

Безденежных И.С., Матыгуллина Е.В., Шумков А.А. Выбор элементарной ячейки для моделирования структуры пеночерamicеского фильтра // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 95–101. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.11

Bezdenezhnykh I.S., Matygullina E.V., Shumkov A.A. The choice of unit cell for modeling the structure of the ceramic foam filter. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 95–101. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.11

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

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.11
УДК 621.746

И.С. Безденежных, Е.В. Матыгуллина, А.А. Шумков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ВЫБОР ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
ПЕНОКЕРАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА**

В настоящее время в производственных процессах литья широко используются фильтрующие элементы для борьбы с пенообразованием в отливках. В качестве фильтрующих элементов применяются пеночерamicеские фильтры. Структура фильтров представляет собой неупорядоченные и замкнутые каналы произвольной формы, что затрудняет оценку ключевых параметров заливки металла в форму. Снижение турбулентности и степень очистки металла при использовании пеночерamicеского фильтра оцениваются опытным путем. Стабильность процесса фильтрации достаточно низкая. Моделирование процессов заливки через пеночерamicеские фильтры затруднительно, что не позволяет прогнозировать результаты эксперимента.

Рассмотрены геометрические параметры матриц материала, которые используются при производстве высокопористых пеночерamicеских фильтров методом дублирования. Описана геометрическая структура ячеек пенополиуретана ППУ ОСТ 6-05-407–75, ППУ-ЭО-100. Приведена методика натурного эксперимента для оценки влияния фильтра на поток при заливке расплава в формы. Показаны результаты расчета параметров структуры ячейки высокопористых проницаемых ячеистых материалов. Проведено моделирование процесса заливки металла через спроектированный фильтр с регулярной структурой, состоящий из массива ячеек тетракиسدодекаэдра. По результатам моделирования установлено, что при использовании фильтра с ячейками типа тетракиسدодекаэдра, скорость потока снижается с 2,13 м/с на выходе из литникового канала до 0,21 м/с на выходе из тела фильтрующего элемента. Движение металла происходит через нижнюю часть фильтра и оказывает постепенное заполнение формы, исключая эрозию песчано-глинистой формы. Определено, что снижение скорости потока расплава возникает из-за столкновения отдельных потоков при прохождении через ячеистый массив фильтра, что подтверждается изменением векторов движения.

Ключевые слова: пеночерamicеский фильтр, метод конечных элементов, вектор движения, турбулентность потока, сетчатая структура, открытая пористость, литье по выплавляемым моделям, включения, огнеупорная футеровка, регулярная ячейка, отливка, скорость потока.

I.S. Bezdenezhnykh, E.V. Matygullina, A.A. Shumkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE CHOICE OF UNIT CELL FOR MODELING THE STRUCTURE
OF THE CERAMIC FOAM FILTER**

Currently, filtering elements are widely used in casting production processes to combat foaming in castings. Ceramic foam filters are used as filter elements. The structure of the filters consists of disordered and closed channels of arbitrary shape, which makes it difficult to assess the key parameters of pouring metal into the mold. The decrease in turbulence and the degree of metal purification when using a ceramic foam filter is evaluated empirically. The stability of the filtration process is quite low. Modeling of pouring processes through ceramic foam filters is difficult, which does not allow predicting the results of the experiment. The paper considers the geometric parameters of the material matrices, which are used in the production of highly porous ceramic foam filters by the duplication method. The geometric structure of the polyurethane foam cells PPU OST 6-05 407-75, PPU-EO-100 is described. The methodology of a full-scale experiment is presented to assess the effect of the filter on the flow when pouring the melt into molds. The results of calculating the cell structure parameters of highly porous permeable cellular materials are shown. The process of pouring metal through a designed filter with a regular structure, consisting of an array of tetrakis dodecahedron cells, was simulated. According to the simulation results, it was found that when using a filter with cells of the tetrakis dodecahedron type, the flow velocity decreases from 2.13 m / s at the exit of the gate channel to 0.21 m / s at the exit of the filter element body. The movement of the metal occurs through the lower part of the filter and has a gradual filling of the form, eliminating the erosion of the sand-clay form. It was determined that a decrease in the melt flow rate arises due to the collision of individual flows when passing through the filter mesh, which is confirmed by a change in the motion vectors.

