

Шаров К.В., Богомягков А.В., Пустовалов Д.О., Шумков А.А., Меркушева Л.М., Никитин Н.Е. Применение металлической вставки в стержень для управления скоростью затвердевания отливки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 52–58. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.06

Sharov K.V., Bogomyagkov A.V., Pustovalov D.O., Shumkov A.A., Merkusheva L.M., Nikitin N.E. The use of a metal insert in the core to control the solidification speed of the casting. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 52–58. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.06

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 2, 2020
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.06

УДК 621.74.01

К.В. Шаров, А.В. Богомягков, Д.О. Пустовалов,
А.А. Шумков, Л.М. Меркушева, Н.Е. Никитин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ В СТЕРЖЕНЬ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВКИ**

Получение плотной мелкозернистой отливки – важная задача. Определены пути получения такой отливки: ускорить процесс отведения теплоты перегрева от расплава и обеспечить принцип направленного затвердевания. Использование охлаждающих элементов – холодильников – позволяет использовать оба этих способа одновременно. В качестве альтернативы поверхностным, внутренним удаляемым и плавким холодильникам предложено использование металлической вставки в песчаный стержень. Песчаная облицовка облегчает удаление стержня, металлическая вставка более эффективно поглощает и отводит теплоту перегрева.

Показано моделирование затвердевания полой цилиндрической отливки со стержнем с металлической вставкой и цельнопесчаным стержнем, причем для моделирования использовалась одна и та же 3D-модель. Моделирование затвердевания проводилось в программном комплексе ProCAST. Использовался алюминиевый сплав АК12 при температуре 700 °С, разовая песчаная форма, чугунная и медная вставки в стержень при температуре 20 °С. Приведено время затвердевания отливок при использовании полого стержня, песчаного стержня, стержня с чугунной и медными вставками.

Приведен способ расчета металлической вставки на основе уравнения теплового баланса, где определяется такой ее объем, который позволит поглотить и отвести всю теплоту перегрева расплава, при этом не вызвав дефектов, связанных с заполнением формы.

Получено, что применение чугунной вставки в стержне позволило сократить время затвердевания на 16,78 % по сравнению с полым стержнем и на 11,97 % по сравнению с цельным песчаным стержнем, что может положительно сказаться на структуре металла и способствовать созданию направленного затвердевания в отливке. Степень и глубина прогрева стержня при использовании металлической вставки значительно меньше.

Ключевые слова: разовая песчаная форма, холодильник, направленное затвердевание, скорость затвердевания, стержень, структура, управление структурой, зерно, усадка, уравнение теплового баланса, метод конечных элементов, ProCAST.

K.V. Sharov, A.V. Bogomyagkov, D.O. Pustovalov,
A.A. Shumkov, L.M. Merkusheva, N.E. Nikitin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE USE OF A METAL INSERT IN THE CORE TO CONTROL
THE SOLIDIFICATION SPEED OF THE CASTING**

Obtaining a dense fine-grained casting is an important task. The paper defines ways to obtain such a casting – to accelerate the process of heat removal from the melt and to ensure the principle of directional solidification. The use of cooling elements – chills – allows you to use both of these methods at the same time. An alternative to surface, internal, removable and fusible chill is the use of a metal insert in a sand core. Sand lining facilitates the removal of the core, the metal insert more efficiently absorbs and removes the heat of overheating.

The paper shows the modeling of the solidification of a hollow cylindrical casting with a core with a metal insert and an all-sand core, and the same 3D-model was used for modeling. Solidification modeling was carried out in the ProCAST software package. Aluminum alloy AK12 was used at a temperature of 700 °C, a single sand form, a cast-iron and copper insert into the core at a temperature of 20 °C. The solidification time of castings using a hollow core, a sand core, a core with cast iron and copper inserts is given.

A method for calculating a metal insert based on the heat balance equation is given, where its volume is determined that will absorb and remove all the heat of overheating of the melt, without causing defects associated with filling out the form.

It was found that the use of a cast iron insert in the core allowed to reduce the solidification time by 16.78 % compared to a hollow core, and by 11.97 % compared to a solid sand core, which can positively affect the metal structure and contribute to the creation of directional solidification in casting. The degree and depth of heating of the rod when using a metal insert is much less.

Keywords: single sand form, chill, directional solidification, solidification speed, core, structure, structure management, grain, shrinkage, heat balance equation, finite element method, ProCAST.

