



УДК 669.019

DOI 10.17073/0368-0797-2026-2-176-182



Оригинальная статья

Original article

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ СЛИТКА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. С. Дуб, А. Н. Тохтамышев^{*}, А. Н. Мальгинов, И. А. Иванов,
Л. В. Ронков, М. А. Стрижов

АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (Россия, 115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4, 1А)

✉ ANTokhtamyshev@cniitmash.com

Аннотация. Наиболее критичными стадиями металлургического производства стальных изделий являются разливка и затвердевание стали, так как именно в процессе затвердевания формируется большая часть несовершенств будущих изделий. Еще большую значимость эти стадии приобретают при производстве изделий для тяжелого и энергетического машиностроения, подразумевающих разливку стали в слитки, в связи с высокими требованиями к надежности, долговечности и безопасности производимой продукции (ответственные изделия), а также со значительной массой заготовок, требующих отливки слитков массой в сотни тонн. Несмотря на значимость разливки и затвердевания стального слитка, к настоящему времени на последующие переделы (ковка, термическая обработка) поступает достаточно мало информации о передаваемой заготовке: усредненный химический состав стали, геометрические размеры слитка, его масса, температура, качество поверхности. При этом ряд несовершенств, способных привести к отбраковке будущего изделия (например, поры, превышающие критический размер), выявляются с помощью ультразвукового контроля лишь на финальных стадиях производства, по завершении длительных и трудозатратных операций термомеханической и термической обработки. Авторы описали принцип проведения моделирования основных видов неоднородностей стального слитка: физической (пористость), химической (ликвация) и структурной (расстояние между дендритными осями, размер зерна). При использовании специализированного программного обеспечения, например, ПО «Крупный слиток» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»), численная информация о данных видах неоднородностей может быть получена по всему сечению слитка. Такая топология распределения неоднородностей, посчитанная для конкретного слитка на основе фактических условий проведения технологического процесса, позволяет формировать так называемый технологический паспорт слитка, передаваемый вместе с самой заготовкой на следующие переделы. В работе представлен подход применения технологического паспорта слитка на последующих переделах, что реализует идею сквозного описания всего технологического процесса металлургического производства ответственных изделий. Такой подход позволяет повысить эффективность производства и снизить себестоимость производимой продукции.

Ключевые слова: стальной слиток, разливка, затвердевание, физическая неоднородность, химическая неоднородность, структурная неоднородность, технологический паспорт слитка, ковка, термическая обработка, сквозное моделирование

Для цитирования: Дуб В.С., Тохтамышев А.Н., Мальгинов А.Н., Иванов И.А., Ронков Л.В., Стрижов М.А. Технологический паспорт слитка как инструмент повышения качества стальных ответственных изделий. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2026;69(2):176–182.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-176-182>

* По материалам XVIII Международного Конгресса сталеплавильщиков (г. Санкт-Петербург).

INGOT TECHNOLOGICAL SUMMARY AS A TOOL FOR IMPROVING THE QUALITY OF CRITICAL STEEL PRODUCTS

V. S. Dub, A. N. Tokhtamyshev[✉], A. N. Mal'ginov,
I. A. Ivanov, L. V. Ronkov, M. A. Strizhov

State Research Centre of Russian Federation “Research and Production Association for Machine Building Technology”
(JSC “RPA “CNIITMASH”) (4-1A Sharikopodshipnikovskaya Str., Moscow 115088, Russian Federation)

