

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДОЛИВАЕМОГО РАСПЛАВА
В ПРИБЫЛЬНУЮ ЧАСТЬ СЛИТКА НА ПРОЦЕСС ЗАТВЕРДЕВАНИЯ
И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: gamanuk@mail.ru

В работе представлены результаты лабораторного исследования процесса затвердевания и развития структурных зон в слитках при доливке расплавом прибыльной части спустя 19 мин после заливки тела слитка и при различной температуре доливаемого расплава ($T_{\text{зал. т.сл.}} = 75^\circ\text{C}$; $T_{\text{зал. пр.}} = 70^\circ\text{C}$; $T_{\text{зал. пр.}} = 75^\circ\text{C}$; $T_{\text{зал. пр.}} = 80^\circ\text{C}$). Исследования проводили методом физического (холодного) моделирования, на плоской модели изложницы (изложница-кристаллизатор). В качестве аналога взята масштабная модель кузнечного слитка массой 19,6 т. В качестве моделирующего раствора использовали 5-водный раствор натрия серноватистокислого ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Разливка расплава в изложницу-кристаллизатор проходила сверху. Данная работа выполнена в продолжение ранее опубликованных работ по исследованию влияния технологии дифференцированной разливки на процесс затвердевания и структурообразования зон в кузнечных слитках. В работе установлено влияние доливки прибыльной части слитка расплавом на динамику тепловых процессов, происходящих при кристаллизации слитка. Определено, что у модельных слитков, отлитых с доливкой прибыльной части расплавом увеличивается общее время кристаллизации. Показано, что доливка расплава в прибыль способствует подавлению объемного механизма затвердевания и способствует развитию зоны столбчатых кристаллов, затвердевающих по последовательному механизму.

Ключевые слова: физическое моделирование, разливка сверху, изложница-кристаллизатор, доливка расплава, процесс затвердевания, осевая зона, кузнечный слиток

© Гаманюк С. Б., Руцкий Д. В., Зюбан Н. А., Кириличев М. В., Афонин Д. С., Сысоев А. В., 2024.

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

S. B. Gamanyuk, D. V. Rutsii, N. A. Zyuban, M. V. Kirilichev, D. S. Afonin, A. V. Sysoev

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE TEMPERATURE
OF THE POURED MELT IN THE PROFITABLE PART OF THE INGOT
ON THE SOLIDIFICATION PROCESS AND STRUCTURE FORMATION**

Volgograd State Technical University

The paper presents the results of a laboratory study of the solidification process and the development of structural zones in ingots when refilling the profitable part with melt, 19 minutes after pouring the ingot body and at different temperatures of the refilled melt ($T_{z. \text{ t.sl.}} = 75^\circ\text{C}$; $T_{z. \text{ ave.}} = 70^\circ\text{C}$; $T_{z. \text{ ave.}} = 75^\circ\text{C}$; $T_{z. \text{ ave.}} = 80^\circ\text{C}$). The research was carried out by the method of physical (cold) modeling, on a flat model of a mold (mold-crystallizer). As an analogue, a scale model of a forge ingot weighing 19.6 tons is taken. A five-aqueous solution of sulfuric acid sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) was used as a modeling solution. The melt was poured into the mold mold from above. This work was carried out in continuation of previously published works on the study of the influence of differentiated casting technology on the process of solidification and structure formation of zones in forging ingots. The paper establishes the effect of refilling the profitable part of the ingot with melt on the dynamics of thermal processes occurring during the crystallization of the ingot. It is determined that the total crystallization time increases for model ingots cast with refilling of the profitable part with melt. It is shown that refilling the melt into profit contributes to the suppression of the volumetric solidification mechanism and promotes the development of a zone of columnar crystals solidifying by a sequential mechanism.

Keywords: physical simulation, pouring from above, crystallization mould, topping up with melt, solidification process, axial zone, 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.