Keywords: ceramic foam filter, finite element method, motion vector, flow turbulence, mesh structure, open porosity, investment casting, inclusion, refractory lining, regular cell, casting, flow rate.

Для процесса изготовления тонкостенных фасонных изделий методом литья критичным является наличие в металле включений разного рода. К таким включениям относятся оксидные, которые образуются в процессе изготовления сплава и на этапе подготовки металла к разливке, а также другие включения, загрязняющие расплав вследствие нарушения технологической дисциплины (куски огнеупорной футеровки, включения других металлов и т.д.) [1–4]. В целях уменьшения процента брака изделий по причинам включений на предприятиях активно применяют пенокерамические фильтры [5, 6]. Данные фильтры представляют собой керамические вставки с открытой пористостью до 95 % [7, 8].

Структура пенокерамического фильтра (ПКФ) образована большим количеством запутанных каналов, при прохождении через которые металл многократно меняет направление своего течения [9, 10]. На рис. 1 приведена фотография поверхности ПКФ.

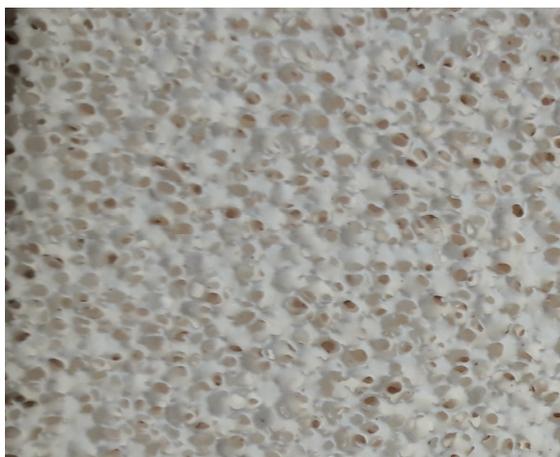


Рис. 1. Поверхность пенокерамического фильтра

В процессе очистки металла включения отделяются фильтрующей средой в соответствии с тремя различными механизмами [11–13]:

- просеивание на поверхности ПКФ (частицы размером больше размера поры скапливаются на поверхности в виде наслоения);
- застревание частицы в глубоком слое (размер частицы превышает диаметр внутреннего канала);
- «прилипание» частицы на стенку фильтрующей среды.

Для производства ПКФ часто используется метод дублирования полимерной матрицы.

Согласно работам [7, 8, 11, 12], матрицей для производства ПКФ служит пористый пенополиуретан ППУ ОСТ 6-05-407–75 или ППУ-ЭО-100. Данный материал представляет собой эластичную ячеистую пластмассу с открытопористой сетчатой структурой. Реальные ячейки ППУ имеют форму

эллипсоида, длинная ось которого ориентирована по направлению вспенивания ППУ, а отношение значений длины осей ячейки-эллипсоида составляет, как правило, (1:1)–(1:3). Для простоты описания геометрии ячейки используют правильный додекаэдр, в вершинах которого располагаются узлы, а ребра образованы перемычками.

Структура ячейки ВПЯМ [13–15], полученного с помощью дублирования матрицы ППУ, имеет вид, представленный на рис. 2.

