

УДК [621.746:66914]:004.9

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-86-92

Л. В. Палаткина, Ю. В. Гребнев, Д. Ю. Гребнев, С. В. Палаткин

**ПОЛУЧЕНИЕ ЛИТЫХ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ КУЗНЕЧНОГО ПЕРЕДЕЛА
В УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: lv.palatkina@yandex.ru

Представлены результаты по разработке (для условий машиностроительного предприятия) основных технологических решений по получению стальных слитков круглого сечения массой 500 кг для кузнечного передела. Разработаны 3D-модели технологической оснастки и слитков круглого сечения для заливки в многобразовую металлическую и одноразовую песчаную формы. В программном комплексе LVMFlow (на примере стали 45) выполнено компьютерное моделирование разлива и затвердевания модельных слитков. Проведена промышленная апробация полученных результатов компьютерного моделирования: из стали 45 отлиты слитки круглого сечения, из которых изготовлены и отгружены заказчикам поковки типа «фланец».

Ключевые слова: сталь, слиток круглого сечения массой 500 кг, компьютерное моделирование

© Палаткина Л. В., Гребнев Ю. В., Гребнев Д. Ю., Палаткин С. В., 2024.

L. V. Palatkina, Yu. V. Grebnev, D. Yu. Grebnev, S. V. Palatkin

**PRODUCTION OF CAST STEEL BLANKS FOR FORGING
IN THE CONDITIONS OF A MACHINEBUILDING ENTERPRISE**

Volgograd State Technical University

The results of the development (for the conditions of a machine-building enterprise) of the main technological solutions for the production of round steel ingots weighing 500 kg for forging are presented. 3D models of technological equipment and ingots of circular cross-section have been developed for pouring into reusable metal and disposable sand molds. In the LVMFlow software package (using the example of steel 45), computer modeling of casting and solidification of model ingots was performed. Industrial approbation of the obtained results of computer modeling was carried out: round-section ingots were cast from 45 steel, from which forgings of the "flange" type were made and shipped to customers.

Keywords: steel, 500 kg round section ingot, computer simulation

Стальные поковки и горячие штамповки в машиностроении изготавливаются из проката различного сортамента и химического состава [1]. В случае получения крупногабаритных, ответственных и уникальных изделий (роторы, судовые валы, оси ветряных турбин и т. д.) изготовление поковок осуществляется непосредственно из кузнечных слитков различных размеров и веса. Также следует отметить, что несмотря на разливку порядка 96 % мирового объема выплавляемой стали на машинах непрерывного литья заготовок, исследования направление на повышение качества стальных слитков по-прежнему актуальны [2; 3], при этом интенсивно ищутся пути их наиболее экономичного изготовления.

На сегодняшний день машиностроительные предприятия, работающие в сегменте серийного и мелкосерийного производств, сталкиваются с отсутствием сортамента проката (необходимого по химическому составу и уровню механических свойств). Кроме этого, использование проката может быть экономически нецелесообразным, так, например, при горячей штамповке для получения осевых отверстий необходимы дополнительные операции – высокотемпературный нагрев для последующей осадки и прошивки. Также производители проката зачастую выдвигают требования к машиностроителям на покупку крупной партии металла соответствующей производительности их металлургических печей.

В условиях машиностроительного предприятия решение задач, по снижению затрат на производство поковок и зависимости от поставщиков металла, возможно при получении литых заготовок под обработку металлов давлением от собственного литейного производства. При этом работы, посвященные данной тематике, практически отсутствуют.

Известно, что наиболее доступный способ получения литой заготовки – это литье в одноразовую песчаную форму. Следует учитывать, что при одинаковом уровне механизации лучшие технико-экономические показатели и основная экономия в 5–15 % на одну тонну литья, достигается при литье в многоразовую металлическую форму за счет уменьшения расходов на изготовление форм и формовочные материалы.

