаллизатор) 4 . При наличии неоднородности совокупность отклоняемых ею лучей формирует изображение, которое проецируется на экран 5 . В данном исследовании для достижения параллельности свето-

Таблица 1

Геометрические параметры промышленного и модельного слитков

Table 1. Geometrical parameters of industrial and model ingots

Параметры слитков	Реальный слиток (19,6 т)	Модель
Отношение высоты к среднему диаметру, 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, $V_{пр}, \%$	18,0	15,7
Объем донной части слитка, $V_{дон}, \%$	4,6	4,5

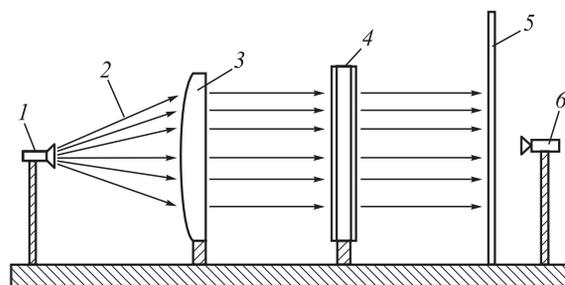


Рис. 1. Схема установки для исследования процесса затвердевания и структурообразования модельного слитка: 1 – источник света; 2 – пучок света; 3 – прямое зеркало; 4 – изложница-кристаллизатор; 5 – экран; 6 – цифровая видеокамера высокого разрешения

Fig. 1. Layout of installation for studying the solidification and structure formation of a model ingot: 1 – light source; 2 – light beam; 3 – direct mirror; 4 – casting form-mold; 5 – screen; 6 – high-resolution digital video camera

вого пучка направляли свет на прямое зеркало 3. Размер зеркала соизмерим с размером кристаллизатора. Отраженный зеркалом 3 свет 2 от источника 1, проходя через затвердевающую модель слитка (в изложнице-кристаллизаторе) 4, показывает изображение неоднородности на экране 5, которое фиксировалось с помощью цифровой видеокамеры высокого разрешения 6. На основе полученных видеозаписей рассчитывались скорости конвективных потоков сразу после разливки и в процессе затвердевания модельного слитка. Для расчета скоростей конвективных потоков на экран нанесена сетка с величиной стороны квадрата 25 мм.

Разливка расплава в изложницу-кристаллизатор осуществлялась сверху. Характеристики условий проведения экспериментов представлены в табл. 3.

Для достижения поставленной цели с использованием метода физического (холодного) моделирования процесса затвердевания слитков отлиты четыре модельных слитка. Один – по классической технологии (далее – обычный слиток), остальные – с доливкой прибыльной части расплавом спустя различное время: 7, 19 и 40 мин после заливки тела слитка (далее – опытные слитки и/или доливка прибыли спустя 7, 19 и 40 мин). Доливку прибыльной части опытных слитков осуществляли с температурой расплава на 5 °C «холоднее», чем расплав, которым заливали тело слитка. К моменту доливки прибыльной части расплавом площадь затвердевшей твердой фазы в теле опытных слитков (зона столбчатых кристаллов) составила 16,7, 23,5 и 43,4 % соответственно (табл. 1). При моделировании слитков геометрические параметры разливки оставались неизменными (см. табл. 1).

В процессе моделирования продвигающийся фронт затвердевания разделяли на две составляющие: горизонтальное затвердевание – твердая фаза, нарастающая последовательно от стенок к центру изложницы и вер-

тикальное затвердевание – продвижение твердой фазы в вертикальном направлении от низа к центру изложницы по оси.

После заливки расплава в изложницу-кристаллизатор через каждые 5 мин измеряли толщину затвердевшего слоя в вертикальном направлении от низа к центру изложницы по оси и на трех уровнях по высоте слитка (нижнее сечение, середина высоты и подприбыльный горизонт).

По окончании процесса затвердевания проводилось измерение структурных зон модельных слитков и их объемные доли, определялась протяженность и средняя ширина осевой зоны. Оценивали влияние интервала времени доливки прибыльной части слитка расплавом на скорость кристаллизации и динамику нарастания твердой фазы модельных слитков в вертикальном и горизонтальном направлениях затвердевания, а также на общее время затвердевания модельных слитков.