✉ ANTokhtamyshev@cniitmash.com

Abstract. The most critical stages in the metallurgical production of steel products are casting and hardening of steel, since it is during the hardening process that most of the imperfections of future products are formed. These stages become even more important in the production of products for heavy and energy engineering, which involve casting steel into ingots, due to the high requirements for reliability, durability and safety of the manufactured products (critical products), as well as with a significant mass of billets requiring casting of ingots weighting hundreds of tons. Despite the importance of casting and hardening of a steel ingot, by now, relatively little information about the billet being transferred was received for subsequent alterations (forging, heat treatment): average chemical composition of the steel, geometric dimensions of the ingot, its mass, temperature, and surface quality. At the same time, a number of imperfections that can lead to the rejection of a future product (for example, pores exceeding a critical size) are detected using ultrasound control only at the final stages of production, after completion of long and labor-intensive operations of thermal deformation and thermal treatments. The authors described the principle of modeling the main types of inhomogeneities of a steel ingot: physical (porosity), chemical (dissolution) and structural (distance between the vertical axes, grain size). When using specialized software, for example, the Large Ingot software (JSC “RPA “CNIITMASH”), numerical information about these types of inhomogeneities can be obtained over the entire section of the ingot. This topology of the distribution of inhomogeneities, calculated for a specific ingot based on the actual conditions of the technological process, makes it possible to form the so-called technological summary of the ingot, which is transferred along with the billet itself to the following alterations. The paper presents an approach to applying the ingot technological summary in subsequent alterations, which implements the idea of an end-to-end description of the entire technological process of metallurgical production of critical products. This approach makes it possible to increase production efficiency and reduce the cost of manufactured products.

Keywords: steel ingot, casting, solidification, physical heterogeneity, chemical heterogeneity, structural heterogeneity, ingot technological summary, forging, heat treatment, end-to-end modeling

For citation: Dub V.S., Tokhtamyshev A.N., Mal'ginov A.N., Ivanov I.A., Ronkov L.V., Strizhov M.A. Ingot technological summary as a tool for improving the quality of critical steel products. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(2):176–182.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-176-182>

* Based on the Materials of the 18th International Congress of Steelmakers (Saint Petersburg).

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающееся повышение требований к качеству производимой металлургической продукции [1–4] является особенно значимым для ответственных отраслей промышленности, в том числе для тяжелого и энергетического машиностроения.

В случае металлургического машиностроения после получения жидкой стали требуемого химического состава и ее отливки в слиток на последующие переделы (ковка, термическая обработка) передается достаточно малое количество информации о заготовке: усредненный химический состав стали, геометрические размеры слитка, его масса, температура, качество поверхности. Однако основные несовершенства будущего изделия, определяющие его качество (такие как неоднородности структуры и химического состава, несплошности и др.), формируются именно на стадии разливки и затвердевания слитка [5–9].

Стоит отметить, что к настоящему времени накоплен значительный объем информации и методик, позволяющих описывать процессы затвердевания и зависящие от них различные типы неоднородностей, в том числе

изложенные в работах отечественных исследователей [9–15], исследователей из Европы [4; 16–18], Северной и Южной Америки [3; 5–8; 19; 20]. Однако для систематизированного применения подобной информации могут потребоваться квалифицированное вмешательство оператора, дополнительная теоретическая информация и достаточно длительное время на подготовку и проведение расчетов.

В связи с этим создание инструментов, позволяющих в промышленных условиях осуществлять контроль и сквозное прогнозирование параметров качества ответственных изделий на каждой стадии их производства, включая разливку и ковку стальных заготовок (в том числе с целью корректировки последующих стадий), является актуальной задачей для металлургии и машиностроения.

В настоящей работе рассмотрены вопросы прогнозирования параметров качества стального слитка по всему сечению в зависимости от фактической реализации технологии его производства (вопросы создания технологического паспорта слитка) и использования результатов прогноза на последующих переделах. Такой подход, основанный на оценке параметров качества

заготовки от одного передела к другому в процессе производства изделия, соответствует концепции сквозного моделирования, изложенной в работе [21].

Под параметрами качества стального слитка, а также изготавливаемых из них поковок, в настоящей работе подразумевается совокупность следующих показателей: степень химической (зональная ликвация), физической (пористость, усадочная раковина) и структурной (расстояние между дендритными осями, размер литого зерна) неоднородностей. Под качеством конечного изделия, получаемого после термической обработки, подразумевается совокупность его механических свойств, зависящих от вышеперечисленных показателей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СЛИТКА

Ниже представлен принцип проведения моделирования процессов затвердевания и формирования неоднородностей стального слитка. Предлагаемые зависимости иллюстрируют основные идеи, реализуемые в расчете, и при необходимости могут быть выражены другими уравнениями (как, например, далее рассматривается для структурной неоднородности).