Цель данной работы – изучение на основе компьютерного моделирования (с последующей промышленной апробацией) качества литых стальных заготовок для кузнечного передела массой 500 кг залитых в многоразовую металлическую и одноразовую песчаную формы. Что представляет несомненный интерес для практики и теории затвердевания не только слитков малого развеса, но и крупных кузнечных слитков, для которых использование экспериментального метода анализа дефектов литья на модельных слитках массой 500 кг (отлитых в песчаные формы) в последнее время интенсивно развивается [4–6].

Общая методика работы предусматривала проведение трех основных этапов исследования:

1. Разработка чертежа слитка круглого сечения массой 500 кг и технологической оснастки для заливки в многоразовую металлическую и одноразовую песчаную формы.

2. Построение 3D-модели форм с последующим компьютерным моделированием заливки и затвердевания.

3. Проведение промышленной апробации полученных результатов компьютерного моделирования.

На первом этапе был проведен анализ возможностей литейного производства одного из предприятий нефтехимического машиностроения Волгоградского региона (табл. 1), на котором в дальнейшем был реализован третий этап работы.

Таблица 1

**Ключевое оборудование литейного производства машиностроительного предприятия,
необходимое для получения литых заготовок**

Оборудование	Наличие ключевого оборудования для получения слитков
Плавильный агрегат	Индукционная тигельная печь УИП-400 (чугунолитейный цех). Дуговая сталеплавильная ДСП-5 (сталелитейный цех).
Контроль химического состава на этапе выплавки	В условиях сталелитейного цеха (экспресс лаборатория).
Разливочное устройство	Разливочный стопорный ковш на 5 тонн расплава (диаметр разливочного стакана 80 мм).
Исходные материалы для выплавки Fe-C сплавов	Основная металлическая шихта (лом стальной, возврат собственного производства). Легирующие добавки (ферросплавы, чистые металлы). Карбюризаторы (электродный бой, кокс). Шлакообразующие (флюсовый известняк, шамот, плавиковый шпат). Раскислители, модификаторы (силикокальций, силикомарганец, алюминий, ниобий). Эзотермический порошок для нанесения на зеркало металла после заполнения форм. Антипригарные покрытия форм.
Контроль микроструктуры, механических и специальных свойств	В условиях цеха контрольных испытаний (лаборатория механических испытаний, металлографическая и химическая лаборатории).

Также была проведена оценка возможности выплавки слитков различного марочного состава. Так в чугунолитейном цехе в индукционной печи возможно получать металл для неотвешенных поковок (что обусловлено главным недостатком индукционной печи – отсутствием возможности проведения процесса рафинирования), кроме этого, в условиях рассматриваемого цеха имелись организационные трудности по проведению экспресс-анализа химического состава металла по ходу плавки. При этом возможности сталелитейного цеха и дуговой печи с основной футеровкой позволяют получить качественные стальные слитки любой степени легирования.

По итогам первого этапа был разработан чертеж слитка массой 500 кг круглого сечения высотой 1100 мм и диаметром прибыльной части 330 мм, а также чертежи многофазовой металлической формы (чугунной изложницы) и модельного комплекта для однократной песчаной формы (три литые тонкостенные опоки с модельной плитой).

На втором этапе исследований для спроектированной по размерам чертежей в программном комплексе Solid Works 3D-модели слитка круглого сечения с оснасткой, в расчетной среде LVMFlow (версия 6.50 релиз 3, лицензия 2029) создавалась задача для моделирования, на основе следующих исходных данных:

1. Точность моделирования определялась параметрами сеточной модели путем задания

размера расчетной ячейки 5 мм, а толщина, размер бокса и граничные условия подбирались автоматически программным комплексом LVMFlow.

2. Задавались начальные условия выбора материала формы (с учетом, что на внутреннюю полость необходимо нанести противогригарное покрытие на основе цинка толщиной 2 мм, а сама форма предварительно прогревается до 200 °C):

- многофазовая металлическая форма (рис. 1, а) – изложница из чугуна марки СЧ-10;
- однократная песчаная форма (рис. 1, б) – керамический огнеупорный кирпич и песчаная смесь на основе кварцевого песка (стальные опоки и модельная плита при моделировании отображались в программном комплексе LVMFlow как единое целое).