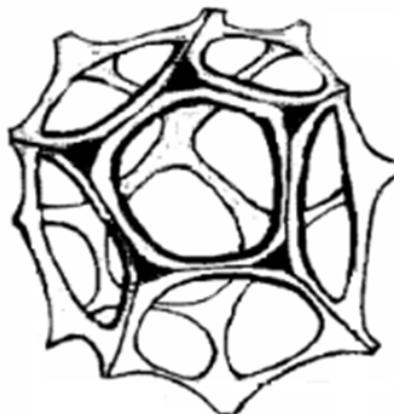


Рис. 2. Ячейка ВПЯМ

Однако использование описанных фильтров затрудняет процесс организации производства.

Из-за запутанной внутренней структуры пенокерамических фильтров сложно оценить степень очистки металла, турбулентность потока и изменение температуры металла при прохождении фильтрующей среды.

Для оценки фильтрующих и структурных свойств фильтра на предприятиях проводят натурный эксперимент. Создают стенд, имитирующий модель литниково-питающей системы и прототип фильтра с неупорядоченной структурой из воска. После сборки в такую модель подается подкрашенная вода для оценки турбулентности и скорости потока, проходящего через модель фильтра. Такой метод позволяет получить только общие визуальные параметры потока и не дает точных результатов.

Для получения более объективных данных рекомендуется проводить моделирование с применением специализированных программных пакетов.

Одной из таких программ является ProCAST [16, 17]. Моделирование в данной среде производится методом конечных элементов. Среда позволяет моделировать все варианты литейных технологий, включая свободное литье в формы, литье под низким и высоким давлением, литье по выплавляемым моделям [18–20].

Однако программный пакет не способен моделировать неупорядоченные структуры. Углы между

Таблица 1

Параметры структуры

№ п/п	Тип моделей	Количество граней	Количество ребер грани	Относительный объем ячейки
1	Пентагондодекаэдр	12	5	0,66
2	Простая кубическая	8	4	0,52
3	Гранецентрированная кубическая	12	4	0,74
4	Тетракиسدодекаэдр	14	5,1	0,68

гранями правильного додекаэдра таковы, что не гарантируют полного заполнения объема укладкой додекаэдров, и, следовательно, структура фильтра не может быть описана как комплекс послойно уложенных правильных двенадцатигранников.

Для решения данной проблемы в работе производился расчет параметров структуры ячейки ВПЯМ (табл. 1) – среднего числа граней и ребер в грани, условного объема ячеек. Наиболее близкой к правильному додекаэдру является форма тетракиسدодекаэдра [21] (рис. 3).

Для моделирования ПКФ использованы структуры, собранные из массива тетракиسدодекаэдров (рис. 4). Массивы, собранные из таких ячеек, имеют контролируемую внутреннюю структуру. В процессе моделирования возможно задать пористость, размер ячейки, толщину перемычки.

Массив, собранный из тетракиسدодекаэдров, пригоден для моделирования в специализированных программных пакетах [22]. В результате такого моделирования можно оценить скорость потока металла при заливке, турбулентность потока, риск эрозии формы [23–25].

С целью проведения модельных экспериментов, иллюстрирующих процесс заливки металла с помощью ПКФ, были приняты следующие параметры ячейки:

- ячейка вписана в куб со сторонами 5 мм;
- перемычки ячейки имеют квадратное сечение со сторонами 0,5 мм;
- количество перемычек – 12;
- толщина грани – 0,5 мм;
- количество открытых граней – 8;
- количество закрытых граней – 6.

Полученная ячейка приведена на рис. 5.

С помощью приведенной на рис. 5 ячейки построен массив (рис. 6), имеющий высоту 50 мм, ширину 50 мм, длину 20 мм, количество рядов 4×10×10, количество ячеек – 400 шт.

