

Литейное производство Casting

Научная статья
УДК 261.74.04
DOI: 10.14529/met240402

МЕТОДИКА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

И.Н. Ермаков, erdakovin@susu.ru

А.В. Карпинский, karpinskiiav@susu.ru

Д.А. Винник, vinnikda@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. На протяжении более чем полувекового опыта слитки из алюминиевых сплавов получают методом непрерывного литья. Фазовый переход металла из жидкого состояния в твердое представляет собой сложный процесс, и доводку литейной технологии приходится проводить на реальных отливках, что связано с немалыми материальными и временными затратами. Сократить расходы на этапе опытного литья позволяют системы компьютерного моделирования литейных процессов.

Литейные процессы по своей сути мультифизические, и эта особенность требует искать решения связанных задач. В полунепрерывном литье к таким задачам относится определение фронта кристаллизации сплава при одновременном движении формирующейся заготовки в условиях непрерывного теплоотвода и поступлении очередных порций расплава в кристаллизатор. Совместное осуществление таких сложных вычислительных моделей гидравлики и теплофизики требует внесения систем ограничений и допущений без искажения физики процесса. На практике уже хорошо себя зарекомендовали такие системы инженерного анализа, как ProCAST, LVMFlow, PolygonSoft, MAGMASOFT и др.

В связи с созданием технологии для новых материалов программы «Приоритет 2030» и отсутствием модуля непрерывного литья в указанных специализированных системах необходима методика проведения вычислительного эксперимента с позиций квазистационарного приближения. При этом вытягивание заготовки рассматривать ступенчато в виде последовательности событий через фиксированные промежутки времени. На каждом шаге осуществлять решение только тепловой задачи, считая мгновенным смещение поддона машины на заданное расстояние и моментальным заполнение кристаллизатора расплавом до фиксированного уровня. В дальнейшем полученные результаты позволят адекватно подобрать оборудование непрерывного литья и более тщательно подготовиться к натурному эксперименту.

Ключевые слова: полунепрерывное литье, затвердевание, алюминиевый сплав

Для цитирования: Ермаков И.Н., Карпинский А.В., Винник Д.А. Методика квазистационарного моделирования зоны затвердевания алюминиевого сплава при полунепрерывном литье // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 4. С. 17–26. DOI: 10.14529/met240402

METHOD OF QUASI-STATIONARY MODELING OF THE SOLIDIFICATION ZONE OF ALUMINUM ALLOY IN SEMI-CONTINUOUS CASTING

I.N. Erdakov, erdakovin@susu.ru
A.V. Karpinskii, karpinskiiav@susu.ru
D.A. Vinnik, vinnikda@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. For more than half a century of experience, ingots of aluminum alloys have been produced by continuous casting. The phase transition of metal from a liquid to a solid state is a complex process and the refinement of the casting technology has to be carried out on real castings, which is associated with considerable material and time costs. Computer modeling systems for casting processes allow reducing costs at the stage of experimental casting.

Casting processes are inherently multiphysical and this feature requires finding solutions to related problems. In semi-continuous casting, such problems include determining the crystallization front of the alloy with the simultaneous movement of the forming blank under conditions of continuous heat removal and the flow of successive portions of the melt into the crystallizer. The joint implementation of such complex computational models of hydraulics and thermal physics requires the introduction of systems of constraints and assumptions without distorting the physics of the process. In practice, such engineering analysis systems as ProCAST, LVMFlow, PolygonSoft, MAGMASOFT, etc. have already proven themselves well.

In connection with the creation of technology for new materials of the Priority 2030 program and the absence of a continuous casting module in the specified specialized systems, a methodology for conducting a computational experiment from the standpoint of a quasi-stationary approximation is required. In this case, the billet drawing is considered stepwise as a sequence of events at fixed intervals of time. At each step, only the thermal problem is solved, considering the instantaneous displacement of the machine pallet by a given distance and the instantaneous filling of the crystallizer with melt to a fixed level. In the future, the obtained results will allow us to adequately select continuous casting equipment and more thoroughly prepare for a full-scale experiment.

Keywords: semi-continuous casting, solidification, aluminum alloy

For citation: Erdakov I.N., Karpinskii A.V., Vinnik D.A. Method of quasi-stationary modeling of the solidification zone of aluminum alloy in semi-continuous casting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2024;24(4):17–26. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240402

Уже более 70 лет слитки из алюминиевых сплавов получают методом непрерывного литья. Различают вертикальное литье [1–4], при котором направление вытягивания слитка и действие силы тяжести совпадают, и горизонтальное литье – сила тяжести перпендикулярна направлению вытягивания слитка из кристаллизатора. Разливка при горизонтальном литье может продолжаться непрерывно в течение нескольких сотен часов с разрезанием литого изделия на мерные заготовки [5–8]. В процессе вертикального литья машину останавливают по достижении заданной длины заготовки и извлекают изделие. При этом длина изделия определяется глубиной приямка литейной машины, а процесс литья осуществляется в полунепрерывном режиме [9].