Для оценки изменения поля температур при разливке и кристаллизации слитка 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 TestoIRSoft. Поскольку тепловизор позволяет произвести лишь термометрирование поверхности без непосредственного измерения температуры расплава, то в работе для определения качественной картины условились считать динамику изменения температуры расплава равной динамике изменения температуры поверхности модели изложницы.

Таблица 3

Характеристика условий проведения эксперимента

Table 3. Characteristics of the experimental conditions

Показатель	Технология разливки модельных слитков			
	обычный слиток	доливка прибыли спустя 7 мин	доливка прибыли спустя 19 мин	доливка прибыли спустя 40 мин
Температура заливки расплавом тела слитка, $T_{зал. т.сл.}, ^\circ C$	75	75	75	75
Температура заливки расплавом прибыли, $T_{зал. пр.}, ^\circ C$	75	70	70	70
Время заливки расплавом тела слитка, $\tau_{т.сл.}, c$	42	37	42	46
Время заливки расплавом прибыли, $\tau_{пр.}, c$	45	27	42	38
Время перед доливкой прибыли расплавом, $\tau_{дол. пр.}, мин:c$	–	7:00	19:00	40:00
Температура охлаждающей жидкости, $T_{охл.жид.}, ^\circ C$	11	11	11	11
Масса тела слитка/прибыльной части, $M_{сл. /m_{пр.}}, г$	550/150	550/150	550/150	550/150
Время затвердевания, $\tau_{затв.}, мин$	205	220	238	258

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки полученных данных построены графики, отражающие скорость нарастания твердой фазы в вертикальном и горизонтальном направлениях затвердевания для различных технологий разливки модельных слитков (рис. 2).

Анализ полученных результатов показал, что для обычного слитка (рис. 2, а) и слитка с доливкой при-

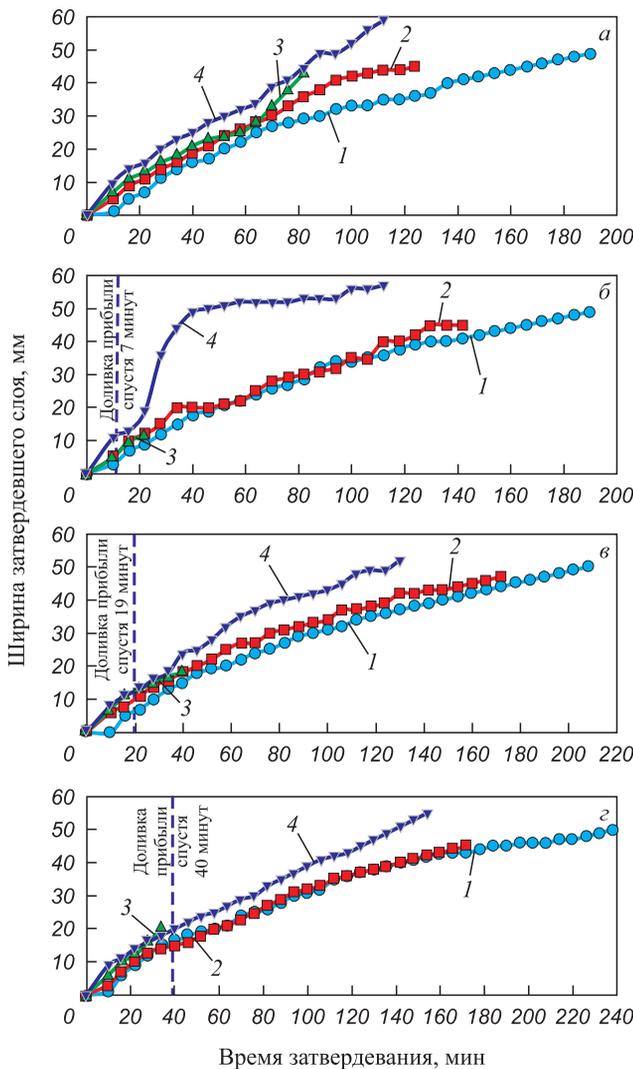


Рис. 2. Кривые нарастания твердой фазы по высоте и сечению модельных слитков, полученные методом физического моделирования:

- а – обычный слиток; б – доливка прибыли спустя 7 мин;
- в – доливка прибыли спустя 19 мин;
- г – доливка прибыли спустя 40 мин;
- 1 – подприбыльный горизонт; 2 – середина высоты;
- 3 – нижнее сечение; 4 – вертикальное затвердевание