3. Моделировалась разливка стали 45 (химический состав, соответствует требованиям ГОСТ 1050–2013) из стопорного ковша с диаметром отверстия 80 мм, после окончания заливки моделировалась засыпка на зеркало металла экзотермической смеси массой 5 кг.

4. При задании температуры расплава руководствовались документами штатной технологии литейного цеха и полагали, что она при заполнении формы соответствует температуре выпуска, стали из плавильного агрегата (1640 °C).

5. При моделировании в программном комплексе LVMFlow визуализация процесса на-

полнения форм и последующего затвердевания литой заготовки в режиме 3D позволила:

- оценить вероятность образования поверхностных дефектов на литых заготовках, так как состояние поверхности является одним из основных критериев качества отливаемых сверху кузнечных слитков [7–9]. В соответствии с методикой оценки процесса разбрызгивания при компьютерном моделировании, представленной в работе [10] степень брызгообразования, оценивали как максимальную высоту подъема жидкого металла от дна формы в начальный период заливки;

- проанализировать движение потоков жидкой стали при заполнении формы расплавом, а также возникновение конвективных потоков и продолжительность их циркуляции;

- исследовать физическую неоднородность металла (характер образования усадочных раковин и пористости).

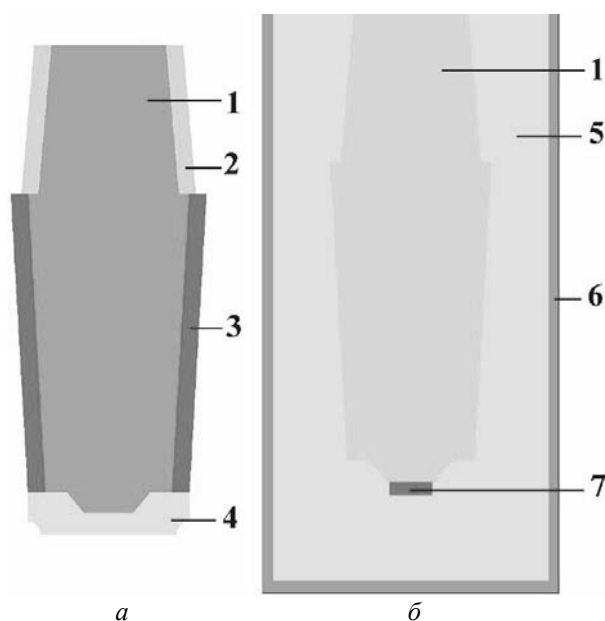


Рис. 1. Схематическое представление форм для моделирования после импортирования 3D-модели в среду программного комплекса LVMFlow:
 а – многоразовая металлическая форма (чугунная изложница);
 б – одноразовая песчаная форма; 1 – тело слитка; 2 – прибыльная надставка; 3 – изложница, формирующая «тело» слитка; 4 – поддон; 5 – песчаная смесь; 6 – металлические опоки и модельная плита; 7 – керамический огнеупорный кирпич

Для реализации третьего этапа исследования были изготовлены (отлиты) чугунные изложницы, состоящие из поддона, основной изложницы образующей «тело» слитка и изложницы, выполняющей прибыльную часть, а также подготовлен модельный комплект для одноразовой песчаной формы. Выбивка, очист-

ка, термообработка слитков, а также изготовление поковок из литых заготовок производилась в соответствии с действующими технологическими инструкциями. В ходе работ было выполнено пять плавов с полным контролем технологических характеристик и отлиты кузнечные слитки, из которых изготовлены изделия ответственного назначения типа «фланец» которые отгружены заказчиком.

Сравнительный анализ продольных осевых сечений заполнения расплавом многоразовой (рис. 2) и одноразовой формы не показал принципиальных различий, что обусловлено одинаковой геометрией внутренней полости и идентичными условиями разливки. Окончание разливки фиксировали при 8,5 с.