Процесс затвердевания слитка зависит от теплофизических условий, основными параметрами которых являются три теплофизические величины (рис. 1) [14]:

- V – линейная скорость кристаллизации (ЛСК), м/с;
- G – градиент температуры, °С/см;
- ε – скорость охлаждения, °С/с.

При проведении расчетов делается допущение, что кристаллизующаяся сталь является идеальным изотропным материалом, в связи с чем независимыми являются две из перечисленных величин. Это позволяет упрощенно рассматривать скорость охлаждения как произведение градиента температуры и ЛСК: $\varepsilon = GV$ (рис. 1, б).

При осуществлении ускоренной оценки также может быть использовано отношение градиента температуры к ЛСК G/V (рис. 1, б), являющееся качественным показателем уровня накопления примесей перед фронтом затвердевания [15].

Ниже схематично описан принцип проведения моделирования для этапа разливки стали в слиток.

1. Решая задачу нестационарного теплообмена, определяется изменение положения изотерм T_S (температура солидуса), T_L (температура ликвидуса), $T_{3П}$ (температура зоны затрудненного питания) в различные моменты времени от начала разливки слитка до конца его затвердевания. При этом для каждого следующего шага расчета целесообразно учитывать изменения значений температур T_S , T_L и $T_{3П}$, вызванные обогащением жидкой части затвердевающего слитка примесями (см. пункт 3).

2. Зная динамику изменения положения изотерм T_S , T_L и $T_{3П}$, для выбранных точек слитка определяются значения V , G и ε . В случае проведения ускоренной

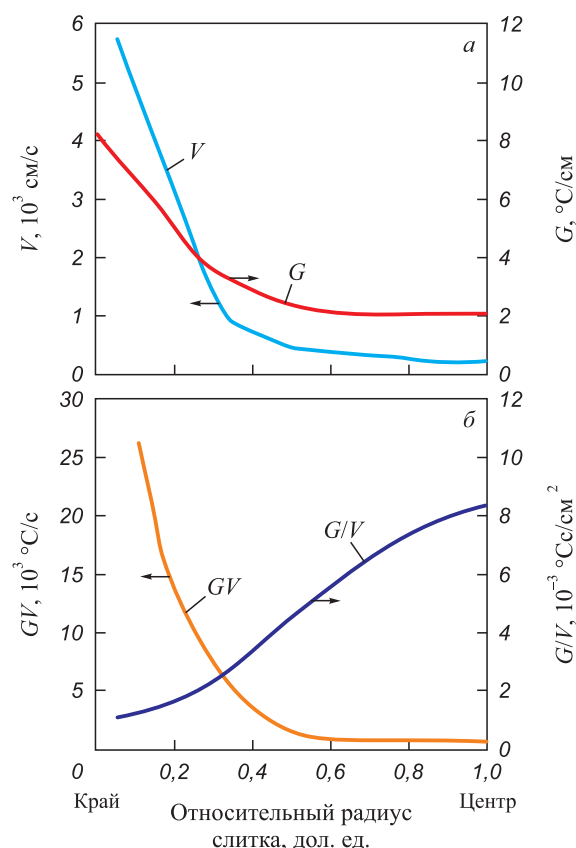


Рис. 1. Изменение значений ЛСК (а), градиента температуры (б) и соответствующих значений GV и G/V вдоль радиуса критического сечения слитка

Fig. 1. Changes in linear crystallization rate (a), temperature gradient (б), GV and G/V along the radius of the ingot critical section

оценки данные величины могут быть определены для определенных, заранее оговоренных точек, например, на краю слитка, на 1/2 среднего радиуса поперечного сечения слитка, на оси слитка.