Одним из самых простых и эффективных способов воздействия на процесс затвердевания и развития дефектов в литом металле слитка является изменение геометрии слитка – отношения высоты к среднему диаметру [1–4], конусности [5, 6], способа утепления головной части слитка [7–9], способа и скорости разлива металла [10–12].

Повышение качества литого металла крупных слитков невозможно без знаний о механизме и условиях, при которых происходит образование внутренних дефектов литого металла.

Одним из легкорезализуемых и воспроизводимых способов исследования процессов, протекающих при затвердевании кузнечных слитков, является физическое (холодное) моделирование [13–14], которое позволяет определить

интенсивность продвижения твердой и твердо-жидкой фаз, конвективного перемешивания и, как следствие, влияние этих процессов на степень развития внутренних дефектов.

Ранее в работах [15–19] показано, что одним из способов воздействия на процесс затвердевания является доливка прибыльной части, при этом добавление порций расплава в прибыль целесообразно проводить, при соотношении $\Delta T_{\text{кр}}/\delta T \geq 1$. В работе [19] показано, что при увеличении значения параметра δT при доливке прибыльной части слитка происходит изменение механизма затвердевания от объемного к последовательному, с образованием более плотной дендритной структуры.

Целью данной работы являлось исследование влияния доливки расплавом различной температуры ($T_{\text{зал. пр.}} = 70^\circ\text{C}$; 75°C ; 80°C) прибыльной части слитка спустя 19 мин после заливки тела слитка ($T_{\text{зал. т.сл.}} = 75^\circ\text{C}$) на процесс затвердевания и развития структурных зон в модельных слитках.

**Материал и методика
проведения исследований**

В данной работе использовался метод физического (холодного) моделирования слитков; оборудование и методика подробно рассмотрены в работах [15, 16]. Параметры моделируемого слитка и аналога представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры промышленного и модельного слитков [15–17]

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	77,5
Объем прибыльной части слитка ($V_{пр.}$), %	18,0	18,0
Объем донной части слитка ($V_{дон.}$), %	4,6	4,5

В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватисто-кислый (кристаллический гипосульфит) – $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$. Обоснование выбора моделирующего вещества, а также оценка соответствия процессов, происходящих в модели и в сравнительном реальном слитке, приведены в работах [15, 16, 20]; в них показано соответствие критериев подобия (Bi, N, Fo, Fr, We) в модели и аналоге.

Особенности конвективных потоков при затвердевании модельного слитка исследовали с помощью прямого теневого метода (шлирен-метод). Суть метода и схема установки подробно описаны в работах [15, 16].

Условия проведения физического моделирования (моделирующее вещество, установка, метод получения экспериментальных данных, используемое оборудование) в данной работе совпадали с методикой, приведенной в работах [15, 16].

Отлиты четыре модельных слитка:

слиток № 1 – по классической технологии (сравнительный слиток);

слиток № 2 – опытный слиток, с доливкой прибыльной части расплавом при температуре 70 °С;

слиток № 3 – опытный слиток, с доливкой прибыльной части расплавом при температуре 75 °С;

слиток № 4 – опытный слиток, с доливкой прибыльной части расплавом при температуре 80 °С.

Доливка расплавом прибыльной части слитков № 2–4 проводилась спустя 19 минут.

Разливка расплава в изложницу-кристаллизатор осуществлялась сверху. Характеристики условий проведения экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика условий проведения эксперимента

Наименование показателя	Технология разлива модельных слитков			
	слиток № 1	слиток № 2	слиток № 3	слиток № 4
Температура заливки расплавом тела слитка, $T_{зал. т.сл.}$ (°С)	75	75	75	75
Температура заливки расплавом прибыли, $T_{зал. пр.}$ (°С)	75	70	75	80
Время заливки расплавом тела слитка, $\tau_{т.сл.}$ (сек)	42	42	42	42
Время заливки расплавом прибыли, $\tau_{пр.}$ (сек)	45	42	40	40
Время перед доливкой прибыли расплавом, $\tau_{дол. пр.}$ (мин:сек)	–	19:00	19:00	19:00
Температура охлаждающей жидкости, $T_{охл. жид.}$ (°С)	11	11	11	11
Масса тела слитка/прибыльной части, $M_{сл.} / m_{пр.}$ (гр.)	550/150	550/150	550/150	550/150
Время затвердевания, $\tau_{затв.}$ (мин)	205	238	222	218