Фазовый переход металла из жидкого состояния в твердое представляет собой сложный процесс, и доводку литейной технологии приходится проводить на реальных отливках, что связано с немалыми материальными и временными затратами. Сократить расходы на этапе опытного литья позволяют системы компьютерного моделирования литейных процессов.

Литейные процессы по своей сути мультифизические, и эта особенность требует искать решения связанных задач. В полунепрерывном литье к таким задачам относится определение фронта кристаллизации сплава при одновременном движении формирующейся заготовки в условиях непрерывного теплоотвода и поступлении очередных порций рас-

плава в кристаллизатор. Совместное осуществление таких сложных вычислительных моделей гидравлики и теплофизики требует внесения систем ограничений и допущений без искажения физики процесса. На практике уже хорошо себя зарекомендовали системы инженерного анализа, эффективно реализующие конечно-разностные или конечно-элементные методы решения дифференциальных уравнений. К таким системам относятся ProCAST, LVMFlow, PoligonSoft, MAGMASOFT и др. [10–14].

В связи с созданием технологии для новых материалов программы «Приоритет 2030» [6] и отсутствием модуля непрерывного литья в указанных специализированных системах необходима методика проведения вычислительного эксперимента с позиций квазистационарного приближения. При этом вытягивание заготовки рассматривать ступенчато в виде последовательности событий через фиксированные промежутки времени. На каждом шаге осуществлять решение только тепловой задачи, считая мгновенным смещение поддона машины на заданное расстояние и моментальным заполнение кристаллизатора расплавом до фиксированного уровня. В дальнейшем полученные результаты позволяют адекватно подобрать оборудование непрерывного литья и более тщательно подготовиться к натурному эксперименту.

В качестве цели данной работы была задача создания методики моделирования зоны затвердевания алюминиевого сплава в системе инженерного анализа при полунепрерывном литье и квазистационарном приближении.

В рамках предполагаемых исследований вычислительный эксперимент планируется в системе LVMFlow. За базовые параметры процесса полунепрерывного литья будут взяты данные работы [15], так как наилучшим образом подходят под вариант процесса производства поршней из алюминиевого сплава АК12Д ООО «ЧТЗ-Уралтрак» для перспективного тракторного двигателя серии Т4.

Схематично процесс непрерывного литья (ПНЛ) для производства алюминиевых слитков можно представить следующим образом. На начальном этапе металлический поддон частично заводится в водоохлаждаемый кристаллизатор, имеющий графитовую вставку в месте контакта с расплавом. Затем конструкцию из поддона и кристаллизатора постепенно заполняют металлическим расплавом, одновременно постепенно опуская поддон в литейную яму с водой. Процесс литья продолжают до тех пор, пока слиток не достигнет желаемой длины (рис. 1).

В процессе полунепрерывного литья теплообмен осуществляется в трех характерных участках машины: участок косвенного охлаждения, в котором образуется первая корка;

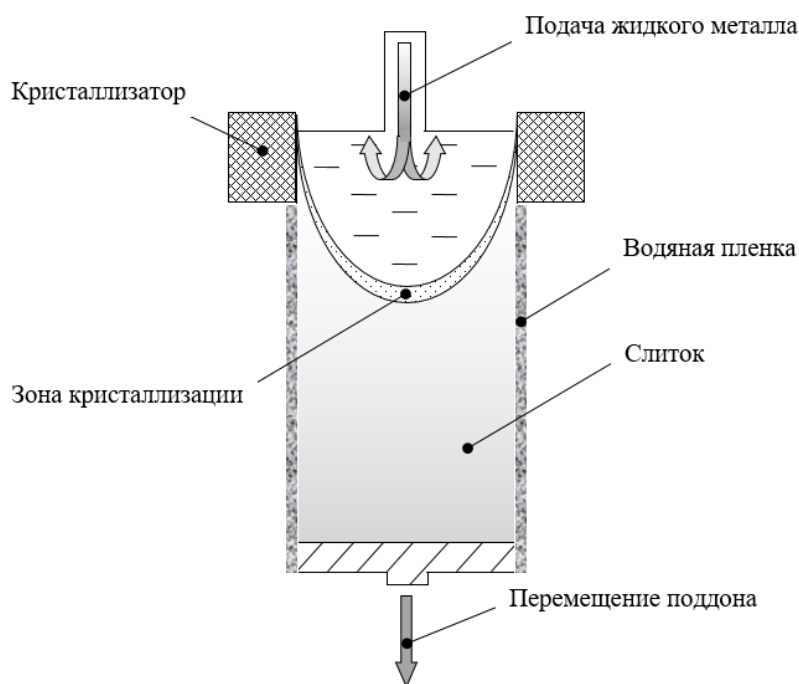


Рис. 1. Схема процесса полунепрерывного литья
Fig. 1. Semi-continuous casting process diagram

участок промежуточного охлаждения, в котором теплота не отводится через корку, и участок прямого охлаждения, в котором большая часть теплоты отводится путем сильного охлаждения водой.