Далее проектировалась литниковая питающая система (ЛПС). Принятые параметры при проектировании ЛПС следующие:

- высота стояка – 130 мм;
- диаметр стояка – 32 мм;
- высота чаши – 32 мм;
- диаметр чаши – 96 мм;



Рис. 3. Тетракиسدодекаэдр

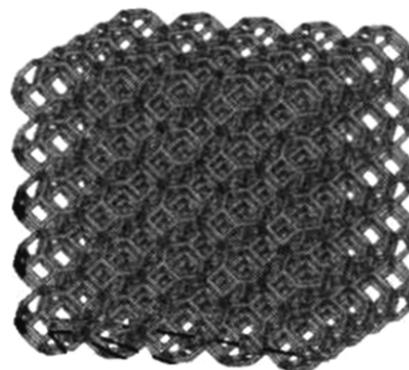


Рис. 4. Структура фильтра, собранная из массива тетракиسدодекаэдров

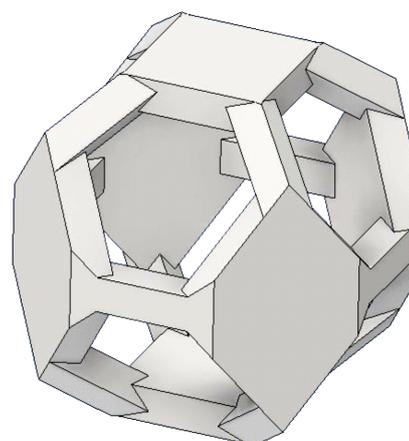


Рис. 5. Тетракиسدодекаэдр, используемый при моделировании процесса заливки металла

- сечение питателя – 32×32 мм;
- длина литника от стояка до фильтра – 30 мм;
- полость для установки фильтра – 26×56×50 мм;
- угол расширения питателя к полости фильтра – $\approx 140^\circ$;
- длина питателя от полости фильтра до резервуара – 30 мм.

На основе ЛПС (рис. 7) были построены специальные резервуары для заполнения металлом. Это необходимо для того, чтобы оценить скорость потока металла через фильтрующий компонент. Резервуар, связанный с чашей, необходим для отвода излишков металла (рис. 8).

Габариты резервуара, являющегося моделью отливки: 800×300×550 мм.

Габариты резервуара, установленного в связке с заливной чашей: 500×300×350 мм.

Для заливки металла необходимо построить модель формы, для эксперимента были выбраны следующие размеры: 900×900×700 мм (рис. 9).

Условия заливки, выбранные для моделирования процесса: температура заливки – 750 °С, материал формы – песок.

Результаты моделирования представлены на рис. 10–12.

На рис. 10 показан начальный этап заливки формы с установленным фильтром. Происходит первичный контакт струи металла с фильтром. Скорость поступления металла в форму равна 2,13 м/с. Можно отметить, что при столкновении происходит разделение струи без образования завихрений в месте контакта.

На рис. 11 показан процесс прохождения металла через тело фильтра. Можно отметить общее снижение скорости потока с 2,13 м/с на выходе из литникового канала до 0,21 м/с на выходе из тела фильтрующего элемента. Поток движется преимущественно через нижнюю часть фильтра. Снижение скорости является следствием многократных локальных изменений направления векторов