Результаты исследований и их обсуждение

Моделирование, проведенное в работах [16, 17], показало, что сравнительный слиток № 1 (рис. 1, а) в период времени с 10 по 73 мин

(от 5 до 38 % от общего времени затвердевания) затвердевает по объемно-последовательному механизму, за счет оседания с «зеркала» расплава прибыльной части, а также уноса конвективными потоками с двухфазной зоны про-

двигающегося фронта затвердевания обломков кристаллов, которые опускаются в нижнюю часть слитка, формируя конусообразную зону из мелких кристаллитов. Оседание кристаллов в слитке № 1 началось только с 40 минуты и продолжалось в течение 30 минут [16, 17].

Результаты физического моделирования показали, что у модельных слитков, отлитых

с доливкой прибыльной части расплавом, увеличивается общее время кристаллизации (табл. 2). Наибольшее время затвердевания характерно для модельного слитка № 2 (рис. 1, б), отлитого с доливкой прибыльной части с меньшей температурой расплава (70 град). В период с 32 по 79 мин (с 15 по 38 % от общего времени затвердевания) затвердевание слитка происходит

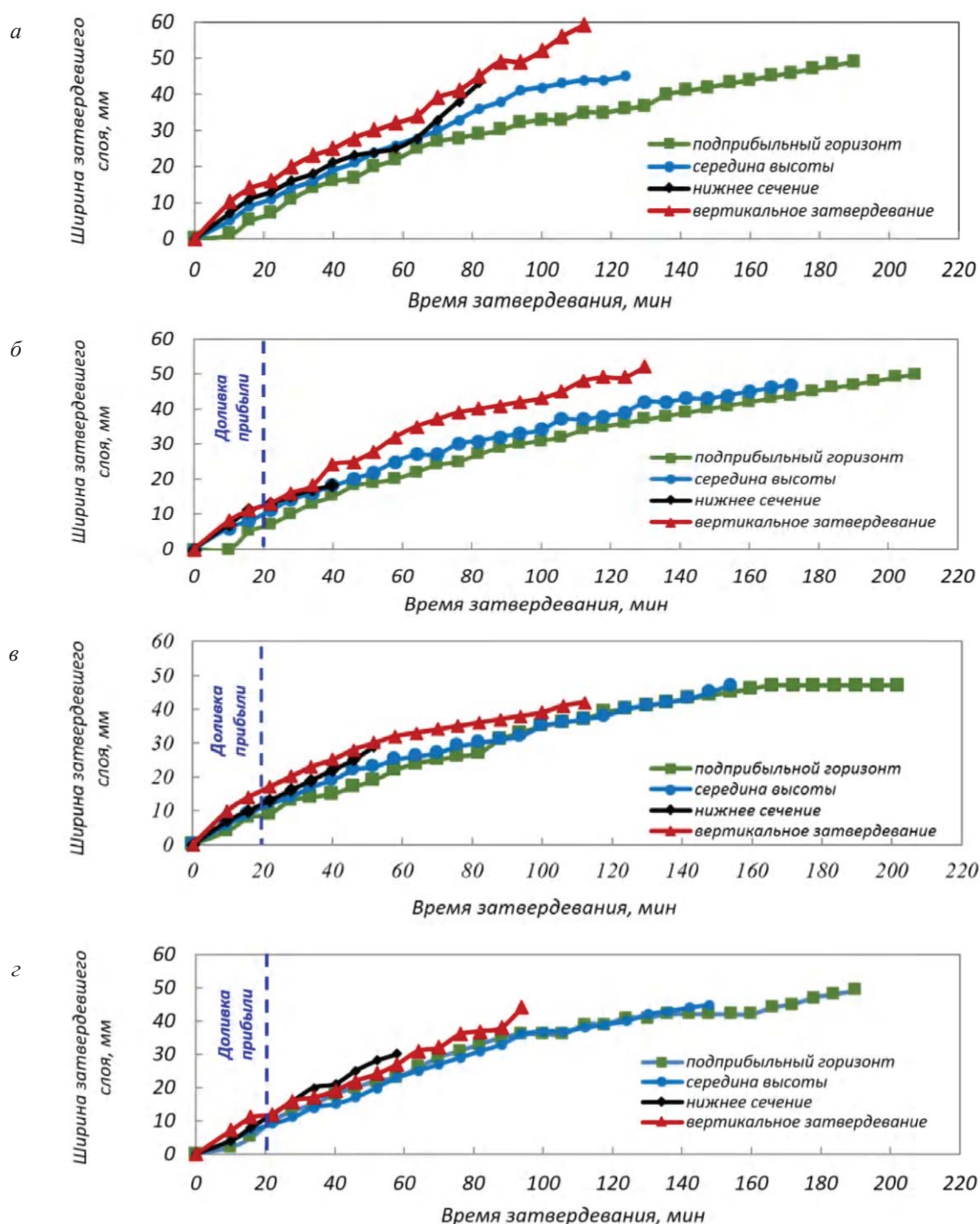


Рис. 1. Кривые нарастания твердой фазы по высоте и сечению модельных слитков, полученные методом физического моделирования:

а – слиток № 1 [16, 17]; б – слиток № 2 [16]; в – слиток № 3 [17]; г – слиток № 4

по объемно-последовательному механизму, за счет оседания кристаллов, далее – по последовательному механизму. Можно предположить, что доливка прибыли «холодным» расплавом (70 град) спустя 19 мин привела к увеличению температурного градиента, возникновению центров кристаллизации, что способствовало возникновению явления «дождь кристаллов» и затвердеванию слитка по объемно-последовательному механизму.

В слитках № 3 и № 4 (рис. 1, в) затвердева-

ние, в отличие от слитков № 1 и № 2, проходит по последовательному механизму от поверхности стенок модели изложницы к оси слитка, без образования кристаллитов на зеркале прибыльной части и их оседания в доннюю часть слитка.

Термометрирование поверхности модели изложницы позволило определить динамику перемещения теплового центра в модельных слитках, отлитых с различной температурой расплава, доливаемого в прибыльную часть (рис. 2 и 3).