Более 90 % тепла отводится в области вторичного охлаждения (рис. 2). Однако для хода литейного процесса важно образование

корки в области первичного охлаждения, так как она должна приобрести достаточную толщину для возможности отделения от стенки кристаллизатора вследствие усадки, что важно для конструкции литейной машины.

Учитывая характерные области охлаждения, выделим ключевые стадии процесса ПНЛ (рис. 3): I – стадия (начальная) связана с на-

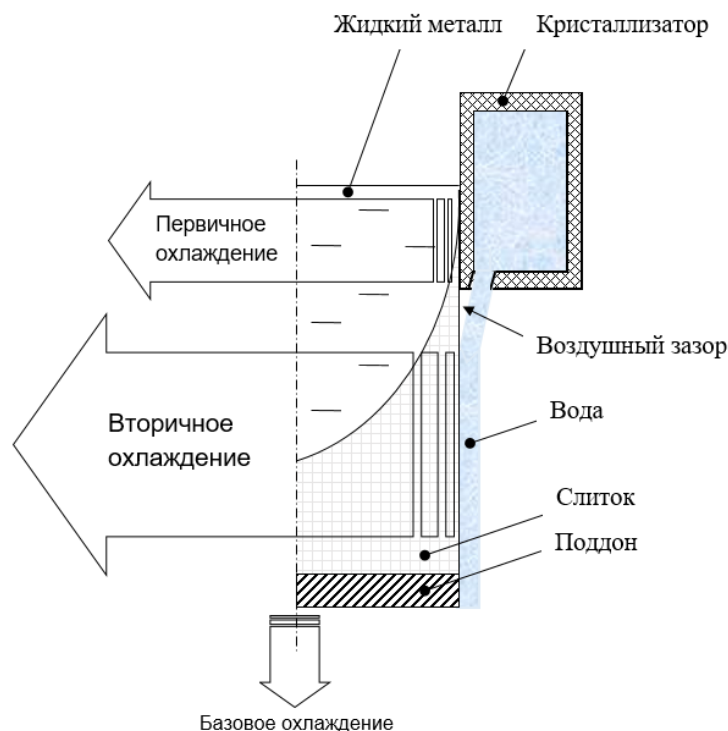


Рис. 2. Характерные области охлаждения в процессе полунепрерывного литья
Fig. 2 characteristic cooling zones in the semi-continuous casting process

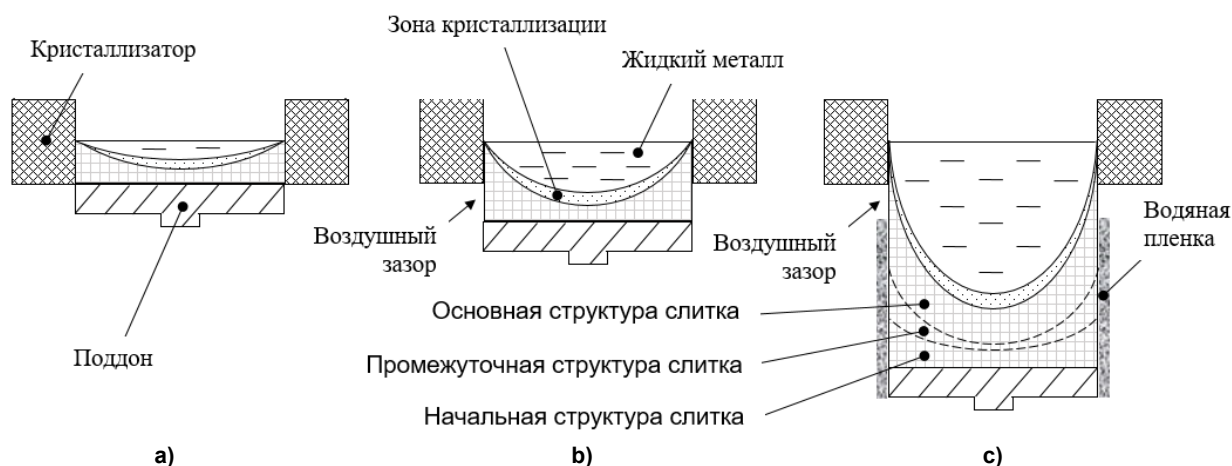


Рис. 3. Ключевые стадии нарастания твердой фазы сплава при полунепрерывном литье: а – I стадия начинается при базовом и первичном охлаждении сплава (формируется начальная структура слитка); б – II стадия начинается при добавлении воздушного зазора вокруг сплава (формируется промежуточная структура слитка); в – III стадия начинается при появлении области вторичного охлаждения сплава (формируется основная структура слитка)

Fig. 3. Key stages of solid phase growth in alloy during semi-continuous casting: a – Stage I begins with the base and primary cooling of the alloy (the initial structure of the ingot is formed); b – Stage II begins with the addition of an air gap around the alloy (the intermediate structure of the ingot is formed); c – Stage III begins with the appearance of a secondary cooling region of the alloy (the main structure of the ingot is formed)

личием только первичной зоны охлаждения сплава; II – стадия (промежуточная) связана с тем, что к первичной зоне охлаждения добавляется зона с воздушным зазором; III – стадия (основная) включает все зоны охлаждения: первичную, с воздушным зазором и вторичную.