Введение

Повышение качества отливок является важной задачей, так как большое число заготовок в машиностроении, авиа- и ракетостроении, добывающей отрасли получают литьем. Соответственно, чем качественней и надежней заготовка, тем качественней и надежней будет полученная деталь, тем дольше она будет эксплуатироваться и тем конкурентоспособней будет собранное изделие. Помимо этого, нужно учитывать комплекс экономических и экологических выгод, связанных с отсутствием необходимости исправления дефектов и переплавки брака.

Получение плотной мелкозернистой отливки

Получение отливки с надлежащими эксплуатационными свойствами – задача комплексная. Зачастую требованиям качества будет удовлетворять плотная отливка с мелкозернистой структурой [1–3]. Методы получения таких отливок включают комплексное воздействие на структуру металла, например модифицированием, увеличением скорости охлаждения частей отливки и обеспечением питания на протяжении всего этапа затвердевания (рис. 1).

Измельчение структуры за счет увеличения скорости охлаждения достигается благодаря полной или частичной замене материала формы на материал с большей теплопроводностью. Вместо песчаной формы могут использоваться металлические, как постоянные – кокили [4], так и разовые формы – магнитная формовка при литье по газифицируемым моделям [5]. Измельчение структуры, по сравнению с литьем в разовые песчаные формы, весьма значительное, например в работе Sonne, Frandsen, Hattel [6] получено увеличение количе-

ства углеродных включений в ковком чугуне с 17 до 159 на мм². Однако сами кокили достаточно дороги, в полученных в них отливках возникают большие напряжения, по сравнению с песчаной формой [7].

Зачастую нецелесообразно выполнять форму полностью металлической, достаточно расположить небольшой теплоемкий элемент в нужной ее части [8], чтобы снять перегрев с расплава и ускорить его затвердевание. Такой элемент называют холодильником [9, 10]. Захолаживание можно произвести несколькими путями: установкой наружных холодильников – элементов формы [11], внутренних удаляемых холодильников (при последующей механической обработке при получении отверстия), внутренних расплавляемых холодильников и холодильников, армирующих отливку [12, 13]. Основными недостатками наружных холодильников являются: повышенная трудоемкость выбивки, связанная со сбором холодильников; возможность образования конденсата на них, что приведет к насыщению расплава газами; возможность применения таких холодильников только для охлаждения поверхности его контакта с отливкой, а не всего объема охлаждаемой части. Внутренние удаляемые холодильники повышают трудоемкость последующей механической обработки, также их использование для отверстий больших размеров нерентабельно. Плавкие холодильники требуются изготовить из того же материала, что и отливка, к тому же при их переплавке возможно образование оксидных плен и засоров, если холодильники не были должным образом подготовлены [9, 14]. Однако плавкие холодильники можно использовать как своего рода модификатор – при расплавлении материала холодильника

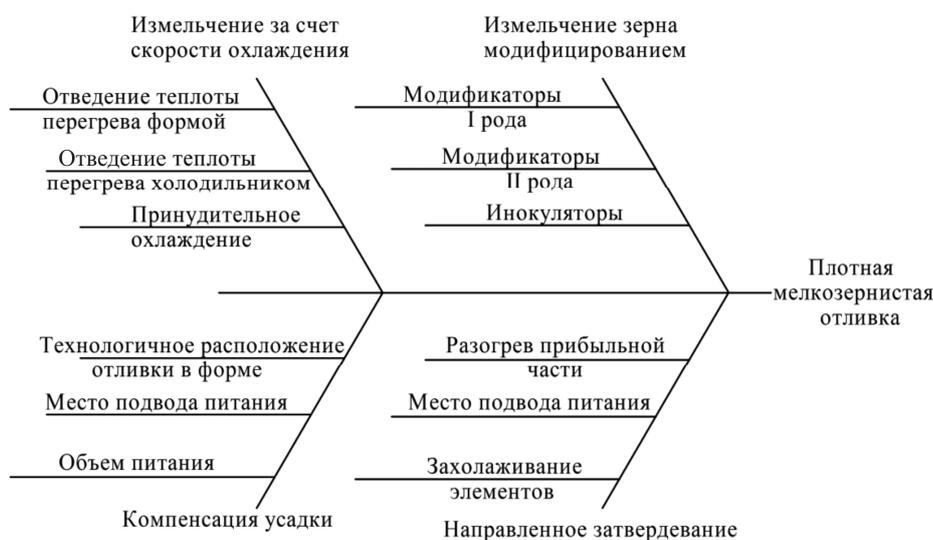


Рис. 1. Способы получения плотной мелкозернистой отливки

создаются дополнительные центры кристаллизации, и они потоком расплава распределяются по объему отливки [15, 16].