3. Зная зависимость неравновесного коэффициента распределения от ЛСК $k_v = f(V)$, определяется содержание химических элементов по сечению затвердевшего слитка. Данная зависимость может быть описана, например, уравнением Азиза (1) (рис. 2) [5]:

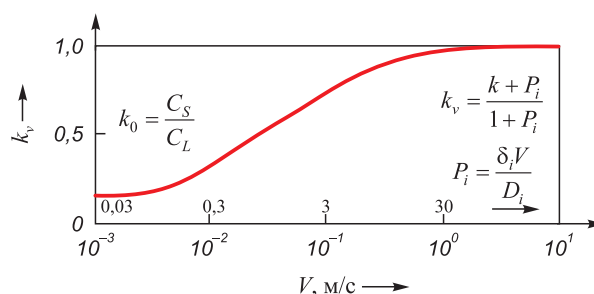


Рис. 2. Зависимость k_v элемента i от ЛСК по уравнению Азиза [5]

Fig. 2. Dependence of distribution coefficient k_v of impurity i on linear crystallization rate (LCR) according to the Aziz equation [5]

$$k_v = \frac{k + \frac{\delta_i V}{D_i}}{1 + \frac{\delta_i V}{D_i}}, \quad (1)$$

где $(\delta_i V/D_i) = P_i$ – число Пекле применительно к межфазной границе; δ_i – характерная толщина межфазной границы, м; V – линейная скорость затвердевания, м/с; D_i – коэффициент межфазной диффузии, м²/с; k – равновесный коэффициент распределения.

Таким образом, формируется информация о химической неоднородности слитка.

При необходимости могут быть использованы и другие уравнения, например, Бартон-Прима-Слихтера [20].

4. В зависимости от величины отношения протяженности жидко-твердой и твердо-жидкой зон $H_{L-3П}/H_{3П-S}$ по сечению слитка (рис. 3) можно определить зоны вероятности образования пористости: чем меньше это соотношение, тем больше вероятность образования пор [12]. На данном этапе формируется информация о физической неоднородности в слитке.

5. Зная величину $\varepsilon = GV$ при затвердевании и построив функцию, связывающую среднее расстояние между дендритными осями $\bar{\lambda}_{м.о.}$ со скоростью охлаждения ε , возможно определить распределение величины $\bar{\lambda}_{м.о.}$ по сечению слитка. Для конструкционных сталей величина $\bar{\lambda}_{м.о.}$ может быть вычислена по уравнению [15]:

$$\lg \bar{\lambda}_{м.о.} = -0,4023 \lg(\varepsilon) + 2,167. \quad (2)$$

Подобные уравнения для различных марок стали могут быть получены по результатам экспериментальных исследований [6; 7; 18]. Учитывая, что средний размер зерна $\bar{r}_{зер} = n \bar{\lambda}_{м.о.}$ (где n – коэффициент пропор-

циональности), можно описать распределение зеренной структуры в слитке, что представляет отдельный интерес для последующих этапов термомеханической и термической обработок.

Реализация предлагаемого принципа моделирования позволяет получать информацию о неоднородностях рассматриваемого слитка при фактической реализации технологии его отливки. При использовании специализированного программного обеспечения (ПО) информация о несовершенствах слитка может быть рассчитана не только для определенных точек, но и по всему сечению. Таким образом, вместе с самим слитком на участокковки передается подробная информация о распределениях физической, химической и структурной неоднородностей (топология распределения неоднородностей) по сечению будущей поковки.

Представленный принцип моделирования преимущественно реализован в ПО «Крупный слиток» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»). Примеры расчетов, выполненных с его использованием, представлены на рис. 4, где приведено сравнение физической, химической и структурной неоднородностей стального слитка, отлитого сверху (правая часть) и сифоном (левая часть).