Реальная и моделируемая зависимости скорости литья от времени показаны на рис. 4. На графике видно, что моделируемая зависимость отражает ступенчатое возрастание скорости литья в течение восьми итераций с вре-

менным интервалом по 60 с, за исключением первого шага, когда перемещение поддона не происходит и на протяжении 90 с идет образование первичной корки слитка.

Ступенчатое представление процесса непрерывного литья заготовки требует пересмотра на каждом шаге начальных условий модели, т. е. на каждой итерации необходимо будет заново перестраивать сборку из твердотельных объектов и заново определять начальные температуры отдельных частей сеточной модели.

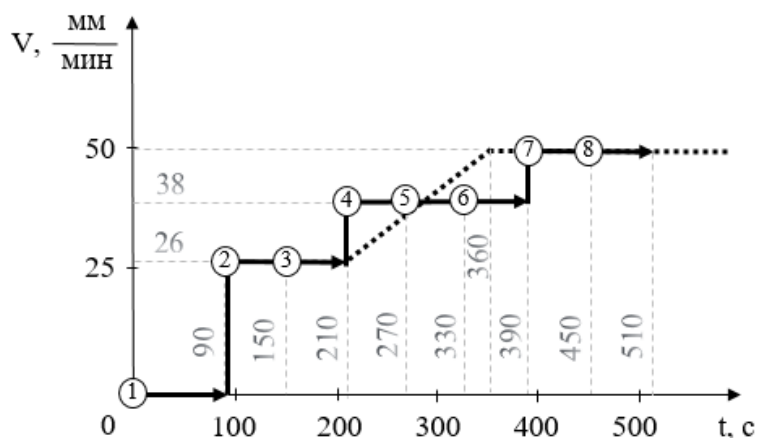


Рис. 4. Зависимость скорости литья от времени: реальный процесс – пунктирная линия; моделируемый процесс – сплошная линия (цифрами на графике обозначены итерации компьютерного моделирования)

Fig. 4. Dependence of casting speed on time: real process – dotted line; simulated process – solid line (the numbers on the graph indicate iterations of computer simulation)

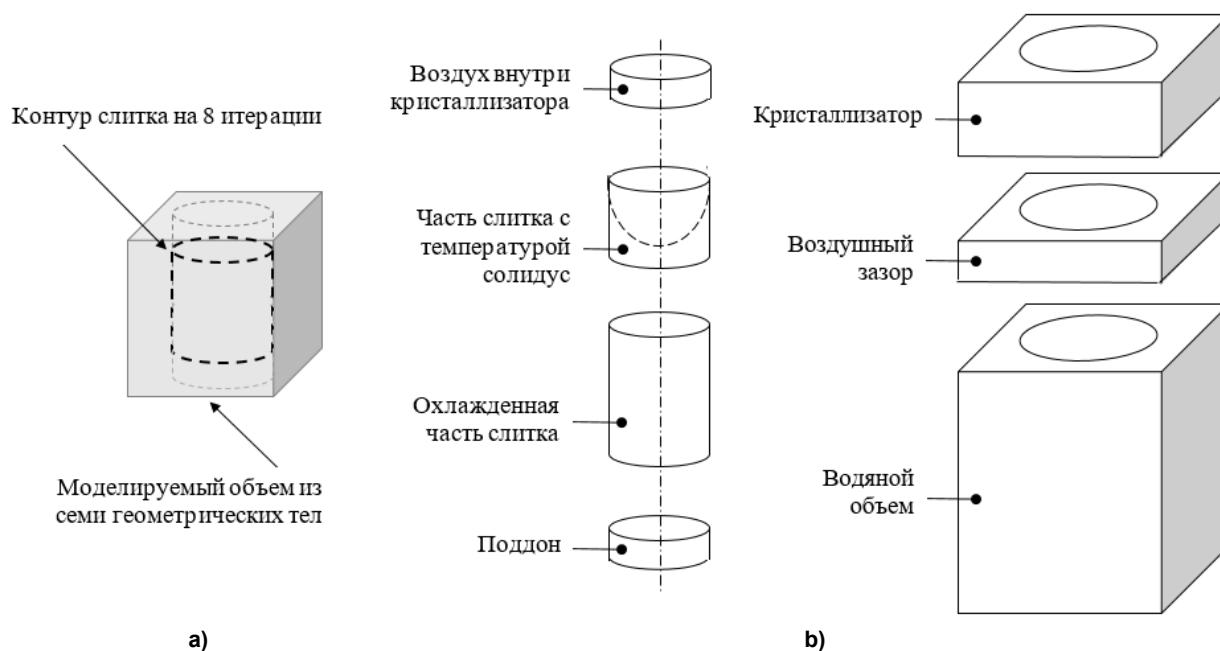


Рис. 5. Компоненты твердотельной модели: а – моделируемый объем $500 \times 500 \times 750$, контур слитка на 8-й итерации $\varnothing 300 \times 416$; б – семь твердотельных элементов сборки