Измельчение структуры возможно также при помощи введения модификаторов [17] и инокуляторов [16]. Эти способы широко применяются, но далее в этой работе рассматриваться не будут.

Плотную отливку можно получить только в случае полного вывода усадочной раковины в специальный технологический прилив, называемый прибыльной частью или просто прибылью. Для этого требуется, во-первых, технологично расположить отливку в форме (вышележащая часть отливки должна служить прибылью для нижележащей), установить прибыльные части в местах выхода усадочных раковин, обеспечить должный объем прибылей и достаточно долгое время их действия – прибыль должна остывать последней. Для расчета размеров прибылей существует ряд методик, основанных как на теоретических положениях, так и на практическом опыте; большинство методик основаны на вычислении предполагаемого объема усадочной раковины. Но наибольшее распространение на практике получил метод Пржыбыла [18–22], позволяющего определить как минимально необходимый объем прибылей, так и геометрические размеры прибыли. Кроме того, существуют методики, в основе которых лежит формула определения минимального объема прибыли Пржыбыла, но с отличными от нее соотношениями для определения геометрических размеров прибыли, например метод выкатываемых окружностей [23, 24]. Помимо этого, теоретически может быть рассчитан и профиль усадочной раковины, что может быть полезным при корректировке размеров прибылей [25, 26].

В литейном производстве затвердевание отливки возможно по одному из двух принципов – одновременного и направленного затвердевания. Одновременное затвердевание всех частей отливки позволяет снизить величину напряжений, возникающих в ней при затвердевании, также в этом случае не возникает концентрированной и ярко выраженной усадочной раковины, а наблюдается только рассеянная усадочная пористость. Такой принцип подходит для сплавов с незначительной усадкой или для сплавов с предусадочным расширением [27]. Плотную отливку, особенно из сплавов со значительной усадкой, можно получить только при направленном затвердевании – принципе, при котором затвердевание происходит последовательно, от тонких элементов к более толстым, что позволяет полностью питать отливку на протяжении всего периода затвердевания и полностью вывести усадочную раковину в прибыль [9, 18].

Проанализировав вышесказанное, можно сделать вывод, что установка холодильника в форму позволит реализовать сразу несколько способов улучшения качества отливки: направленное затвердевание, измельчение структуры, обеспечив большую скорость охлаждения. Важными частями отливки часто являются зоны вокруг отверстий, оформляемых стержнем. Установка дополнительного теплопоглощающего и теплоотводящего элемента в стержень может увеличить качество этой зоны. В работе [28] исследовано влияние такой вставки на время затвердевания цилиндрической отливки, однако не рассматривалась методика расчета требуемого объема.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в программном комплексе ProCAST на кольцевой отливке из сплава АК12 (AlSi12a в стандартной базе материалов). Данный программный комплекс хорошо себя зарекомендовал как при моделировании технологических процессов, так и в лабораторных исследованиях. Модели системы приведены на рис. 2 и состоят из отливки в виде полого цилиндра 1, песчаной облицовки 2 и металлической вставки 3 (см. рис. 2, а), из отливки и цельного песчаного стержня 4 (см. рис. 2, б), отливки и полого оболочкового стержня (см. рис. 2, в). В скобках указан номер эксперимента. Для проведения исследований использовалась одна и та же 3D-модель при одинаковых условиях, но в каждом эксперименте задавались различные материалы центральной вставки и, соответственно, различные коэффициенты передачи тепла. Для того чтобы исключить влияние процесса заливки, форма принималась сразу полностью заполненной расплавом температурой 700 °С. Температура формы, стержней и окружающей среды была принята равной 20 °С.

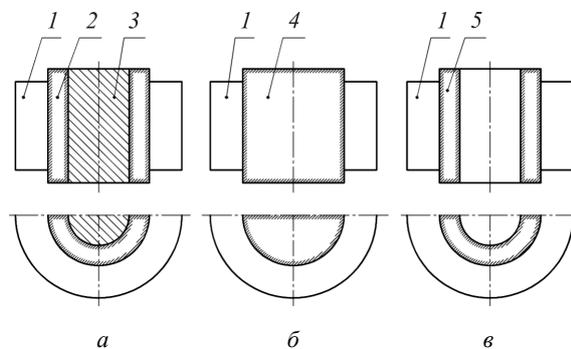


Рис. 2. Схемы исследуемых систем: 1 – отливка; 2 – песчаный стержень-облицовка; 3 – металлическая вставка (I – чугун; II – медь); 4 – песчаный стержень (III); 5 – воздушная полость (IV)