Следует отметить, что благодаря осесимметричности слитка достаточным является решение двумерной задачи, то есть проведение моделирования по вертикальному сечению слитка. Это позволяет выполнять расчеты за короткое время и, как следствие, использовать данное ПО в качестве инструмента для сопровождения фактического производства каждого слитка. Здесь важно подчеркнуть, что подобные расчеты предполагается проводить непосредственно в промышленных условиях, что требует сравнительно высокой скорости проведения вычислений и оперирования преимущественно параметрами технологического процесса, учитываемыми на предприятии.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

СЛИТКА НА СЛЕДУЮЩИХ ПЕРЕДЕЛАХ

Как было отмечено ранее, результатом моделирования является топология распределения неоднородностей по сечению слитка, передаваемая вместе с фактически отлитым слитком на последующий термомеханический передел (ТДП). При этом целесообразно на стадии планирования производства проведение дополнительного предварительного расчета, осуществляемого в полном соответствии с нормативно-технической документацией и допускающего точное выполнение всех требований планируемой технологии (условно, идеальный ход процесса). Далее, при проведении основного расчета, учитывающего фактический ход реализации технологии, проводится сравнение основного и предварительного расчетов, с фиксацией отклонений от изначально прогнозируемых значений качества слитка. Совокупность информации

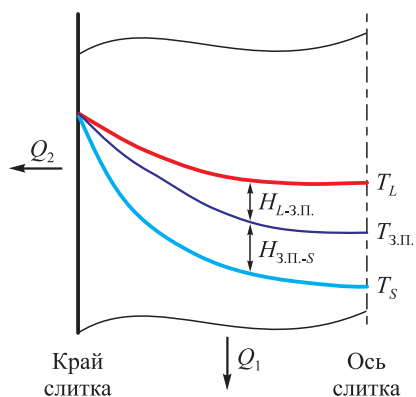


Рис. 3. Схематичное изображение протяженности жидко-твердой ($H_{L-3П}$) и твердо-жидкой ($H_{3П-S}$) зон в затвердевающем слитке (Q_1 и Q_2 – тепловые потоки)

Fig. 3. Schematic representation of the liquid-solid ($H_{L-3П}$) and solid-liquid ($H_{3П-S}$) zones in a solidifying ingot (Q_1 and Q_2 are the heat flows)

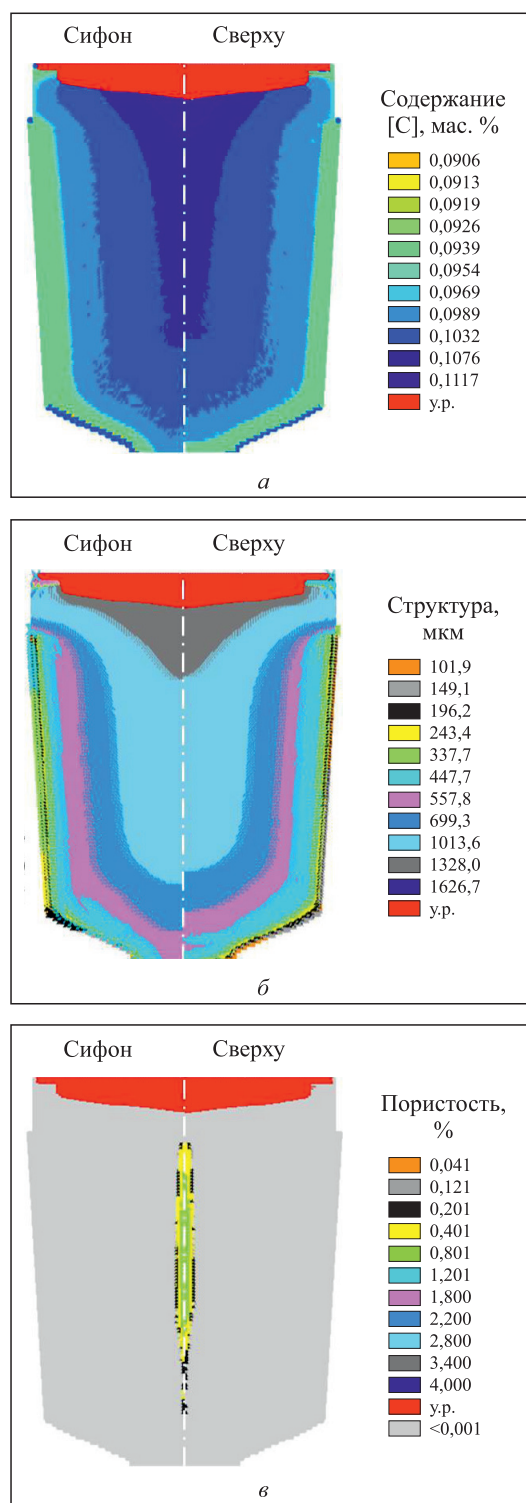


Рис. 4. Расчетные значения неоднородностей для слитка 8 т из нержавеющей марки стали при сифонной разливке (слева) в сравнении с разливкой сверху (справа):
 а – поля содержания [C], мас. %;
 б – структура (расстояние между дендритными осями), мкм;
 в – пористость, % (у.р. – усадочная раковина)