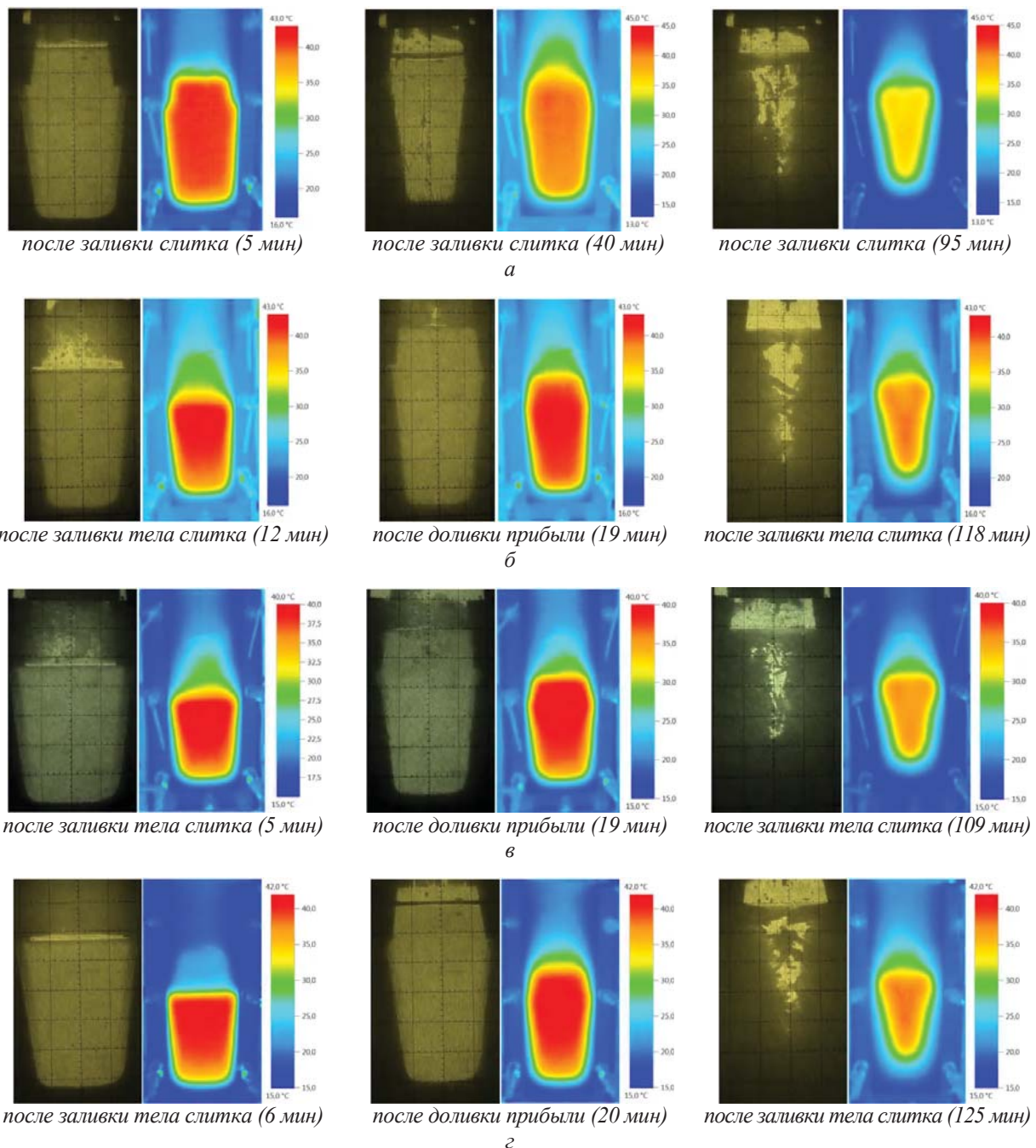


Рис. 2. Динамика перемещения теплового центра при затвердевании модельных слитков:
а – слиток № 1 [16, 17]; б – слиток № 2 [16]; в – слиток № 3 [17]; г – слиток № 4

В работе [16, 17], показано, что в сравнительном слитке № 1 (рис. 2, а и 3, а), в течение первой половины времени затвердевания тепловой центр располагается в прибыльной части, далее смещается на 1/2 высоты тела слитка; к концу затвердевания принимает начальное расположение, что подтверждает существующие представления о процессе затвердевания крупных слитков [21, 22].

Для слитка № 2 (рис. 3, б и 4, б) и слитка № 4 (рис. 2, г и 3, г) характерно, что на протяжении

всего времени затвердевания тепловой центр находился на середине высоты слитка, а в конце затвердевания переместился в подприбыльный горизонт.

Для слитка № 3 (рис. 2, в и 3, в) характерно, что на протяжении всего времени затвердевания тепловой центр находился на середине высоты тела слитка.