В работе [28] показана наибольшая эффективность чугуновой вставки в стержень. Объем вставки, служащей для захлаживания отливки, может быть найден исходя из массы холодильников, необходимой для отвода теплоты перегрева. Для этого составляется уравнение теплового баланса [12]:

$$c_o m_o (T_{\text{зал}} - T_{\text{л}}) + S_{\text{эф}} m_o = c_x m_x (T_{\text{к.х}} - T_{\text{н.х}}),$$

где c_o и c_x – удельные теплоемкости теплового узла отливки и холодильника соответственно, кДж/(кг·°C); m_o и m_x – массы теплового узла отливки и холодильника соответственно, кг; $T_{\text{зал}}$, $T_{\text{л}}$ – температуры заливки и ликвидуса сплава соответственно, °C; $T_{\text{к.х}}$, $T_{\text{н.х}}$ – конечная и начальная температуры холодильника, °C; $S_{\text{эф}}$ – эффективная теплота кристаллизации материала отливки, кДж/кг. Отсюда масса холодильника

$$m_x = \frac{c_o m_o (T_{\text{зал}} - T_{\text{л}}) + S_{\text{эф}} m_o}{c_x (T_{\text{к.х}} - T_{\text{н.х}})}.$$

Для данной отливки $c_o = 838$ кДж/(кг·°C); $c_x = 460$ кДж/(кг·°C); $S_{\text{эф}} = 393$ кДж/кг; $T_{\text{зал}} = 700$ °C, $T_{\text{л}} = 580$ °C [29], $T_{\text{к.х}} = 570$ °C, $T_{\text{н.х}} = 20$ °C; $m_o = 0,407$ кг. Масса чугунового холодильника получается равной 0,162 кг.

Исходя из полученных массовых характеристик в качестве захлаживающего элемента применяется чугуновый стержень диаметром 24 мм и высотой 50 мм. Расчет медной вставки проводится аналогично.

Объем и масса песчаного стержня, как правило, не рассчитываются с точки зрения теплоаккумулирующей способности. Размеры и конфигура-

ция песчаных стержней определяются конфигурацией отверстия в отливке и регламентируются ГОСТ 3213–92 [12]. Толщина стенок полых стержней определяется их конструктивной прочностью [30].

Результаты исследования и обсуждение

Рассмотрим процесс затвердевания получившейся системы. Затвердевание системы со стержнем с чугуновой вставкой показан на рис. 3. Тепло эффективно поглощается на всем протяжении затвердевания. С помощью цветовой шкалы (см. рис. 3, а) можно проследить, что при 24 % твердой фазы в расплаве металлическая вставка все еще холодная (см. рис. 3, б), прогревается до 200–300 °C при 80 % твердой фазы (см. рис. 3, в) и температура вставки немного превышает 300 °C при полном затвердевании отливки (см. рис. 3, г). У песчаной оболочки сильно прогрета только часть, непосредственно контактирующая с отливкой.

Песчаный стержень прогревается значительно сильнее. С помощью цветовой шкалы (рис. 4, а) можно проследить, что при 24 % твердой фазы стержень прогрет, температура в центре свыше 100 °C (рис. 4, б), при 80 % температура в центре 380–420 °C (рис. 4, в) и при полном затвердевании внутренняя часть стержня прогрета свыше 400 °C, а поверхность, контактирующая с отливкой, имеет температуру последней свыше 500 °C.

При сравнении видно, что песчаный стержень прогрет сильнее, чем стержень с металлической вставкой; также поля температур у внешней поверхности стержня обладают меньшей кривизной и меньшим шагом при использовании чугуновой вставки.