Fig. 4. Calculated values of inhomogeneities for an 8 ton stainless steel ingot during siphon-casting (on the left) in comparison with top-casting (on the right):
 а – content fields [C], wt. %;
 б – structure (distance between dendritic axes), μm;
 в – porosity, % (у.р. – shrink hole)

(и составляющей собственно технологический паспорт слитка) передается на последующие переделы.

Передаваемая информация может быть использована для оперативного осуществления оценки качества и, при необходимости, корректировки процесса ТДП, например, изменения места отрубки прибыльной и/или донной частей в целях отбора наиболее однородной по химии, плотности и/или структуре части слитка для последующей обработки; изменения степени деформации для конкретной области слитка с целью получения размера зерна, не превышающего заданного значения, и т. п.

Также информация о неоднородностях слитка может быть использована для заблаговременного диагностирования брака (например, высокий процент пористости в осевой части слитка), до проведения ковки, термической обработки и следующего за ними ультразвукового контроля (УЗК).

При наличии возможностей по осуществлению моделирования изменения параметров качества поковки уже непосредственно в процессе ТДП на последующий этап термической обработки вместе с заготовкой также передается информация о ее неоднородностях, сформированных по окончании ТДП. Подобное ПО, разрабатываемое АО «НПО «ЦНИИТМАШ» с использованием алгоритмов машинного обучения [22], позволяет проводить моделирование этапа ТДП за короткий срок для ряда конструкционных марок стали и различных масс заготовок. В результате еще до начала термической обработки термист обладает информацией о параметрах качества исходной поковки, в том числе о размере зерна, связанным с механическими свойствами будущего изделия [14]. Как следствие, данная информация может быть использована для оперативной корректировки процесса, например, для изменения времени выдержки при определенных температурах.

Реализация описанных подходов обеспечит сквозное моделирование качества фактически производимых изделий в промышленных условиях и, как следствие, снижение себестоимости производства в силу оперативного диагностирования брака и обоснованной корректировки технологии в зависимости от фактической реализации предыдущих этапов изготовления будущего изделия.

Выводы

Рассмотрен принцип оперативного моделирования параметров качества стального слитка (физической, химической и структурной неоднородностей) в условиях промышленного производства. Описанный принцип преимущественно реализован в ПО «Крупный слиток» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»). Совокупность расчетной информации по «идеальному» (соответствующему нормативно-технической документации) и фактическому (допускающему отклонения от

«идеального» варианта) ходу реализации процесса по всему сечению слитка составляет его технологический паспорт, который предполагается к передаче вместе с самим слитком на последующие переделы.