Fig. 5. Solid model components: а – simulated volume $500 \times 500 \times 750$, ingot outline at iteration 8 $\varnothing 300 \times 416$; б – seven solid elements of the assembly

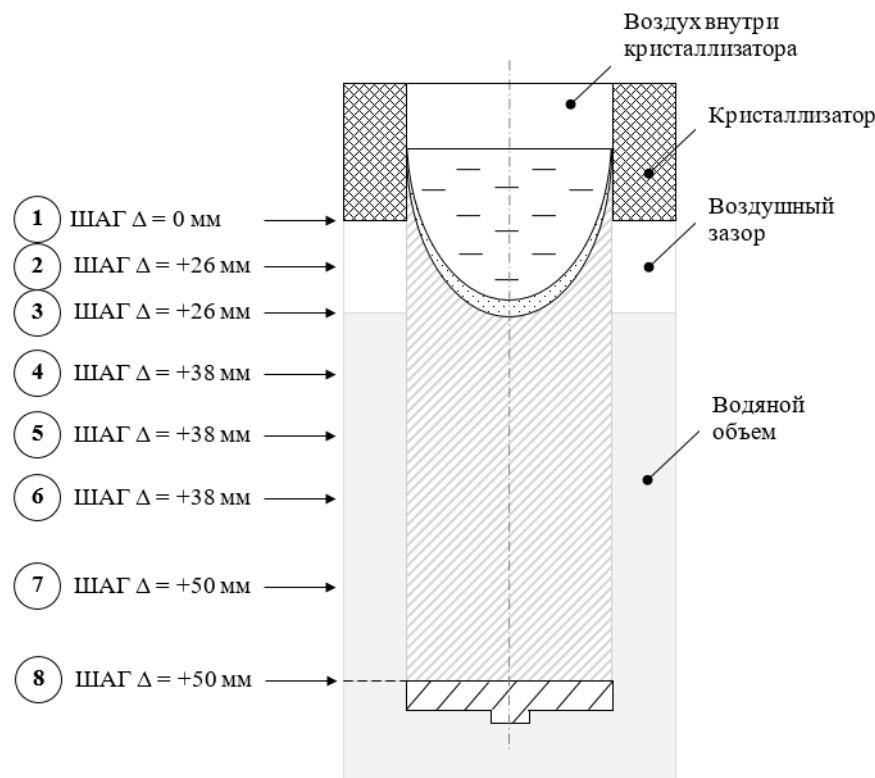


Рис. 6. Перемещение поверхности поддона на каждом шаге моделирования процесса затвердевания
Fig. 6. Movement of the pallet surface at each step of the solidification process simulation

В связи с вышесказанным моделируемый объём будет состоять из семи геометрических тел – воздуха внутри кристаллизатора, части слитка с температурой солидус, охлажденной части слитка, поддона, кристаллизатора, воздушного зазора и водяного объема. Сборка из геометрических тел будет представлена кубом с размерами $500 \times 500 \times 750$ мм, а контур слитка на 8-й итерации будет с иметь параметры $\varnothing 300 \times 416$ мм (рис. 5). В ходе вычислительного эксперимента корректировать придется линейные размеры только у частей слитка с температурой солидус и охлаждаемой сначала поддоном, а затем водой. Поддон при этом придется смещать на расстояние в соответствии с моделируемой зависимостью скорости литья от времени (рис. 6). В итоге геометрические размеры твердотельной сборки на 8-м шаге моделирования будут соответствовать значениям на рис. 7, а толщина затвердевшего слоя расплава на предыдущей итерации – λ будет определяться после решения тепловой задачи в LVMFlow.

Начальные температуры отдельных частей сеточной модели с каждой итерацией

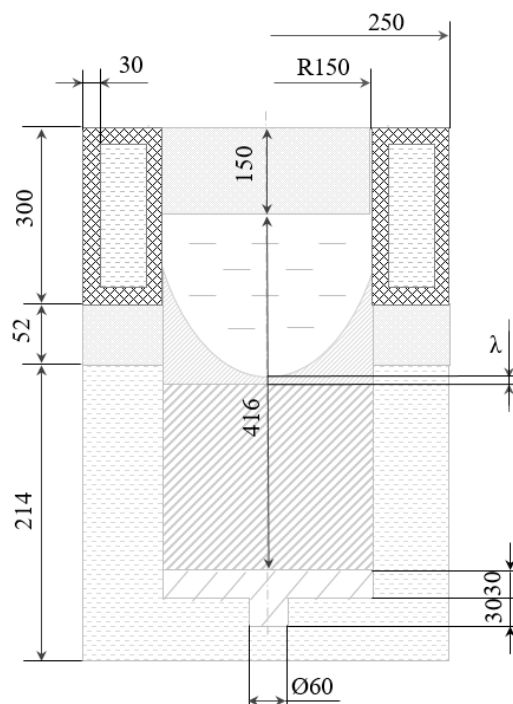


Рис. 7. Размеры твердотельной модели на 8-м шаге моделирования (λ – толщина затвердевшего слоя расплава на предыдущей итерации)
Fig. 7. Dimensions of the solid model at the 8th step of modeling (λ is the thickness of the solidified melt layer at the previous iteration)