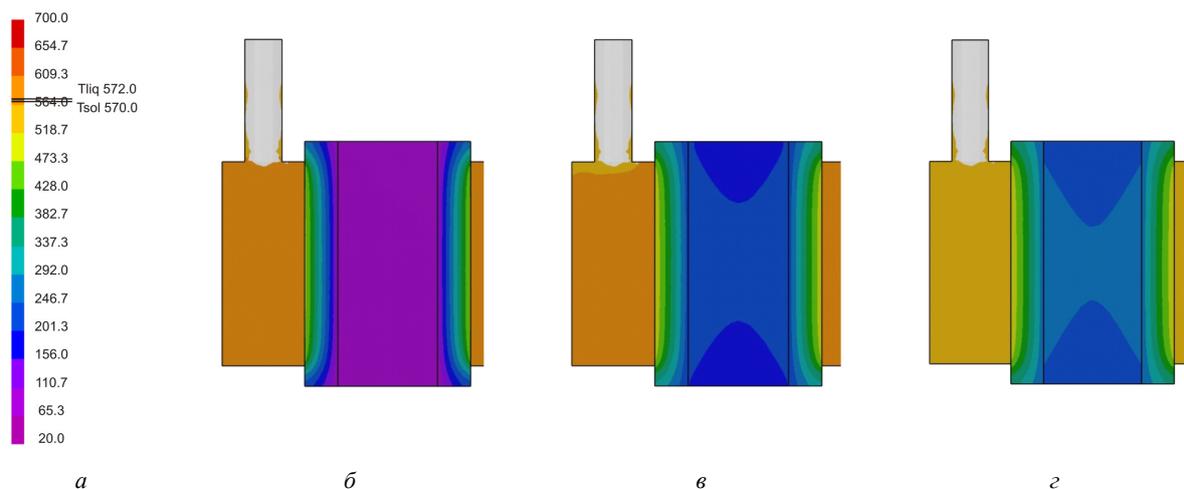


Рис. 3. Распределение температур в модели системы со стержнем с чугуновой вставкой: а – цветовая шкала, °C; б – 24 % твердой фазы; в – 80 % твердой фазы; г – 100 % твердой фазы

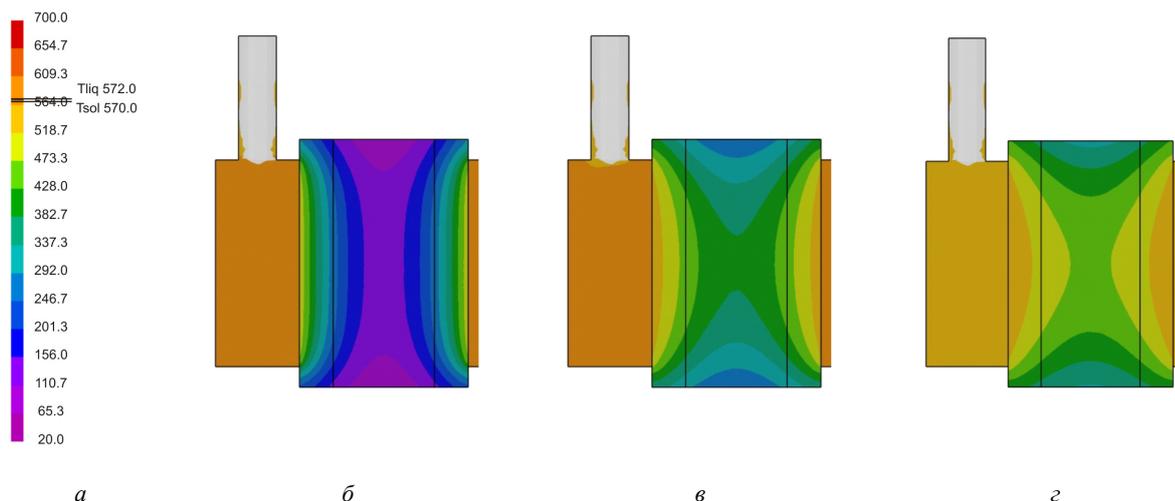


Рис. 4. Распределение температур в модели системы с песчаным стержнем:
 а – цветовая шкала, °С; б – 24 % твердой фазы; в – 80 % твердой фазы; г – 100 % твердой фазы

Результаты моделирования скорости охлаждения

Номер эксперимента	Материал вставки (название в базе ProCAST)	Коэффициент теплообмена, Вт/(м ² ·К)	Время затвердевания, с
I	Чугун (cast iron stress)	3000	411,94
II	Медь (cooper chill)	3000	427,33
III	Песок (sand silica)	300	467,93
IV	Воздух (air)	20	495,03

Результаты моделирования времени затвердевания сведены в таблицу, также приведены материалы вставки с их названиями в стандартной базе программного комплекса ProCAST и условия теплообмена на границе облицовка–вставка для каждого эксперимента.