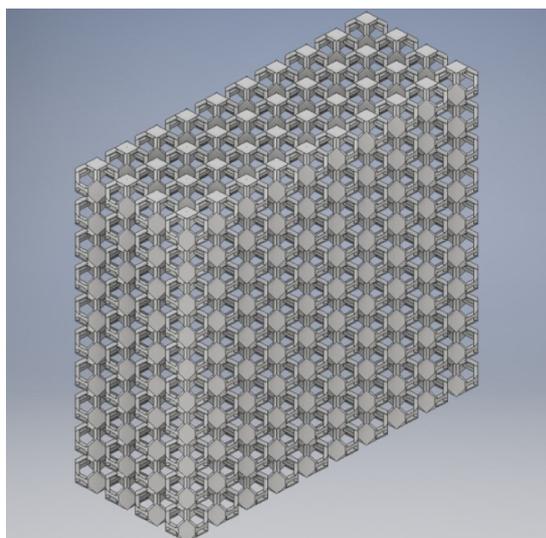


Рис. 6. Модель фильтра

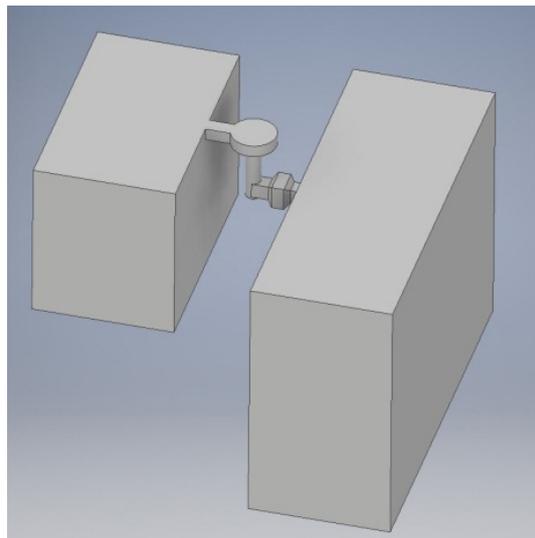


Рис. 8. ЛПС и резервуары

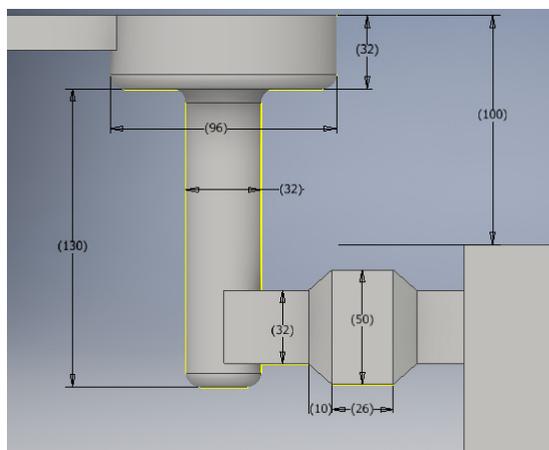


Рис. 7. Габаритные параметры ЛПС с фильтром

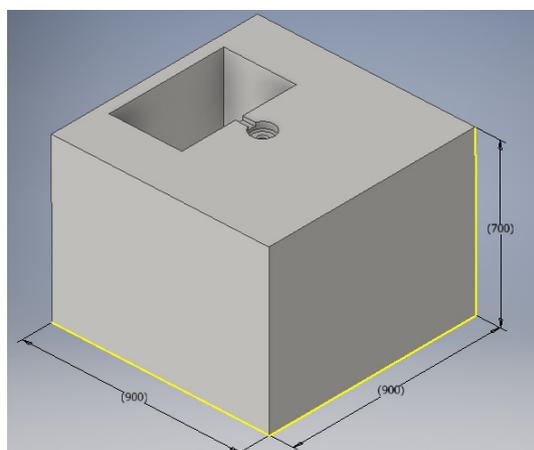


Рис. 9. Форма

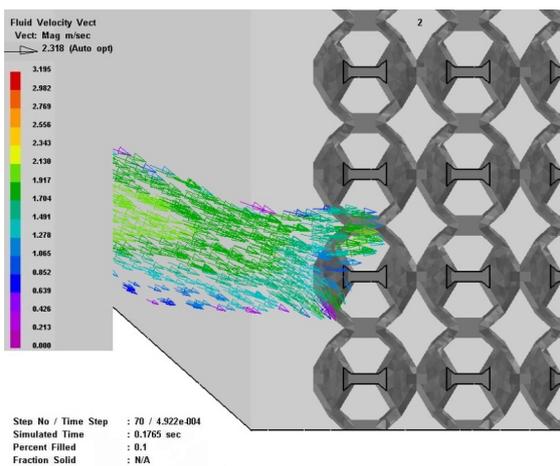


Рис. 10. Начальный момент заливки формы

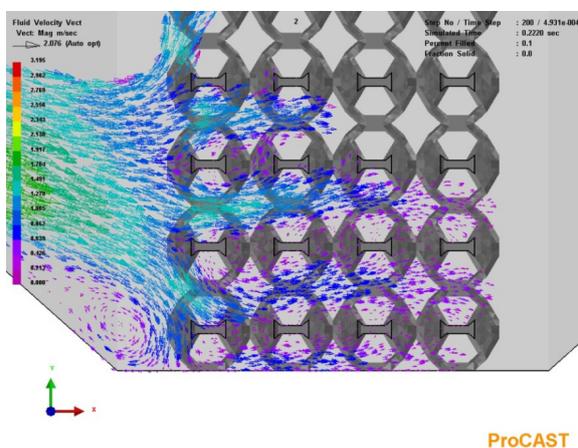


Рис. 11. Прохождение потока металла через фильтр

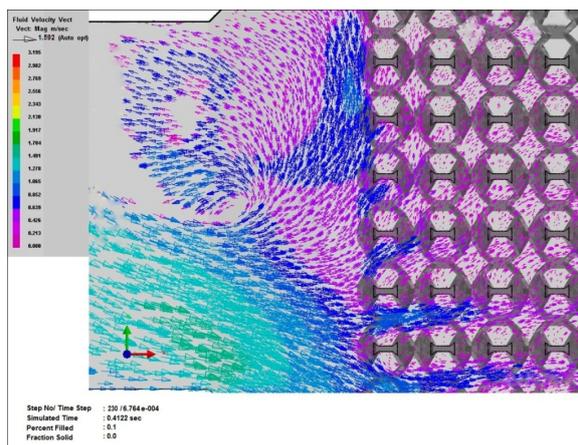


Рис. 12. Образование завихрений металла перед фильтром

движения, а также столкновения отдельных потоков при прохождении через ячейки.

На рис. 12 показана зона образования завихрений перед фильтром. Причиной завихрений является отброс металла от стенки из-за высокого гидравлического сопротивления фильтра.

Выводы

Описаны материалы матриц, которые используются при производстве высокопористых ячеистых материалов. Рассмотрена структура ячейки ПКФ, изготовленного методом дублирования полимерной матрицы. Приведены результаты расчета параметров структуры ячейки ВПЯМ и графическое представление ПКФ как массива ячеек тетракисдодекаэдра. С помощью программного пакета ProCast проведено моделирование процесса заливки металла в форму с применением в качестве фильтрующего элемента массива ячеек тетракисдодекаэдра.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что предложенная модель фильтра обеспечивает снижение скорости потока металла с 2,13 до 0,21 м/с, в результате чего будет происходить равномерное наполнение формы с уменьшением риска ее эрозии. Очистка от неметаллических включений будет происходить на поверхности и в теле фильтра.