Fig. 2. Curves of solid phase growth in height and cross section of model ingots obtained by physical modeling:

- а – ordinary ingot; б – refilling the knock-off head after 7 min;
- в – refilling the knock-off head after 19 min;
- г – refilling the knock-off head after 40 min;
- 1 – sub-knock-off head horizon; 2 – mid-height;
- 3 – lower section; 4 – vertical solidification

были спустя 7 мин (рис. 2, б) в период с 10 по 73 мин, что составляет от 5 до 38 % общего времени затвердевания, процесс структурообразования проходит по объемно-последовательному механизму за счет оседания с «зеркала» расплава в прибыли и вблизи фронта затвердевания обломков кристаллов. Они опускаются в нижнюю часть слитка, формируя конусообразную зону осаждения. Опускающиеся кристаллы способствуют увеличению скорости вертикального затвердевания и тем самым обеспечивают повышение направленности затвердевания слитка. Впоследствии это приведет к меньшему развитию осевой рыхлости и химической неоднородности слитка [1]. Дальнейшее затвердевание слитка происходит в горизонтальном направлении по последовательному механизму.

Следует отметить, что в опытном слитке «дождь кристаллов» начался сразу после доливки прибыли расплавом и продолжался более 50 мин, тогда как в обычном слитке оседание кристаллов началось только с 40 мин и длилось 30 мин. К тому же, в опытном слитке за первые 40 мин затвердевания (21 % общего времени затвердевания) ширина твердой фазы в вертикальном направлении в 2 раза больше, чем в обычном слитке. Таким образом, можно предположить, что доливка прибыли «холодным» расплавом (70 °С) в еще не успевший остыть (прошло 7 мин) в теле слитка «горячий» расплав (75 °С) привела к увеличению температурного градиента и возникновению центров кристаллизации. Это способствовало образованию обильного «дождя» кристаллов, увеличению скорости продвижения фронта затвердевания в вертикальном направлении. Также добавление порции расплава вызвало вынужденную конвекцию, в результате которой с фронта кристаллизации смываются кристаллы, которые опускаются в зону конуса осаждения.

В слитке с доливкой прибыли спустя 19 мин (рис. 2, в) в период с 32 по 79 мин (с 15 по 38 % общего времени затвердевания) затвердевание слитка происходит по объемно-последовательному механизму за счет оседания кристаллов.

Для слитка с доливкой прибыли спустя 40 мин (рис. 2, г) характерно, что он затвердевал по последовательному механизму от стенок к оси слитка без явления «дождь кристаллов», которое было характерно для слитков данной серии эксперимента.

Термометрирование поверхности модели изложницы при затвердевании обычного слитка показало (рис. 3, а; рис. 4, а), что в течение первой половины времени затвердевания слитка тепловой центр располагался в подприбыльном горизонте слитка. Затем сместился на середину высоты слитка, а к концу затвердевания переместился обратно в подприбыльный горизонт, что соответствует существующим представлениям о процессе затвердевания крупных слитков [1; 2].

Для слитка с доливкой прибыли спустя 7 мин (рис. 3, б; рис. 4, б) характерно, что на протяжении