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

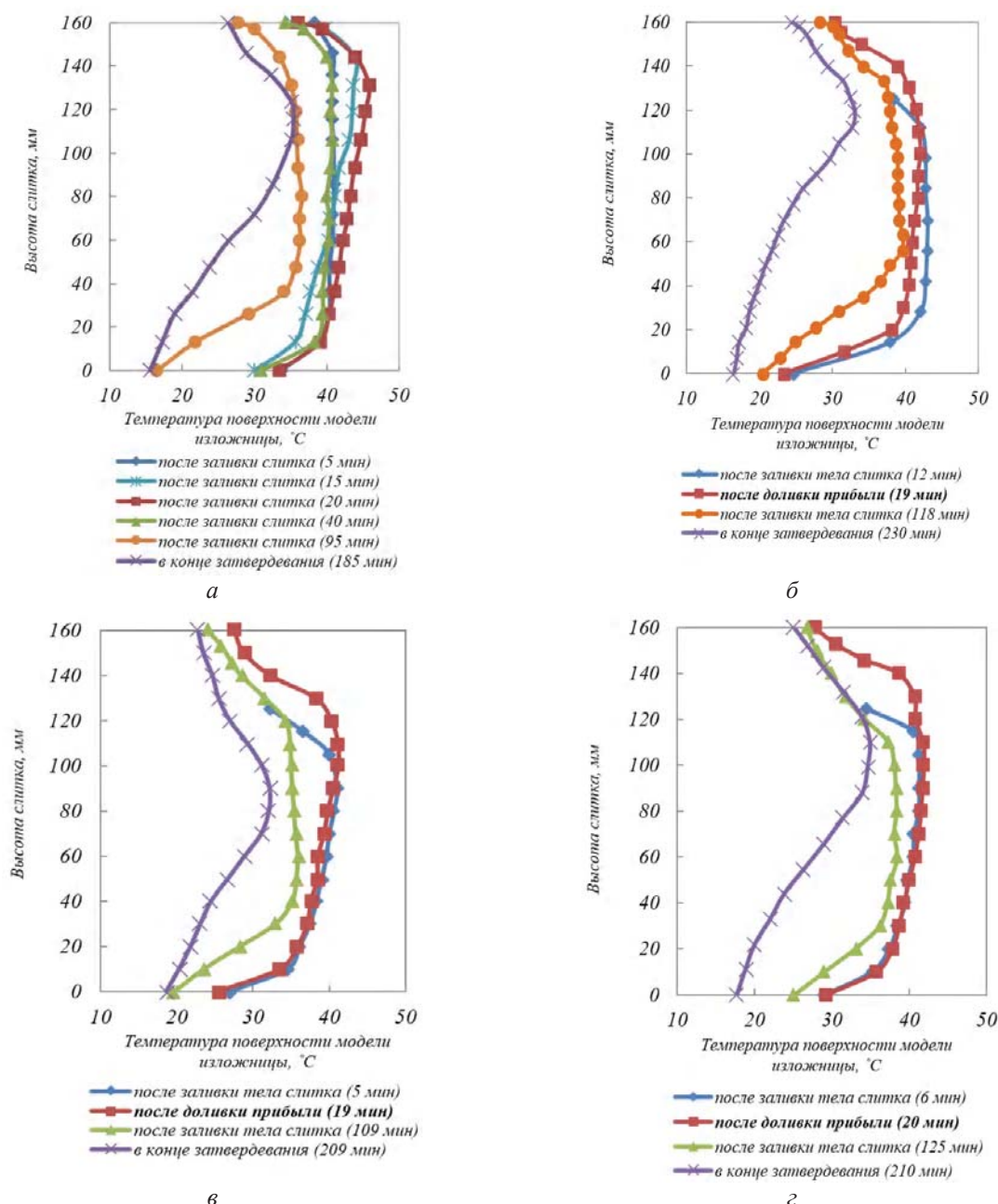


Рис. 3. Изменение температуры поверхности модели изложницы по оси модельных слитков (обработка тепловизионных изображений в ПО Testo IIRSoft):

а – слиток № 1 [16, 17]; б – слиток № 2 [16]; в – слиток № 3 [17]; г – слиток № 4

Анализ макроструктуры модельных слитков (рис. 4) позволил определить влияние температуры расплава, доливаемого в прибыльную часть, на развитие структурных зон (объемные доли).