будут возрастать у воздуха внутри кристаллизатора (T^{BK}), воздуха в зазоре (T^{B3}), медного поддона (T^{Π}) и охлажденной части слитка (T^*) (рис. 8). Остальные части модели будут иметь постоянную температуру: температура графитового кристаллизатора – $T_K = 40^\circ\text{C}$,

температура заливки расплава АК12Д – $T_3 = 660...680^\circ\text{C}$, температура солидус сплава АК12Д – $T_S = 574...576^\circ\text{C}$ и температура воды вторичного охлаждения – $T_B = 50^\circ\text{C}$. Обозначенные температуры показаны на рис. 9.

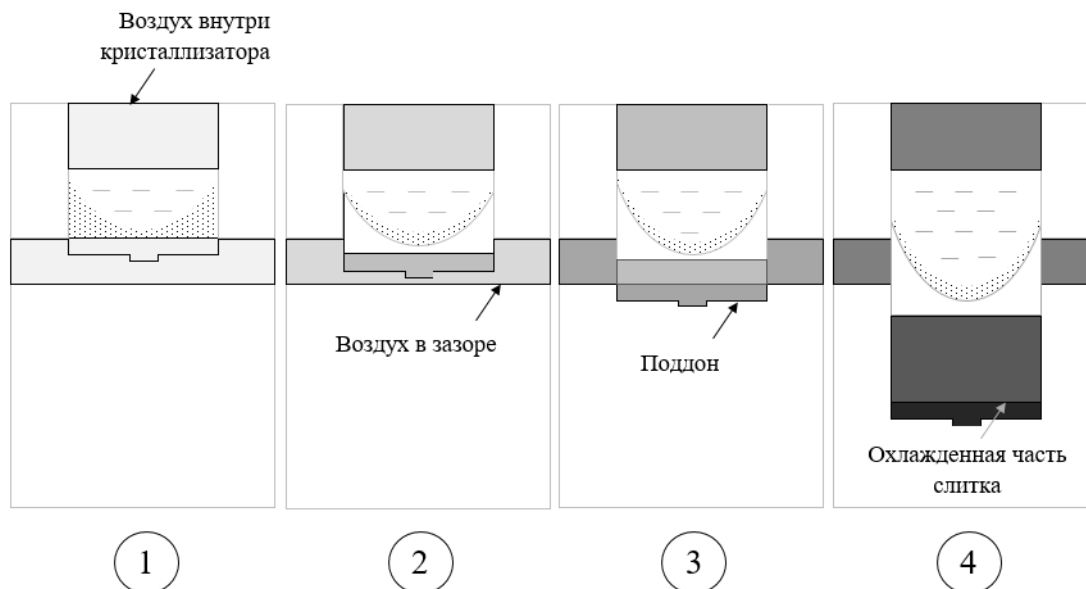


Рис. 8. Изменение начальной температуры элементов сеточной модели в процессе моделирования: температура возрастает от серого цвета к более темному; цифрами обозначены итерации моделирования
Fig. 8. Change in the initial temperature of the mesh model elements during the simulation: the temperature increases from gray to darker; the numbers indicate the simulation iterations

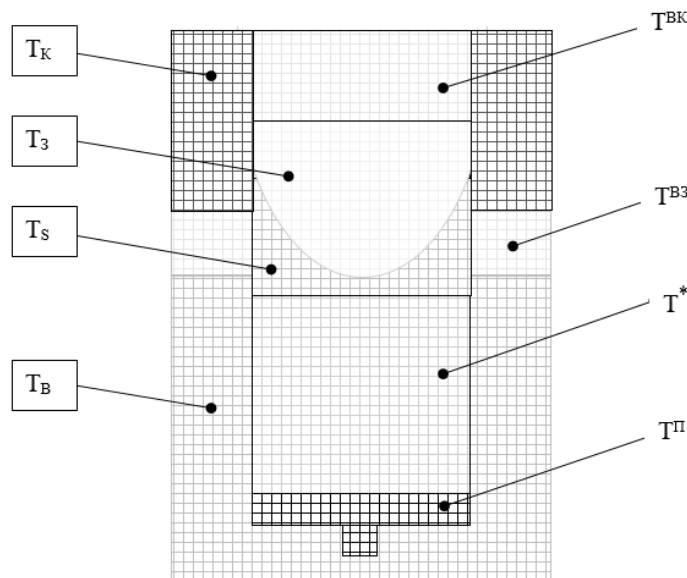


Рис. 9. Обозначение температур элементов сеточной модели: T_K – температура кристаллизатора; T_3 – температура заливки расплава; T_S – температура солидус сплава; T_B – температура воды вторичного охлаждения; T^{BK} – температура воздуха внутри кристаллизатора; T^{B3} – температура воздуха в зазоре; T^* – температура слитка в области вторичного охлаждения; T^{Π} – температура поддона (в рамке обозначены температуры, значения которых постоянны в начале каждой итерации моделирования)