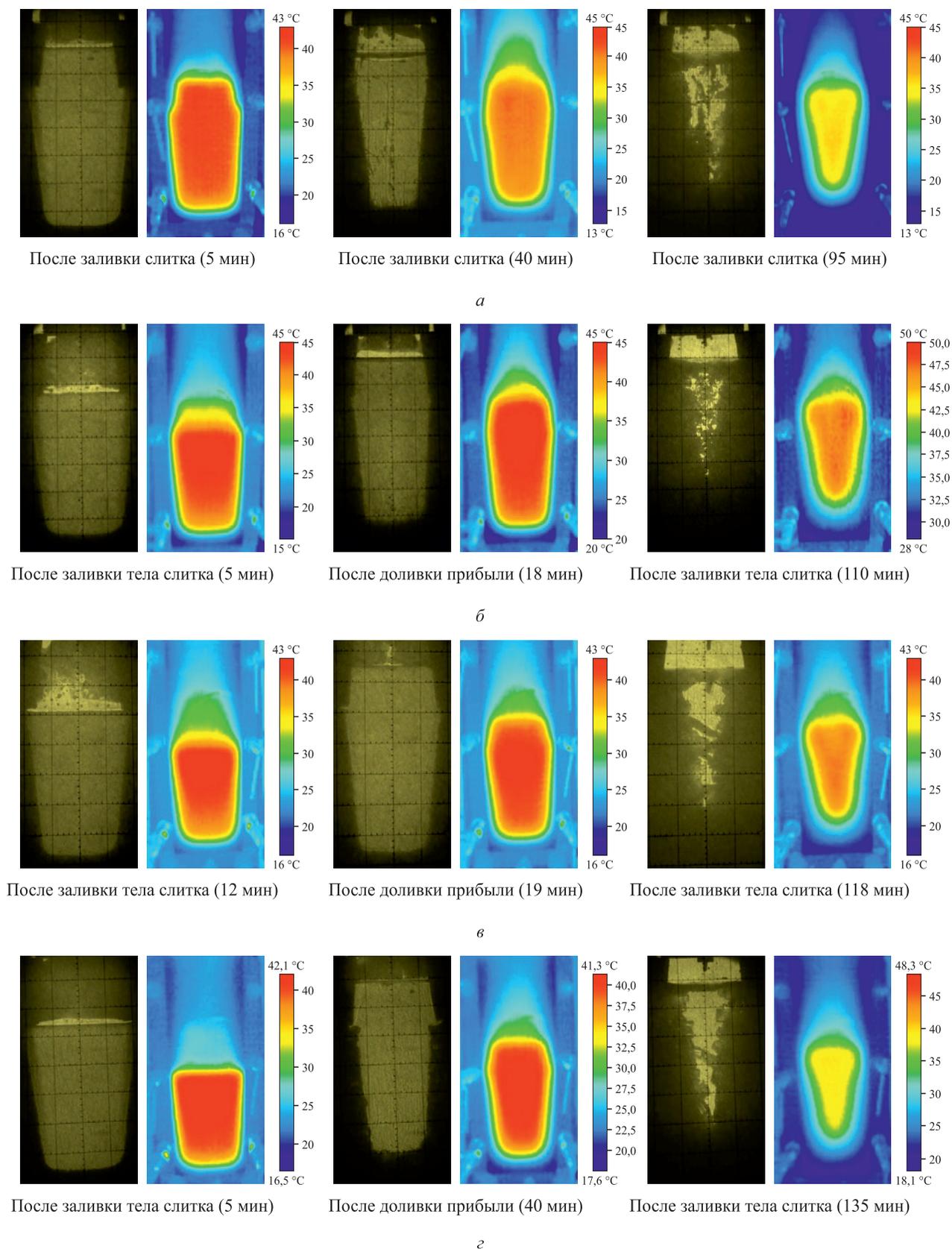


Рис. 3. Динамика перемещения теплового центра при затвердевании модельных слитков:
a – обычный слиток; *b* – доливка прибыли спустя 7 мин; *z* – доливка прибыли спустя 19 мин;
z – доливка прибыли спустя 40 мин

Fig. 3. Dynamics of the thermal center movement during solidification of model ingots:
a – ordinary ingot; *b* – refilling the knock-off head after 7 min; *z* – refilling the knock-off head after 19 min;
z – refilling the knock-off head after 40 min