Выводы

Применение металлической (чугунной) вставки в стержне позволило сократить время затвердевания на 16,78 % по сравнению с полым стержнем, на 11,97 % по сравнению с цельным песчаным стержнем, что может положительно сказаться на структуре металла и поспособствовать созданию направленного затвердевания в отливке. Степень и глубина прогрева стержня при использовании металлической вставки значительно меньше. Использование металлической вставки в стержень позволит воздействовать на кинетику кристаллизации и поможет добиться направленного затвердевания. Определить требуемую массу металлической вставки, достаточную для отвода теплоты перегрева, можно с использованием уравнения теплового баланса.

Список литературы

1. Гуляев Б.Б. Расчет прибылей для стальных отливок // Бюллетень литейщика. – 1945. – № 5–6. – С. 17–19.
2. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
3. Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. – М.: Машиностроение, 2006. – 234 с.
4. Литье в кокиль / С.Л. Бураков, А.И. Вейник, Н.П. Дубинин [и др.]; под ред. А.И. Вейника. – М.: Машиностроение, 1980. – 415 с.
5. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: Профессионал, 2007. – 405 с.
6. Sonne M., Frandsen J., Hattel J.H. Comparison of residual stresses in sand- and chill casting of ductile cast iron wind turbine main shafts // Conf. Series Materials Sci. and Eng. – June 2015. – Vol. 84 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/84/1/012025
7. Комиссаров В.А. Силовое взаимодействие отливки с металлическими стержнями и кокилем // Кокильное литье в машиностроении. – М., 1964. – С. 1–15.
8. Анисович Г.А., Жмакин Н.П. Охлаждение отливки в комбинированной форме. – М.: Машиностроение, 1969. – 136 с.
9. Василевский П.Ф. Технология стального литья. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.
10. Раддл Р.У. Затвердевание отливок: пер. с англ. – М.: Машгиз, 1960. – 392 с.
11. Влияние положения в литейной форме наружного холодильника на процессы в охлаждающемся расплаве металла / А.М. Скребцов, В.И. Жук, В.А. Алексеева, В.В. Щуренко, А.О. Секачев // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 1999. – № 8. – С. 32–36.
12. Технология литейного производства / А.П. Трухов, Ю.А. Сорокин, М.Ю. Ершов [и др.]; под ред. А.П. Трухова. – М.: Академия, 2005. – 528 с.
13. О некоторых возможностях измельчения зерна металла отливки при внешнем воздействии на затвердевающий расплав / А.М. Скребцов, Л.А. Дан, А.О. Секачев

чев, А.А. Прокопов // *Металл и литье Украины*. – 1996. – № 1–2. – С. 34–37.

14. Теория, компьютерный анализ и технология стального литья / В.М. Голод, В.А. Денисов; под общ. ред. В.М. Голода / ИПЦ СПГУТД. – СПб., 2007. – 610 с.

15. Гаген-Торн В.О. О кристаллизации и строении слитка // *Металлург*. – 1977. – № 11 (95). – С. 82–96.

16. Скребцов А.М., Секачев А.О. Влияние расплаваемого внутреннего холодильника на структуру металла затвердевшего слитка или отливки // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Технические науки*. – 1997. – № 3. – С. 62–65.

17. Шишляев В.Н. Кристаллизация и литейные свойства сплавов: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 260 с.

18. Расчет и проектирование прибылей для отливок / Б.Б. Гуляев [и др.] // *Улучшение качества отливок*. – Горький: Волго-Вятское ЦБТИ, 1966. – С. 171–181.

19. Фокин В.И. Возможные приемы определения размеров прибыли для отливок // *Прогрессивная технология литейного производства*. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1969. – С. 53–58.

20. Есьман Р.И. Расчет прибылей для фасонного литья // *Охлаждение отливки*. – Минск: Наука и техника, 1969. – С. 228–235.

21. Гетьман А.А., Дворецкий В.В. Расчет размеров прибылей для отливок // *Усадочные процессы в сплавах и отливках*. – Киев: Наукова думка, 1970. – С. 199–209.

22. Сафаров Р.Ш., Дубицкий Г.М. Вопросы конструирования и расчета прибылей для отливок из сплавов системы алюминий – кремний // *Улучшение технологии изготовления отливок*. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1966. – С. 79–92.

23. Чернышов Е.А., Евстигнеев А.И. Теоретические основы литейного производства. Теория формирования отливки: учеб. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева, КиАГТУ. – М.: Машиностроение, 2015. – 480 с.

24. Ипатов Н.К. К вопросу о форме прибыли // *Литейное производство*. – 1955. – № 3. – С. 3–4.