В момент открытия шиберного затвора сталеразливочного ковша скорость струи расплава соответствует 1,5–2,0 м/с (рис. 3, а) и интенсивно увеличивается до 5,5 м/с при приближении ко дну формы. Следует отметить, что использование диаметра разливочного стакана 80 мм соответствует массовому расходу расплава 106 кг/с.

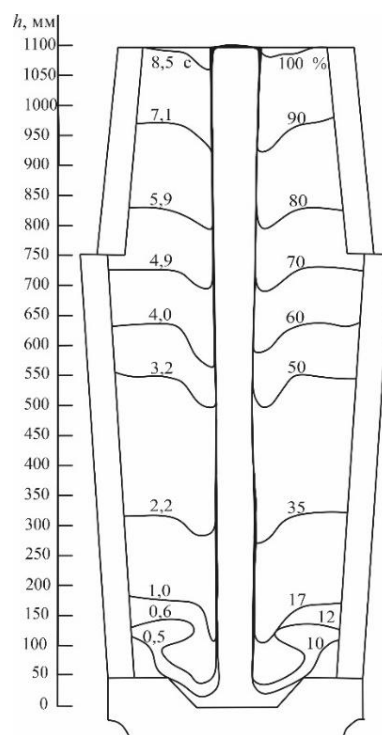


Рис. 2. Кривые изменения фронта потока расплава при заполнении чугунной изложницы:
 h, мм – высота полости формы; цифры у кривых – объем расплава в полости формы (V, %) в различные моменты времени заливки (τ, с)

При ударе струи расплава о дно формы наблюдается ее торможение до 2,0 м/с и после-

дующее формирование заплесков в виде набегающей на стенки формы волны (высотой порядка $1/4$ высоты формы ≈ 165 мм). После чего расплав растекается во все стороны (рис. 3, б 0,3 с от начала заполнения формы) с образованием «подушки» жидкого металла. Визуализация процесса наполнения формы показывает, что струя расплава, глубоко проникая в объем металла формы сохраняет скорость потока (рис. 3, б: 0,7 и 1,8 с от начала заполнения формы) и только при заполнении порядка 50 % объема наблюдается ее снижение до момента практически полного торможения на этапе завершения заполнения форм (фиксируется скорость менее 1,0 м/с). Также на протяжении всего этапа заполнения отсутствует равномерная

горизонтальная плоскость на зеркале металла (рис. 2), а интенсивная циркуляция потоков, возникающая на начальных этапах заполнения форм, сохраняется до момента их полного заполнения (рис. 3, г, д) и в последствии затухает.

Существенных отличий в длительность существования конвективных потоков зафиксировано не было:

- первые конвективные потоки в чугунной изложнице зафиксированы на 10 минуте от начала разливки и продолжались еще течение 114 минут;

- в песчаной форме первые конвективные потоки сформировались к 21 минуте после окончания заполнения формы и просуществовали еще 159 минут.