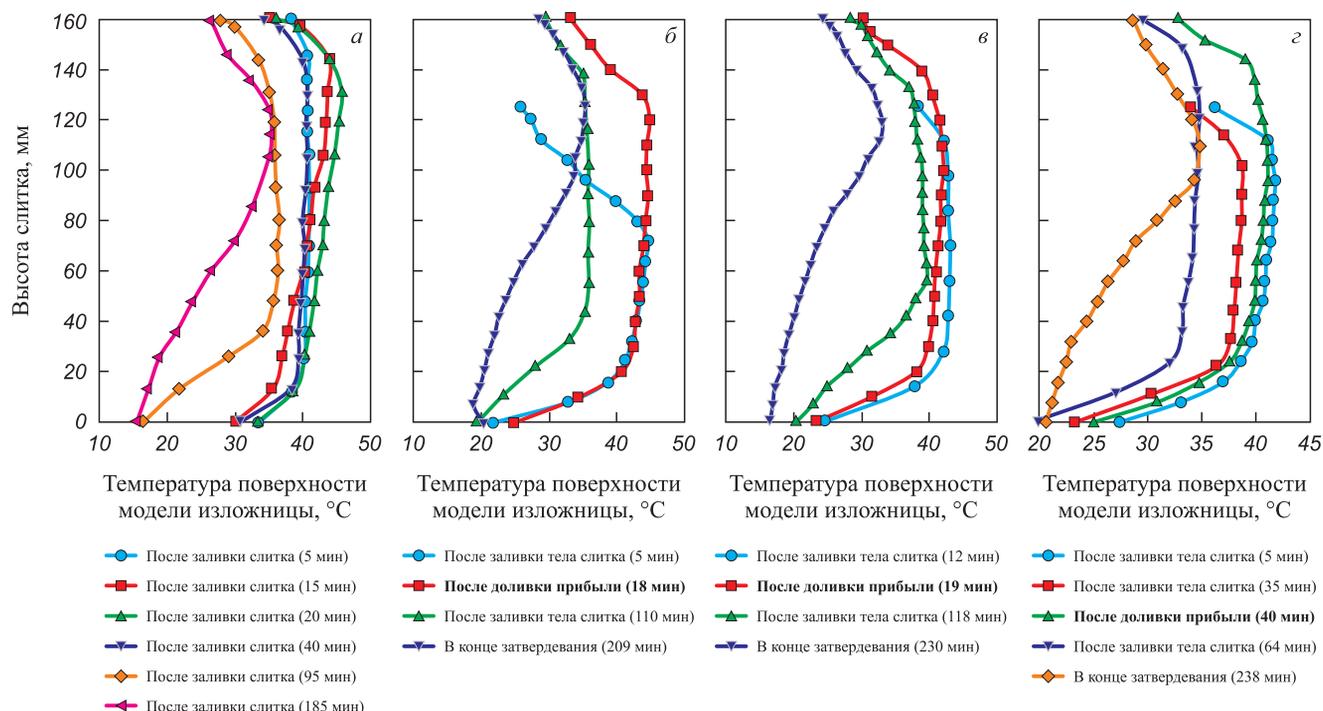


Рис. 4. Изменение температуры поверхности модели изложницы по высоте модельных слитков (на основании обработки тепловизионных изображений с помощью программного обеспечения Testo IRSof):
 а – обычный слиток; б – доливка прибыли спустя 7 мин; в – доливка прибыли спустя 19 мин; г – доливка прибыли спустя 40 мин

Fig. 4. Change in surface temperature of the casting form model in height of the model ingots (based on the processing of thermal vision images using Testo IRSof software):
 а – ordinary ingot; б – refilling the knock-off head after 7 min; в – refilling the knock-off head after 19 min; г – refilling the knock-off head after 40 min

всего времени затвердевания тепловой центр находился и перемещался лишь от середины до 2/3 высоты слитка, а в конце затвердевания переместился в подприбыльный горизонт. Для слитка с доливкой прибыли спустя 19 мин (рис. 3, в; рис. 4, в) характерно, что на протяжении всего времени затвердевания тепловой центр находился на середине высоты слитка, а в конце затвердевания переместился в подприбыльный горизонт. Для слитка с доливкой прибыли спустя 40 мин (рис. 3, г; рис. 4, г) характерно, что до доливки расплава тепловой

центр находился на 2/3 высоты слитка, а после переместился в подприбыльный горизонт вплоть до конца затвердевания.

Таким образом, доливка расплава повлияла на динамику тепловых процессов, происходящих при кристаллизации слитка.

Анализ развития структурных зон модельных слитков (табл. 4, рис. 5) показал, что для трех слитков (рис. 5, а – в) характерно развитие зоны конуса осаждения. Для двух слитков (рис. 5, а, б) характерно проник-

Таблица 4

Объемные доли структурных зон модельных слитков

Table 4. Volume fractions of structural zones in the model ingots

Площадь структурных зон модельных слитков, %	Технология разливки модельных слитков			
	обычный слиток	доливка прибыли спустя 7 мин	доливка прибыли спустя 19 мин	доливка прибыли спустя 40 мин
Столбчатые кристаллы (до доливки прибыли)	–	16,7	23,5	43,4
Столбчатые кристаллы	65,2	22,4	47,3	56,6
Различно ориентированные кристаллы	28,6	42,5	25,2	–
Конус осаждения	6,2	18,4	4,0	–
Усадочная раковина	32,8	41,4	36,3	24,0