25. Васенин В.И. Определение размеров прибыли // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2011. – № 3. – С. 23–37.

26. Васенин В.И. Экспериментальное определение размеров усадочной раковины // *Литейное производство*. – 2008. – № 4. – С. 24–25.

27. Шишляев В.Н. Железоуглеродистые литейные сплавы: учеб. пособие для вузов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2005. – 162 с.

28. Никитин Н.Е., Шаров К.В., Пустовалов Д.О. Влияние металлической вставки в стержень на кинетику затвердевания отливки // *Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Спец. вып. Аддитивные технологии: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Пермь, 11–12 декабря 2019 г.* – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – С. 231–233.

29. Шишляев В.Н. Цветные сплавы: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 235 с.

30. Просяник Г.В. Изготовление оболочковых форм и стержней: учеб. для подготовки рабочих на производстве. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 240 с.

References

1. Guliaev B.B. Raschet prybylei dlia stal'nykh otlivok [Profit calculation for steel castings]. *Biulleten' liteishchika*, 1945, no. 5–6, pp. 17–19.

2. Guliaev B.B. Teoriia liteinykh protsessov [Foundry process theory]. Leningrad: Mashinostroenie, 1976, 216 p.

3. Nazaratn V.V. Tekhnologiiia izgotovleniia stal'nykh otlivok otvetstvennogo naznacheniiia [The technology of manufacturing of steel castings for responsible purposes]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 234 p.

4. S.L. Burakov, A.I. Veinik, N.P. Dubinin. Lit'e v kokil' [Dollar casting]. Ed. A.I. Veinika. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 415 p.

5. Shuliak V.S. Lit'e po gazifitsiruemyim modeliam [Casting on gasifiable models]. Saint-Petersburg: Professional, 2007, 405 p.

6. Sonne M., Frandsen J., Hattel J.H. Comparison of residual stresses in sand- and chill casting of ductile cast iron wind turbine main shafts. *Conf. Series Materials Sci. and Eng.* June 2015, vol. 84 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/84/1/012025

7. Komissarov V.A. Silovoe vzaimodeistvie otlivki s metallicheskimi sterzhniami i kokilem [Power interaction of casting with metal rods and coke]. *Kokil'noe lit'e v mashinostroenii*. Moscow, 1964, pp. 1–15.

8. Anisovich G.A., Zhmakin N.P. Okhlazhdenie otlivki v kombinirovannoi forme [Cooling of castings in combined form]. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 136 p.

9. Vasilevskii P.F. Tekhnologiiia stal'nogo lit'ia [Steel Casting Technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 408 p.

10. Raddl R.U. Zatverdevanie otlivok [Castings hardening]. Moscow: Mashgiz, 1960, 392 p.

11. Skrebtsov A.M., Zhuk V.I., Alekseeva V.A., Shchurenko V.V., Sekachev A.O. Vliianie polozeniia v liteinoi forme naruzhnogo kholodil'nika na protsessy v okhlazhdauiushchemsia rasplave metalla [Influence of the casting position of the external refrigerator on the processes in the cooling metal melt]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1999, no. 8, pp. 32–36.

12. A.P. Trukhov, Iu.A. Sorokin, M.Iu. Ershov et al. Tekhnologiiia liteinogo proizvodstva [Foundry technology]. Ed. A.P. Trukhova. Moscow: Akademiia, 2005, 528 p.

13. Skrebtsov A.M., Dan L.A., Sekachev A.O., Prokopov A.A. O nekotorykh vozmozhnostiakh izmel'cheniia zerna metalla otlivki pri vneshnem vozdeistvii na zatverdevaiushchii rasplav [About some possibilities of grinding of cast metal grains at external influence on hardening melt]. *Metall i lit'e Ukrainy*, 1996, no. 1–2, pp. 34–37.

14. Golod V.M., Denisov V.A. Ed. V.M. Goloda Teoriia, komp'iuternyi analiz i tekhnologiiia stal'nogo lit'ia [Theory, computer analysis and steel casting technology]. IPTs SPGUTD. Saint-Petersburg, 2007, 610 p.

15. Gagen-Torn V.O. O kristallizatsii i stroenii slitka [About the crystallization and structure of the ingot]. *Metallurg*, 1977, no. 11 (95), pp. 82–96.

16. Skrebtsov A.M., Sekachev A.O. Vliianie rasplavli-aemogo vnutrennego kholodil'nika na strukturu metalla zatverdevshego slitka ili otlivki [Влияние расплаваемого внутреннего холодильника на структуру металла затвердевшего слитка или отливки]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1999, no. 8, pp. 32–36.

darstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Tekhnicheskie nauki*, 1997, no. 3, pp. 62–65.