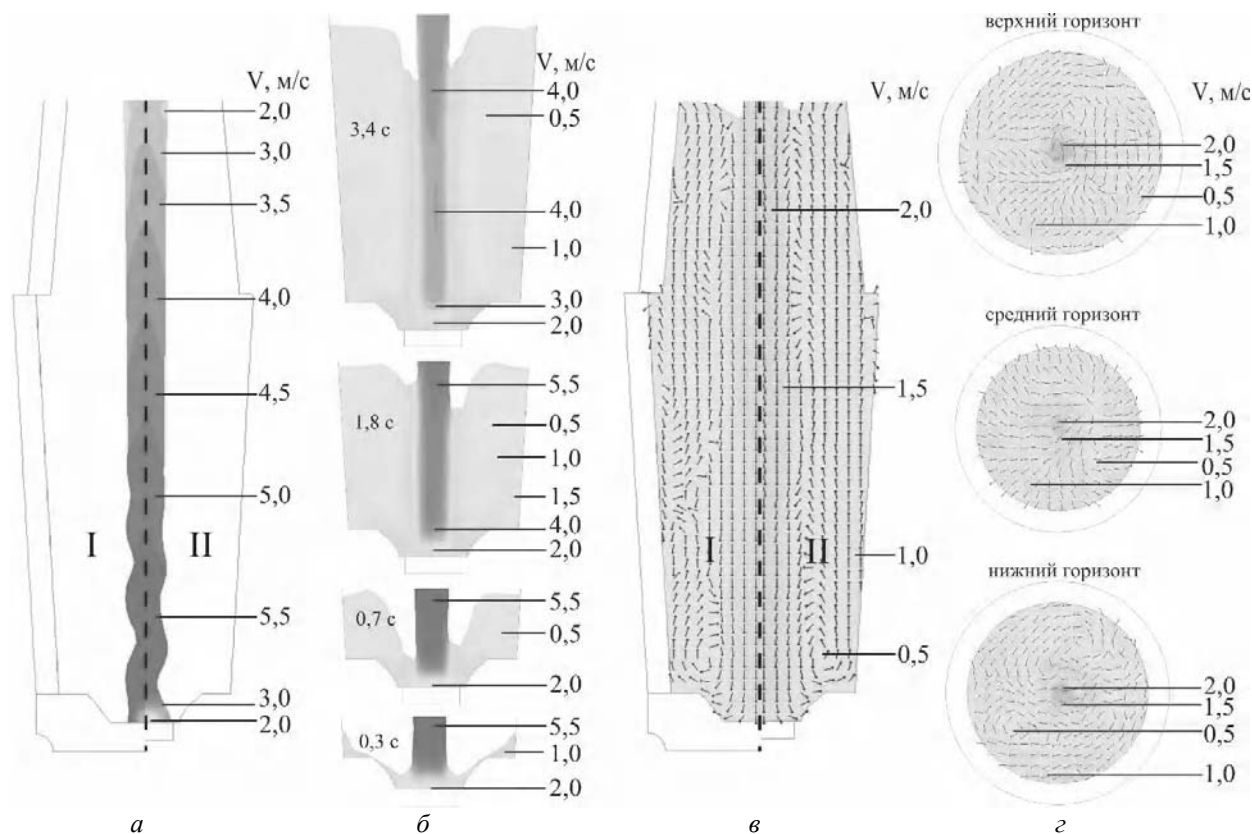


Рис. 3. Изменение скорости потока (V , м/с) при поступлении первых порций расплава в форму (I – чугунная изложница; II – одноразовая песчаная форма), на этапе начала и окончания разливки (τ , с):
 а, б – торможение расплава в момент удара струи о дно формы с образованием заплесков и формированием завихрений расплава;
 в, г – образование и интенсивная циркуляция потоков в объемах расплава между стенками формы и периферийной зоной струи расплава на момент окончания заполнения формы расплавом; б и г – одноразовая песчаная форма

Характер изменения объема твердой фазы для многоразовой и одноразовой формы практически одинаков (рис. 4), однако из-за низкой температуропроводности песчаной формовочной смеси время затвердевания слитка в песчаной форме увеличено.

Сравнительная оценки физической неоднородности в режиме LVMFlow «усадка» показывает, что максимальная пористость наблюдается в центральных осевых зонах, при этом максимальные значения (рис. 5) наблюдаются в слитке, залитом в чугунную изложницу.