Анализ развития структурных зон модельных слитков (рис. 4, табл. 3) показал, что для слитков № 1 и № 2 (рис. 4, *а, б*) характерно развитие зоны конуса осаждения и проникновение из прибыли в тело слитка усадочной раковины, что является дефектом слитков.

В работах [16, 17], показано, что в сравнительных слитках № 1 и № 2 из-за развития объемно-последовательного механизма затвердевания (см. рис. 1, *а, б*) характерно образование ярко выраженной структурной зоны, состоящей из мелких кристаллитов (зона «конуса осаждения»), и проникновение из прибыльной части в тело слитка подусадочной пористости, что, безусловно, является дефектом слитка (рис. 4, *а, б*). Слитки № 1 и № 2 имеют большую струк-

турную неоднородность (большее развитие структурных зон).

Для слитков № 3 и № 4 (см. рис. 4, табл. 3) наблюдается отсутствие зоны различно ориентированных кристаллов и, как следствие, наличие плотной бездефектной осевой зоны. Эти слитки имеют менее развитую структурную неоднородность, что проявляется в отсутствии зоны различно ориентированных кристаллов.

Таким образом, доливка расплава с равной и большей температурой в прибыль спустя 19 минут способствует подпитке «междендритного» пространства в теле слитка и приводит к более благоприятным условиям для продолжения роста зоны столбчатых кристаллов, от периферии к оси слитка; подавлению развития зоны различно ориентированных кристаллов и зоны осевой рыхлости в слитках и, как следствие, снижению структурной неоднородности и получению плотной структуры осевой зоны модельных слитков № 3 и № 4.



Рис. 4. Макроструктура модельных слитков:

1 – граница затвердевшего слоя твердой фазы в теле слитка перед доливкой в прибыльную часть расплава;
а – слиток № 1 [16, 17]; *б* – слиток № 2 [16]; *в* – слиток № 3 [17]; *г* – слиток № 4

Таблица 3

Объемные доли структурных зон модельных слитков

Наименование структурных зон модельных слитков	Технология разливки модельных слитков			
	слиток № 1	слиток № 2	слиток № 3	слиток № 4
Площадь столбчатых кристаллов (до доливки прибыли), %	–	23,5	23,5	23,5
Площадь столбчатых кристаллов, %	65,2	47,3	76,5	76,5
Площадь различно ориентированных кристаллов, %	28,6	25,2	–	–
Площадь конуса осаждения, %	6,2	4,0	–	–
Площадь усадочной раковины, %	32,8	36,3	31,7	37,7

Заключение

Результатами лабораторных исследований по физическому (холодному) моделированию установлено:

– у модельных слитков, отлитых с доливкой прибыльной части расплавом увеличивается общее время кристаллизации; наибольшее время затвердевания характерно для слитка № 2, отлитого с доливкой прибыльной части с меньшей температурой расплава (70 град);

– модельные слитки № 3 и № 4, отлитые с доливкой прибыльной части при равной (75 град) и большей (80 град) температуре расплава, чем при отливке тела слитка, отличаются от сравнительного слитка № 1 и опытного слитка № 2 (70 град) меньшим развитием структурной неоднородности и более плотной осевой зоной (бездефектной структурой) в теле слитка. Усадочная раковина полностью концентрируется в объеме прибыльной части слитка;

– затвердевание модельных слитков № 3 и № 4 на протяжении всего времени их затвердевания происходит по последовательному механизму от стенок к оси слитка, с преобладающим развитием зоны столбчатых кристаллов и подавлением объемного механизма затвердевания без оседания кристаллитов с «зеркала» расплава прибыли и продвигающегося фронта затвердевания;

– влияние доливки прибыльной части слитка расплавом на динамику тепловых процессов, происходящих при кристаллизации слитка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chen Zh., Senk D., Firsbach F. Experimental investigations on solidification of 500-kg steel ingots with laboratory trials // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018. Vol. 49B. P. 2514–2532. DOI: 10.1007/s11663-018-1325-5.
2. Tashiro Koichi, Watanabe Shiro, Kitagawa Ikujiro, Tamura Itaru. 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, Iss. 4. P. 312–321. DOI: 10.2355/isijinternational1966.23.312.

3. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем / А. Н. Ромашкин, А. Н. Мальгинов, Д. С. Толстых, И. А. Иванов, В. С. Дуб // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. Т. 7. № 1. С. 107–112. DOI: 10.20537/2076-7633-2015-7-1-107-112.

4. 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*. 2015. № 10. С. 14–18. DOI: 10.17580/cisr.2015.01.03.

5. Исследование строения слитка с захоложенной головной частью и анализ качества металла получаемых из него попок / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, С. Б. Гаманюк, М. Ю. Чубуков // *Черные металлы*. – 2017. – № 10 (1030). – С. 41–47.

6. Jiaqi Wang, Paixian Fu, Hongwei Liu, Dianzhong Li, Yiyi Li. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot // *Materials & Design*. 2012. Vol. 35. P. 446–456. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.056.

7. 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, Iss. 1. P. 37–44.

8. Zhang Chaojie, BaoYanping, Wang Min, Guo Baoqi. Influence of casting parameters on the shrinkage porosity of a 40-ton steel ingot by numerical simulation // *Proceedings of the 6th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking*. 2015. P. 543–546.

9. 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, Iss. 5. P. 37–47.

10. 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, Iss. 1. 29. DOI: 10.3390/met12010029.

11. 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, Iss. 10. 1878. DOI: 10.3390/app8101878.

12. Marx K., Rödi S., Schramhauser S., Seemann M. Optimization of the filling and solidification of large ingots // *Metallurgia Italiana*. 2014. Vol. 106, Iss. 11–12. P. 11–19.

13. Ludwig A., Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Wu M. Massive formation of equiaxed crystals by avalanches of mushy zone segments // *Metallurgical and materials transactions A*. 2017. Vol. 48A. P. 2927–2930.

14. 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.

15. Моделирование процесса затвердевания кузнечно-го слитка при доливке прибыльной части расплавом / С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, М. В. Кириличев // Черные металлы. – 2023. № 10. С. 57–62. DOI: 10.17580/chm.2023.10.09.

16. 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 // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2023. № 66(6). С. 750–759. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-6-750-759.

17. Исследование влияния доливки расплава в прибыльную часть слитка на процесс затвердевания и структурообразование методом физического (холодного) моделирования / С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан,

М. В. Кириличев // Черные металлы. – 2024. – № 5. – С. 22–29. – DOI 10.17580/chm.2024.05.03.

18. Ефимов, В. А. Современные технологии разливы и кристаллизации сплавов / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. – М. : Машиностроение, 1998. – 359 с.

19. Горунов, А. И. Влияние доливки прибыльной части на процесс затвердевания и структурообразования слитка стали 38ХНЗМФА / А. И. Горунов, В. В. Науменко, Д. В. Руцкий // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»; вып. 2). – С. 157–159.

20. Эльдарханов, А. С. Процессы формирования отливок и их моделирование / А. С. Эльдарханов, В. А. Ефимов, А. С. Нурадинов. – М. : Машиностроение, 2001. – 208 с.

21. Скобло, С. Я. Слитки для крупных поковок / С. Я. Скобло, Е. А. Казачков. – Москва : Металлургия, 1973. – 247 с.

22. Крупный слиток / А. Н. Смирнов, С. Л. Макуров, В. М. Сафонов, А. Ю. Цупрун. – Донецк : Вебер, 2009. – 279 с.