Описан подход использования технологического паспорта слитка как инструмента сквозной оценки и управления качеством на этапах разливки,ковки и термической обработки. Реализация данного подхода соответствует концепции сквозного моделирования технологического процесса и направлена на повышение качества стальных ответственных изделий и уменьшение себестоимости их изготовления благодаря учету особенностей каждой конкретной заготовки, обусловленных фактической реализацией технологии, с минимизацией возможных негативных последствий, вызванных отклонениями от «идеального» хода процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Дурынин В.А., Солнцев Ю.П. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения. Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ; 2006:272.
- Попова Л.Ф. Формирование системы менеджмента качества на основе процессного подхода в управлении промышленными предприятиями. *Вестник Пермского университета. Серия: «Экономика»*. 2017;12(3):453–466. <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2017-3-453-466>
Popova L.F. The elaboration of the quality management system based on the process approach in industrial enterprises administration. *Bulletin of Perm University. Series: "Economics"*. 2017;12(3):453–466. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2017-3-453-466>
- Vasconcellos da Costa e Silva A.L. Non-metallic inclusions in steels – origin and control. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018;7(3):283–299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.003>
- Greger M. Forging. Ostrava: VŠB – TU Ostrava; 2014:176.
- Курц У., Фишер Д. Фундаментальные основы затвердевания. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2013:300.
- Tiller A.W. The Science of Crystallization: Macroscopic Phenomena and Defect Generation. New York: Cambridge University Press; 1991:484.
- Флемингс М. Процессы затвердевания / Пер. с англ. В.Н. Вигдоровича, В.Г. Глебовского, П.П. Поздеева, Б.М. Рубинчика, Е.З. Спектора. Москва: МИР; 1977:423.
- Чалмерс Б. Физическое металловедение / Пер. с англ. В.А. Алексеева и В.К. Григоровича; под ред. А.К. Натансона. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии; 1963:457.
- Еланский Г.Н. Разливка и кристаллизация стали. Москва: МГВМИ; 2010:192.
- Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. Москва: Металлургия; 1976:552.
- Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача. *Литейное производство*. 1998;(4):30–34.
Tikhomirov M.D. Basics of casting process simulation. Thermal problem. *Foundry production*. 1998;(4):30–34. (In Russ.).
- Макаров И.И. Исследования влияния параметров прибыли на кинетику затвердевания стали и формирование усадочных дефектов в крупных слитках. Дис... канд. техн. наук. Москва; 1976:175.
- Добош Л.Ю., Феоктистов Н.А., Голод В.М. Системное моделирование литой микроструктуры стали 11013Л. В кн.: *Сборник тезисов X Всероссийской конференции «Кристаллизация, компьютерные модели, эксперимент, технологии (КРИС-2025)*. Ижевск: УдГУ; 2025:31–33.
- Дуб В.С., Косырев К.Л., Дуб А.В. и др. Состояние, перспективы и значение производства крупных слитков в России. В кн.: *Сборник трудов XIV Международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла*. Москва – Электросталь; 2016:65–73.
- Дуб В.С. Исследование внецентренной ликвации и разработка методов подавления ее развития в крупных слитках. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва; 1980:394.
- Крупный слиток / А.Н. Смирнов, С.Л. Макуров, В.М. Сафонов, А.Ю. Цупрун. Донецк: Вебер (Донецкое отделение); 2009:278.
- Стальной слиток. В 3 т. Т. 1. Управление кристаллической структурой / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова и др. Минск: Беларуская навука; 2000:583.
- Pickering E.J. Macroseggregation in steel ingots: The applicability of modelling and characterisation techniques. *ISIJ International*. 2013;53(6):935–949. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.935>
- Чалмерс Б. Теория затвердевания / Под ред. М.В. Приданцева; пер. с англ. В.А. Алексеева. Москва: Металлургия; 1968:288.
- Пфанн В. Зонная плавка / Пер. В.А. Алексеева. Москва: МИР; 1970:366.
- Иванов И.А., Мальгинов А.Н., Сафронов А.А. и др. Цифровая система контроля и управления процессом металлургического производства крупных стальных заготовок для машиностроительной отрасли. В кн.: *Сборник статей I Международной конференции «Чистая сталь: от руды до проката»*. Москва: Ассоциация сталеплавильщиков; 2020:269–275.
- Ронков Л.В., Мальгинов А.Н., Барболин А.Н., Иванов И.А., Дуб В.С., Тохтамышев А.Н., Стрижов М.А. Разработка методики упрощенного моделирования процесса термометаллургической обработки крупных слитков. *Металлург*. 2023;(11):149–158.
Ronkov L.V., Malginov A.N., Barbolin A.N., Ivanov I.A., Dub V.S., Tokhtamyshev A.N., Strizhov M.A. Development of a method for simplified modeling of the thermal deformation processing of large ingots. *Metallurg*. 2023;(11):149–158. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Владимир Семёнович Дуб, д.т.н., профессор, научный руководитель по металлургии и материаловедению, АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