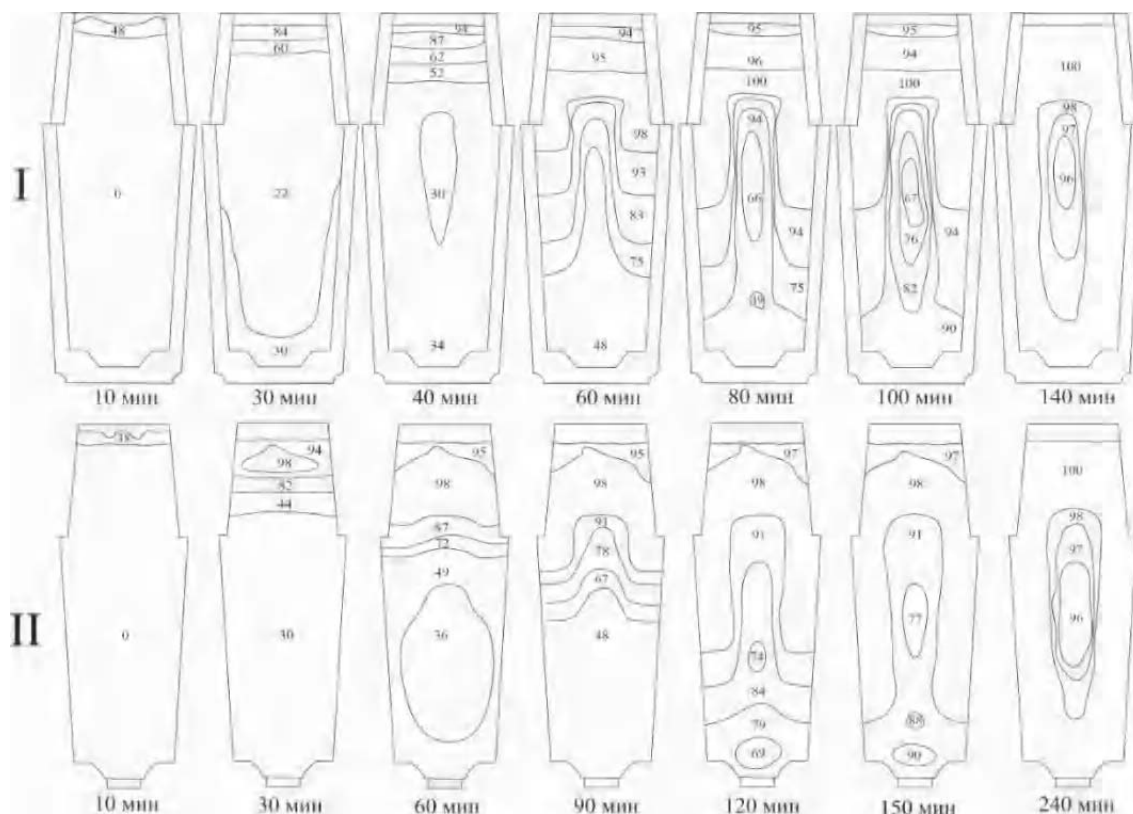


Рис. 4. Изменение объема твердой фазы при затвердевании (процент твердой фазы для каждой из границ изолиний) в различные моменты времени после окончания заливки:
I – чугунная изложница; II – одноразовая песчаная форма

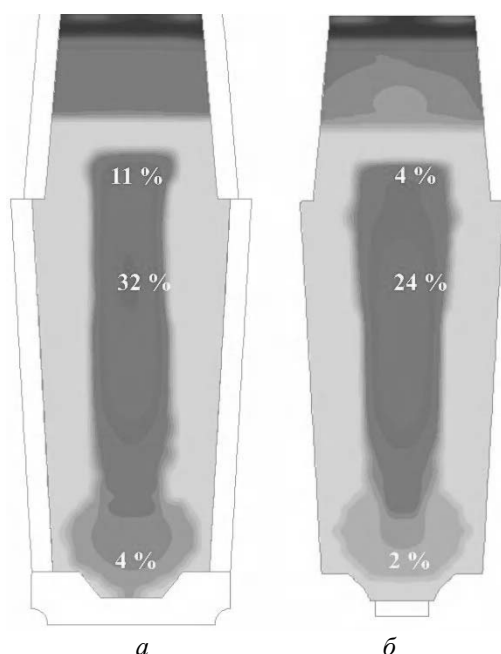


Рис. 5. Характерный вид расположения в теле слитка усадочной раковины (отображение в 3D модели осевого сечения):
а – чугунная изложница; б – одноразовая песчаная форма

На третьем этапе исследований была реализована промышленная апробация компьютерного моделирования получены опытные слитки массой 500 кг из стали 45. После остывания слитки были выбиты из форм. Замечаний к качеству поверхности слитков – нет, она чистая без дефектов и пригара (что облегчило последующую очистку в дробеметной камере). Сравнительные испытания механических свойств проводились на кузнечной заготовке типа «фланец» которую получали из проката и литья в нормализованном состоянии (табл. 2).