Fig. 9. Designation of temperatures of the elements of the grid model: T_K is the crystallizer temperature; T_3 is the melt pouring temperature; T_S is the alloy solidus temperature; T_B is the secondary cooling water temperature; T^{BK} is the air temperature inside the crystallizer; T^{B3} is the air temperature in the gap; T^* is the ingot temperature in the secondary cooling area; T^{Π} is the pallet temperature (the temperatures in the frame are those whose values are constant at the beginning of each modeling iteration)

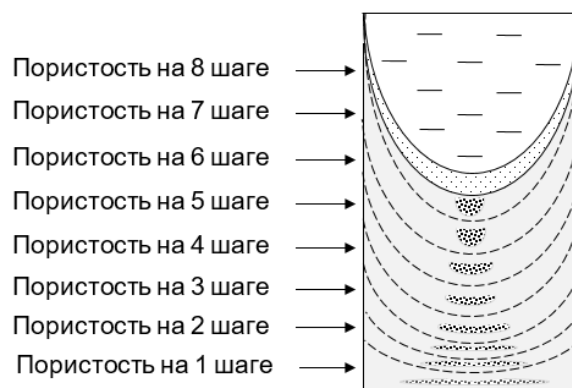


Рис. 10. Формирование структуры слитка в ходе пошагового моделирования процесса затвердевания сплава при полунепрерывном литье: 1-й шаг – начальная структура; 2-й–6-й шаги – промежуточная структура; 7-й и последующие шаги – основная структура

Fig. 10. Formation of the ingot structure during step-by-step modeling of the alloy solidification process during semi-continuous casting: step 1 – initial structure; steps 2–6 – intermediate structure; step 7 and subsequent steps – main structure

Поиск наилучшего (с минимальной пористостью сплава) соотношения температуры воды в кристаллизаторе и вторичного охлаждения целесообразно осуществлять после моделирования 3 вариантов с параметрами:

- $T_K = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_B = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $T_K = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_B = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $T_K = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_B = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На каждом шаге моделирования оцениваться будет скорость кристаллизации сплава, скорость охлаждения жидкой фазы силумина, λ и пористость слитка в зоне затвердевания. В итоге структура слитка будет складываться из струк-

тур 1 шага (начальная), 2–6 шагов (промежуточная), 7 и последующих шагов (основная), показана на рис. 10. Для полноты компьютерного анализа необходимо будет ещё добавить структуру заключительной итерации (конечная).

В заключение отметим, что предложенная методика моделирования зоны затвердевания материала в системе инженерного анализа LVMFlow при полунепрерывном литье и квазистационарном приближении позволяет исследовать качество литой заготовки путем варьирования теплофизическими параметрами сплава и режимом теплоотвода.

Список литературы

1. Керамика из волластонита для литейных установок металлургической промышленности / Д.В. Харитонов, Л.И. Горчакова, Д.О. Лемешев, Д.Ю. Жуков // Цветные металлы. 2021. № 10. С. 7–12.
2. Пат. RU 2697683 C1. Способ получения слитков из алюмоматричного композиционного сплава / Н.А. Белов, Т.К. Акопян, С.С. Мишуров. № 2018141263; заявл. 23.11.2018; опубл. 16.08.2019.
3. Пат. RU 2281183 C1. Кристаллизатор для вертикального литья слитков из алюминия и алюминиевых сплавов / Е.Г. Чувашов, С.В. Солдатов, Л.П. Грош и др. № 2004138904/02; заявл. 30.12.2004; опубл. 10.08.2006.
4. А.с. SU 1178315 A3. Способ вертикального непрерывного литья слитков и пластин из алюминия и его сплавов / Ив Кан, Ишар Гонда, Марк Таверньер. № 3560644; заявл. 04.03.1983; опубл. 07.09.1985.
5. Моделирование процесса деформации при получении алюминиевой полосы совмещенным методом литья и деформации металла / В.В. Черномас, С.Н. Химухин, С.Р. Саликов, А.В. Коновалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 3 (56). С. 5–11.
6. Черномас В.В. Исследование тепловых процессов, протекающих при изготовлении металлоизделий совмещенным методом литья и штамповки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 3 (52). С. 3–10.
7. Макаров Г.С. Непрерывное горизонтальное литье алюминиевых сплавов: статус и перспективы // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 11–20.