17. Shishliaev V.N. Kristallizatsiia i liteinye svoistva splavov [Crystallization and casting properties of alloys]. Perm', 2008, 260 p.

18. B.B. Guliaev et al. Raschet i proektirovanie pribylei dlia otlivok [Calculation and design of profits for castings]. *Uluchshenie kachestva otlivok. Gor'kii: Volgo-Viatskoe TsBTI*, 1966, pp. 171–181.

19. Fokin V.I. Vozmozhnye priemy opredeleniia razmerov pribyli dlia otlivok [Possible techniques for determining profit margins for castings]. *Progressivnaia tekhnologiya liteinogo proizvodstva. Gor'kii: Volgo-Viatskoe kn. izd-vo*, 1969, pp. 53–58.

20. Es'man R.I. Raschet pribylei dlia fasonnogo lit'ia // Okhlazhdenie otlivki [Calculation of profits for shaped castings]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1969, pp. 228–235.

21. Get'man A.A., Dvoret'skii V.V. Raschet razmerov pribylei dlia otlivok [Calculation of profit margins for castings]. *Usadochnye protsessy v splavakh i otlivkakh*. Kiev: Naukova dumka, 1970, pp. 199–209.

22. Safarov R.Sh., Dubitskii G.M. Voprosy konstruirovaniia i rascheta pribylei dlia otlivok iz splavov sistemy aliuminii – kremnii // Uluchshenie tekhnologii izgotovleniia otlivok. – Sverdlovsk: Izd-vo UPI, 1966. – S. 79–92.

23. Chernyshov E.A., Evstigneev A.I. Teoreticheskie osnovy liteinogo proizvodstva. Teoriia formirovaniia otlivki [Theoretical foundations of foundry production. Theory of casting formation]. NGTU im. R.E. Alekseeva, KiAGTU. M.: Mashinostroenie, 2015, 480 p.

24. Ipatov N.K. K voprosu o forme pribyli [On the question of profit form]. *Liteinoe proizvodstvo*, 1955, no. 3, pp. 3–4.

25. Vasenin V.I. Opredelenie razmerov pribyli [Determining profit margins]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2011, no. 3, pp. 23–37.

26. Vasenin V.I. Eksperimental'noe opredelenie razmerov usadochnoi rakoviny [Experimental sizing of shrinking shells]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2008, no. 4, pp. 24–25.

27. Shishliaev V.N. Zhelezouglerodistyie liteinye splavy [Iron-carbon casting alloys]. Perm', 2005, 162 p.

28. Nikitin N.E., Sharov K.V., Pustovalov D.O. Vliianie metallicheskoi vstavki v sterzhen' na kinetiku zatverdevaniia otlivki [Influence of the metal insert in the rod on the curing kinetics of the casting]. *Elektrofizicheskie metody ob-rabotki v sovremennoi promyshlennosti. Spets. vyp. Additivnye tekhnologii: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov*. Perm', 2020, pp. 231–233.

29. Shishliaev V.N. Tsvetnye splavy [Color Alloys]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, 235 p.

30. Proslanik G.V. Izgotovlenie obolochkovykh form i sterzhnei [Manufacture of shell molds and cores]. 3rd ed. Moscow: Vysshiaia shkola, 1978, 240 p.

Получено 24.04.2020

Опубликовано 30.06.2020

Сведения об авторах

Шаров Константин Владимирович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ksharov@yandex.ru.

Богомягков Алексей Васильевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: bogomyagkovav@yandex.ru.

Пустовалов Дмитрий Олегович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: pustovalov.dmitrii@inbox.ru.

Шумков Алексей Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: shumkov_89@mail.ru.

Меркушева Людмила Михайловна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: detali@pstu.ru.

Никитин Никита Евгеньевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: detali@pstu.ru.

About the authors

Konstantin V. Sharov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ksharov@yandex.ru.

Aleksey V. Bogomyagkov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: bogomyagkovav@yandex.ru.

Dmitrii O. Pustovalov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: pustovalov.dmitrii@inbox.ru.

Aleksey A. Shumkov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: shumkov_89@mail.ru.

Ludmila M. Merkusheva (Perm, Russian Federation) – Magistrate, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: detali@pstu.ru.

Nikita E. Nikitin (Perm, Russian Federation) – Magistrate, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: detali@pstu.ru.