Литые заготовки поступали в кузнечный цех после нормализации. Режимы термической обработки для горячих штамповок, произведенных из литого металла, не изменялись. После механической обработки детали успешно прошли ультразвуковой контроль и цветную дефектоскопию.

Таблица 2

**Сравнительные характеристики механических свойств литого
и ковального металла опытных плавов (сталь 45)**

Вид заготовок	Механические свойства					
	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU, Дж/см ²	KCU ⁻⁴⁰ Дж/см ²
Литая: – среднее значение – интервал свойств	360 270–400	610 490–820	11 6–18	18 12–29	28 20–38	21 14–26
Горячая штамповка из проката: – средние значения – интервал свойств	395 370–410	660 640–720	15 13–19	26 21–27	7 34–41	32 29–34
Горячая штамповка из литой заготовки: – среднее значение – интервал свойств	390 370–420	670 630–720	16 14–18	25 22–27	37 35–40	30 28–33

Заключение

На основе анализа оборудования литейного производства машиностроительного предприятия проведена оценка возможности получения литых заготовок для собственных нужд. По результатам компьютерного моделирования для одноразовой и многоразовой форм проанализировано: изменение фронта потока расплава при заполнении формы; изменение скорости потока при поступлении первых порций расплава в форму на этапе начала и окончания разливки; изменение объема твердой фазы при затвердевании и расположение в теле слитка усадочной раковины. Последующая отливка модельных слитков показала, что литые заготовки для кузнечного передела возможно изготавливать в условиях литейных цехов машиностроительных предприятий путем заливки расплава в одноразовую песчаную форму или в многоразовую (чугунную изложницу), что позволит обеспечить производство качественными заготовками в максимально короткие сроки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богодухов, С. И. Технологические процессы в машиностроении / С. И. Богодухов, Р. М. Сулейманов, А. Д. Проскурин. – М.: Инновационное машиностроение, 2021. – 640 с

2. Li, J., Xu, Xw., Ren, N. et al. A review on prediction of casting defects in steel ingots: from macrosegregation to multi-defect model. J. Iron Steel Res. Int. 29, 1901–1914 (2022). – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00848-7>

3. Wang, T.; Wang, E.; Delannoy, Y.; Fautrelle, Y.; Budenkova, O. Numerical Simulation of Macrosegregation Formation in a 2.45 ton Steel Ingot Using a Three-Phase Equiaxed Solidification Model. Metals 2021, 11, 262. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/met11020262>

4. Nishimura, T., Kishimoto, A. Casting Defect Analysis of Carbon Steel Using Sand Casting Experiments. Inter Metalcast (2022). – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00917-3>

5. Chen, Z., Senk, D. & Firsbach, F. Experimental Investigations on Solidification of 500-kg Steel Ingots with Laboratory Trials. Metall Mater Trans B 49, 2514–2532 (2018). – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1325-5>

6. Chen, Z. Quality of as-cast ingots with extreme large shapes: doctoral thesis. Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 09 Dezember 2014. – Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/36622351.pdf>

7. Жульев, С. И. Производство и проблемы качества кузнечного слитка: монография / С. И. Жульев, Н. А. Зюбан. – Волгоград: ВолгГТУ, 2003. – 168 с.

8. Скобло, С. Я. Слитки для крупных поковок / С. Я. Скобло, Е. А. Казачков. – М., Металлургия, 1973. – 248 с.

9. Еронько, С. П. Разливка стали: оборудование, технология / С. П. Еронько, С. В. Быковских. – К.: Техника, 2003. – 216 с.

10. Палаткин, С. В. Исследование влияния скорости разливки на структуру и дефекты стального слитка / С. В. Палаткин, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – № 1. – С. 12–19.