8. Пат. RU 2249493 C2. Машина для непрерывной горизонтальной разливки металла / И. Йохансен, Г. Меланн, О. Стремсвог. № 2002101724/02; заявл. 26.06.2000; опубл. 10.04.2005.
9. Избранные труды В.И. Добаткина. М.: ВИЛС, 2001. 668 с.
10. Erdakov I.N., Karpinskii A.V., Novokreshchenov V.V. Analysis of Pore Formation and Impeded Shrinkage of an Alloy in the System ProCast // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58, no. 3–4. С. 243–249. DOI: 10.1007/s11015-014-9896-0
11. Мартыненко С.В., Огородникова О.М. Компьютерное моделирование технологии изготовления отливки «рама боковая» с использованием программы LVMFLoW // *Литейное производство*. 2022. № 7. С. 23–28.
12. Тихомиров М.Д. Модели литейных процессов в САМ ЛП «Полигон» // *Литейные материалы, технология, оборудование: сб. тр. ЦНИИМ. СПб., 1995. Вып. 1. С. 21–26.*
13. Ваченко А.С., Жокин А.В. Математическое моделирование как инструмент технолога-литейщика. *Литейное производство*. 2015. № 3. С. 30–32.
14. Фундаментальные основы синтеза и эксплуатации перспективных материалов: отчет о НИР (полный) / Южно-Уральск. гос. ун-т; рук. М.А. Иванов. Челябинск, 2024. 832 с. № ГР 123101000104-7.
15. Будилов И.Н., Лукашук Ю.В., Лукашук С.Ю. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья // *Вестник УГАТУ*. 2001. Т. 15, № 1 (41). С. 87–94.

References

1. Kharitonov D.V., Gorchakova L.I., Lemeshev D.O., Zhukov D.Yu. [Wollastonite ceramics for foundries of the metallurgical industry]. *Tsvetnye metally*. 2021;(10):7–12. (In Russ.)
2. Belov N.A., Akopyan T.K., Mishurov S.S. Method for production of ingots from aluminum-matrix composite alloy. Patent RU 2697683 C1, 2019.
3. Chuvashov E.G., Soldatov S.V., Grosh L.P., Yesikov S.A., Yarygin L.A. Mold for vertical casting of ingots of aluminum and its alloys. Patent RU 2281183 C1, 2006.
4. Iv Kan, Rishar Gonda, Mark Taverner. Method of vertical continuous casting of ingots and plates from aluminium and its alloys. Author's certificate SU 1178315 A3, 1985.
5. Chernomas V.V., Himuhin S.N., Salikov S.R., Konovalov A.V. Modeling of the deformation process in obtaining an aluminum strip casting method and the combined deformation of the metal. *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2012;3(56):5–11. (In Russ.)
6. Chernomas V.V. Investigation of thermal processes occurring during manufacture of metal combined method casting and forging. *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2011;3(52):3–10. (In Russ.)
7. Makarov G.S. Continuous horizontal casting of aluminum alloys: status and prospects. *Technology of light alloys*. 2010;1:11–20. (In Russ.)
8. Johansen I., Meland G., Strømsvåg O. Machine for continuous horizontal casting of metal. Patent RU 2249493 C2, 2005.
9. *Izbrannyye trudy V.I. Dobatkina* [Selected works of V.I. Dobatkin]. Moscow: VILS; 2001. 668 p. (In Russ.)
10. Erdakov I.N., Karpinskii A.V., Novokreshchenov V.V. Analysis of Pore Formation and Impeded Shrinkage of an Alloy in the System ProCast. *Metallurgist*. 2014;58(3–4):243–249. DOI: 10.1007/s11015-014-9896-0
11. Martynenko S.V., Ogorodnikova O.M. Simulation and improvement of the “side frame” casting technology using LVMFLoW software. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*. 2022;(7):23–28. (In Russ.)
12. Tikhomirov M.D. [Models of casting processes in the CAM LP “Polygon”]. In: *Foundry materials, technology, equipment: Coll. t. TsNIIM*. St. Petersburg; 1995. Iss. 1. P. 21–26. (In Russ.)
13. Vachenko A.S., Zhokin A.V. [Mathematical modeling as a tool for a foundry technologist]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*. 2015;(3):30–32. (In Russ.)
14. *Fundamental'nye osnovy sinteza i ekspluatatsii perspektivnykh materialov: otchet o NIR (polnyy)* [Fundamental foundations of the synthesis and operation of promising materials: R&D report (full)]. South Ural state University; head. M.A. Ivanov. Chelyabinsk; 2024. 832 p. No. GR 123101000104-7. (In Russ.)
15. Budilov I.N., Lukashuk Y.V., Lukashuk S.Y. Modeling of formation of aluminum ingot in process of half a continue cast. *Vestnik UGATU*. 2001;15(1(41)):87–94. (In Russ.)

Информация об авторах

Ердаков Иван Николаевич, канд. техн. наук, доц. кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, заместитель директора Политехнического института, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; erdakovin@susu.ru.

Карпинский Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доц. кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; karpinskiav@susu.ru.

Винник Денис Александрович, д-р хим. наук, доц., заведующий кафедрой материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vinnikda@susu.ru.

Information about the authors

Ivan N. Erdakov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, Deputy Director of the Polytechnic Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; erdakovin@susu.ru.

Andrei V. Karpinskii, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Pyrometallurgical and Foundry Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; karpinskiav@susu.ru.

Denis A. Vinnik, Doc. Sci. (Chem.), Ass. Prof., Head of the Department of Materials Science, Physical and Chemical Properties of Materials, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vinnikda@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 03.09.2024

The article was submitted 03.09.2024