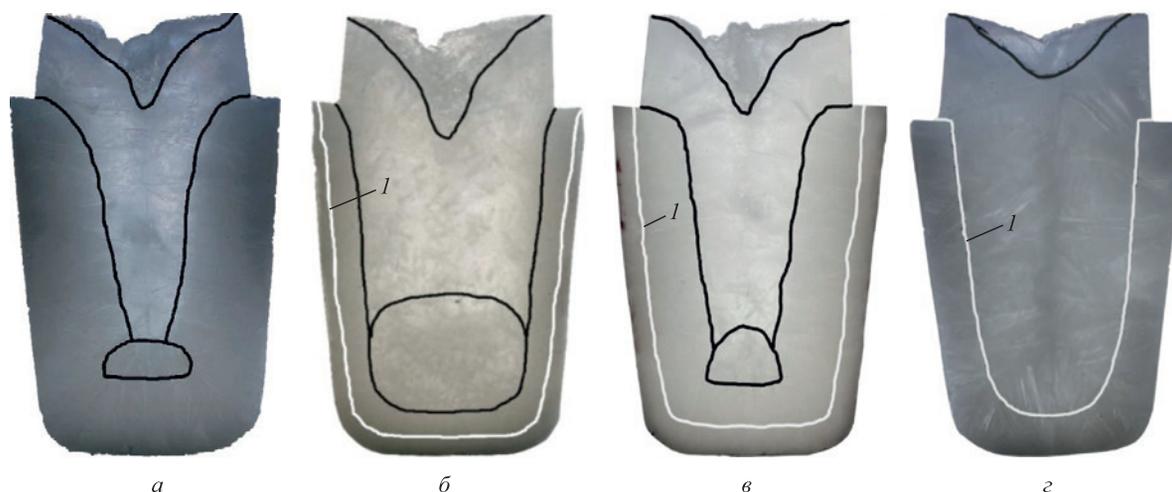


Рис. 5. Макроструктура модельных слитков:

I – граница затвердевшего слоя твердой фазы в теле слитка перед доливкой в прибыльную часть расплава;
a – обычный слиток; *б* – доливка прибыли спустя 7 мин; *в* – доливка прибыли спустя 19 мин;
г – доливка прибыли спустя 40 мин

Fig. 5. Macrostructure of the model ingots:

I – boundary of the solidified solid phase layer in the ingot body before refilling the knock-off head with the melt;
a – ordinary ingot; *б* – refilling the knock-off head after 7 min; *в* – refilling the knock-off head after 19 min;
г – refilling the knock-off head after 40 min

новение из прибыли в тело слитка усадочной раковины, что, безусловно, является дефектом слитков. Визуальный осмотр макроструктуры отлитых слитков показал, что у слитка, доливка прибыли которого осуществлялась спустя 40 мин (рис. 5, *г*), наблюдается плотная бездефектная структура.

Таким образом, доливка прибыли расплавом спустя 40 мин после заливки тела слитка повлияла на механизм кристаллизации слитка (он затвердевал по последовательному механизму от стенок к оси слитка, без явления «дождь кристаллов») и способствовала продолжению роста столбчатых кристаллов до оси слитка, что привело к наименьшему развитию усадочной раковины и бездефектной структуры.

Выводы

Установлено, что в обычном слитке до 40 мин затвердевание идет по последовательному механизму, а после начинается оседание кристаллов («дождь кристаллов») и затвердевание слитка проходит по объемно-последовательному механизму. Доливка прибыльной части слитка расплавом спустя 40 мин после заливки тела слитка способствовала продолжению последовательного механизма затвердевания слитка, что привело к образованию монолитной бездефектной структуры в теле слитка и наименьшему развитию усадочной раковины в объеме прибыли.

Доливка расплава до 40 мин приводит к стимулированию раннего оседания кристаллов («дождь кристаллов»), что способствует увеличению направленности кристаллизации в вертикальном направлении.

Термометрирование поверхности изложницы-кристаллизатора при затвердевании модельных слитков показало влияние доливки прибыльной части слитка расплава на динамику тепловых процессов, происходящих при кристаллизации слитка.