ORCID: 0009-0006-7958-4169

E-mail: vsdub@cniitmash.com

Аллен Николаевич Тохтамышев, старший научный сотрудник лаборатории крупного слитка и деформационной обработки, АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

ORCID: 0009-0005-9360-8780

E-mail: antokhtamyshev@cniitmash.com

Антон Николаевич Мальгинов, заведующий лабораторией крупного слитка и деформационной обработки, АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

ORCID: 0009-0001-5797-1145

E-mail: anmalginov@cniitmash.com

Иван Алексеевич Иванов, к.ф.-м.н., заместитель генерального директора – директор Института металлургии и машиностроения, АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

ORCID: 0000-0001-9083-1059

E-mail: iaivanov@cniitmash.com

Леонид Владимирович Ронков, к.т.н., главный научный сотрудник лаборатории крупного слитка и деформационной обработки, АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

ORCID: 0009-0004-6250-3399

E-mail: lvronkov@cniitmash.com

Максим Андреевич Стрижов, научный сотрудник лаборатории крупного слитка и деформационной обработки, АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

ORCID: 0009-0008-2815-2483

E-mail: mastrizhov@cniitmash.com

Vladimir S. Dub, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Supervisor in Metallurgy and Materials Science, JSC “Central Research Institute for Machine Building”

ORCID: 0009-0006-7958-4169

E-mail: vsdub@cniitmash.com

Allen N. Tokhtamyshev, Senior Researcher of the Laboratory of Large Ingots and Deformation Processing, JSC “Central Research Institute for Machine Building”

ORCID: 0009-0005-9360-8780

E-mail: antokhtamyshev@cniitmash.com

Anton N. Mal'ginov, Head of the Laboratory of Large Ingots and Deformation Processing, JSC “Central Research Institute for Machine Building”

ORCID: 0009-0001-5797-1145

E-mail: anmalginov@cniitmash.com

Ivan A. Ivanov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Deputy General Director – Director of the Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering, JSC “Central Research Institute for Machine Building”

ORCID: 0000-0001-9083-1059

E-mail: iaivanov@cniitmash.com

Leonid V. Ronkov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Large Ingots and Deformation Processing, JSC “Central Research Institute for Machine Building”

ORCID: 0009-0004-6250-3399

E-mail: lvronkov@cniitmash.com

Maksim A. Strizhov, Research Associate of the Laboratory of Large Ingots and Deformation Processing, JSC “Central Research Institute for Machine Building”

ORCID: 0009-0008-2815-2483

E-mail: mastrizhov@cniitmash.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

В. С. Дуб – постановка задачи, описание используемых принципов и подходов.

А. Н. Тохтамышев – проведение расчетов, анализ результатов исследований, формулирование выводов, описание используемых принципов и подходов.

А. Н. Мальгинов – анализ результатов моделирования, в том числе по разливке стали сверху и сифоном; тестирование ПО «Крупный слиток»

И. А. Иванов – участие в разработке ПО «Крупный слиток», верификация программного обеспечения, анализ результатов.

Л. В. Ронков – участие в разработке ПО «Крупный слиток», верификация программного обеспечения, анализ результатов.

М. А. Стрижов – проведение расчетов в ПО «Крупный слиток», анализ результатов моделирования.

V.S. Dub – problem formulation, description of the principles and approaches employed.

A. N. Tokhtamyshev – participation in computational work, analysis of results, formulation of conclusions, description of the principles and approaches employed.

A. N. Mal'ginov – analysis of modeling results including top- and siphon-casting of steel, testing the Large Ingot software.

I. A. Ivanov – participation in development of the Large Ingot software, software verification, analysis of results.

L. V. Ronkov – participation in development of the Large Ingot software, software verification, analysis of results.

M. A. Strizhov – performing simulations using the Large Ingot software, analysis of modeling results.

Поступила в редакцию 11.12.2025

После доработки 25.12.2025

Принята к публикации 12.01.2026

Received 11.12.2025

Revised 25.12.2025

Accepted 12.01.2026