Список литературы

1. Кульметьева В.Б., Порозова С.Е., Сметкин А.А. Перспективные композиционные и керамические материалы. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 276 с.
2. Оглезнева С.А. Материаловедение и технологии современных и перспективных материалов: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 307 с.
3. Реологические свойства корундового шликера / В.В. Игнатенкова, А.В. Беспалов, В.Н. Грунский [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. XXIII, № 2. – С. 77–80.
4. Системы компьютерного моделирования ProCAST компании ESI GROUP в образовательной и научной деятельности кафедры САПР и ТЛП / Д.В. Бережной, М.С. Варфоломеев, К.В. Моисеев [и др.] // Высшее образование в России. – 2001. – № 1. – С. 103–106.
5. Соколова О.О., Сметаников О.Ю. Численное моделирование затвердевания и структуры металлического слитка // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 1. – С. 152–167.
6. Албу А.Ф., Зубов В.И. Математическое моделирование и исследование процесса кристаллизации металла в литейном деле // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 882–902.
7. Турищев В.В. Моделирование литейных процессов: что выбрать? // САПР и графика. – 2005. – № 11. – С. 30–35.
8. Матвиенко О.В., Ушаков В.М., Евтюшкин Е.В. Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке // Вестник Том. гос. пед. ун-та. – 2004. – Вып. 6 (43). – С. 50–54.