Полученные результаты обуславливают возможность разработки технологии дифференцированной разливки слитков при наполнении их прибыли расплавом через определенный интервал времени после заливки тела слитка. Это позволит воздействовать на процесс формирования структуры металла и сокращение дефектных зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Скобло С.Я., Казачков Е.А. *Слитки для крупных поковок*. Москва: Металлургия; 1973:247.
2. Смирнов А.Н., Макуров С.Л., Сафонов В.М., Цупрун А.Ю. *Крупный слиток*. Донецк: Вебер; 2009:279.
3. Жульев С.И., Зюбан Н.А., Руцкий Д.В. *Стальные слитки: проблемы качества и новые технологии*. Волгоград: ВолгГТУ; 2016:176.
4. Гаманюк С.Б. *Исследование крупного кузнечного стального слитка измененной геометрии с целью повышения качества металла поковок: Дисертация ... кандидата технических наук*. Волгоград, 2012.
5. Jiaqi W., Paixian F., Hongwei L., Dianzhong L., Yiyi L. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot. *Materials & Design*. 2012;35:446–456. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>
6. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M. Influence of casting parameters on shrinkage porosity of a 19 ton steel ingot. *Metalurgia Italiana*. 2016;108(1):37–44.

7. 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;112(5):37–47.
8. 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;23(4):312–321.
<https://doi.org/10.2355/isjinternational1966.23.312>
9. 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;7(1):107–112.
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-107-112>
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;7(1):107–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-107-112>
10. Zhang C., Bao Y., Wang M., Guo B. Influence of casting parameters on the shrinkage porosity of a 40-ton steel ingot by numerical simulation. In: *Proceedings of the 6th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking, 2015*. 2015:543–546.
11. 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;12(1):29.
<https://doi.org/10.3390/met12010029>
12. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Tremblay R., Lapiere L.-P. On the effect of filling rate on positive macrosegregation patterns in large size cast steel ingots. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018;8(10):1878.
<https://doi.org/10.3390/app8101878>
13. Marx K., Rödi S., Schramhauser S., Seemann M. Optimization of the filling and solidification of large ingots. *Metallurgia Italiana*. 2014;106(11–12):11–19.
14. 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;48:2927–2930.
<https://doi.org/10.1007/s11661-017-4008-y>
15. Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Mogeritsch J., Wu M., Ludwig A. Review of ammonium chloride-water solution properties. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2018;63(9):3170–3183.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b01062>
16. Пат. 169365 РФ, В22Д7/08. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в изложнице / Гаманюк С.Б., Зюбан Н.А., Руцкий Д.В., Палаткин С.В. Заявлено 24.05.2016; опубликовано 15.03.2017; Бюллетень № 8.
17. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. *Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов*. Москва: Машиностроение; 1998:359.
18. Горунов А.И., Науменко В.В., Руцкий Д.В. Влияние долилки прибыльной части на процесс затвердевания и структурообразования слитка стали 38ХНЗМФА. *Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»*. Выпуск. 2: Межвузовский сборник научных статей. 2008;10:157–159.
Gorunov A.I., Naumenko V.V., Rutskiy D.V. Effect of refilling the knock-off head on solidification and structure formation of 38KhN3MFA steel ingot. *News of the Volgograd State Technical University. Series “Problems of materials science, welding and strength in mechanical engineering”*. Issue 2: Interuniver. Coll. of Sci. Papers. 2008;10:157–159. (In Russ.).
19. Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С. *Процессы формирования отливок и их моделирование*. Москва: Машиностроение; 2001:208.

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

Дмитрий Владимирович Руцкий, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: drutskii@vstu.ru

Николай Александрович Зюбан, д.т.н., профессор кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tecmat@vstu.ru

Михаил Владимирович Кириличев, заведующий лабораторией кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tecmat@vstu.ru

Макс Станиславович Никитин, аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tecmat@vstu.ru

Sergei B. Gamanuk, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Materials Technology”, Volgograd State Technical University

E-mail: gamanuk@mail.ru

Dmitrii V. Rutskiy, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair “Materials Technology”, Volgograd State Technical University

E-mail: drutskii@vstu.ru

Nikolai A. Zyuban, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Materials Technology”, Volgograd State Technical University

E-mail: tecmat@vstu.ru

Mikhail V. Kirilichev, Head of the Laboratory of the Chair “Materials Technology”, Volgograd State Technical University

E-mail: tecmat@vstu.ru

Maks S. Nikitin, Postgraduate of the Chair “Materials Technology”, Volgograd State Technical University

E-mail: 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 статьи, 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.

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

D. V. Rutskiy – 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 research, processing of the research results.

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

Поступила в редакцию 10.10.2023

После доработки 31.10.2023

Принята к публикации 11.11.2023

Received 10.10.2023

Revised 31.10.2023

Accepted 11.11.2023