9. Сугак Е.В. Имитационное моделирование турбулентных закрученных потоков газа // *Фундаментальные основы механики*. – 2018. – № 3. – С. 78–83.

10. Модели и свойства высокопористых ячеистых материалов / В.Н. Анциферов, А.А. Макаров, А.М. Ханов [и др.] // *Перспективные материалы*. – 2010. – № 3. – С. 5.

11. Коротков В.Г. Рафинирование литейных алюминиевых сплавов. – М.: Машгиз, 1963. – 127 с.

12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 126 с.

13. Макаров Г.С. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. Основы производства. – М.: Интернет Инжиниринг, 2011. – 528 с.

14. Напалков В.И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов: справ. – М.: Интернет Инжиниринг, 2005. – 512 с.

15. Анализ процесса блокирования фильтров неметаллическими включениями // IV чтения Ш. Шокина: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. / ПГУ им. С. Торайгырова. – Павлодар, 2010. – Т. 2, № 5. – С. 173–177.

16. Суюндиков М.М. Фильтрация металла в литейной форме // Сб. материалов по фильтрам, эффективности применения, опыту использования в отечественной и зарубежной практике. – М., 2005. – С. 11.

17. Цаплин А.И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2008. – 230 с.

18. Введение в математическое моделирование: учеб. пособие / П.В. Трусов [и др.]. – М.: Логос, 2004. – 440 с.

19. Ловцов Д.П. Влияние неметаллических включений на образование газовой пористости // Литейное производство. – 1955. – № 12. – С. 18–20.

20. Фильтрующая пенокерамика для расплавов цветных металлов / Е.Н. Веричев, Б.С. Черепанов, Л.С. Опалейчук [и др.] // Труды НИИ стройкерамика. – 2008. – № 5. – С. 85–91.

21. Беркман А.С. Пористая проницаемая керамика. – М.: Госстройиздат, 1959. – 170 с.

22. Гузман И.Я. Высокоогнеупорная пористая керамика. – М.: Металлургия, 1971. – 208 с.

23. Бесфосфатные пенокерамические фильтры для очистки алюминиевого расплава в заготовительном литье / С. Аубрей, Р. Олсон, А. Кучменко, Д.Д. Смит // SELEE Corporation, США. – 1974. – № 3. – С. 55–69.

24. Степанова Т.Н., Гильманшина Т.Р., Падалка В.А. Основы получения отливок из сплавов цветных металлов. – Красноярск, 2012. – 201 с.

25. Смирнова К.А. Пористая керамика для фильтрации и аэрации. – М.: Госстройиздат, 1968. – 171 с.

References

1. Kul'met'eva V.B., Porozova S.E., Smetkin A.A. Perspektivnye kompozitsionnye i keramicheskie materialy [Perspective Composite and Ceramic Materials]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 276 p.

2. Oglezneva S.A. Materialovedenie i tekhnologii sovremennykh i perspektivnykh materialov: ucheb. Posobie [Material science and technology of modern and promising materials]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2012, 307 p.

3. Ignatenkova V.V., Bespalov A.V., Grunskii V.N. et al. Reologicheskie svoystva korundovogo shlikera [Rheologi-

cal properties of corundum slicker]. Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii, 2009, vol. XXIII, no. 2, pp. 77–80.

4. Bereznoi D.V., Varfolomeev M.S., Moiseev K.V. et al. Sistemy komp'yuternogo modelirovaniia ProCAST kompanii ESI GROUP v obrazovatel'noi i nauchnoi deiatel'nosti kafedry SAPR I TLP [Systems of computer modeling ProCAST of ESI GROUP company in educational and scientific activity of CAD and TLP department.]. *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2001, no. 1, pp.103–106.

5. Sokolova O.O., Smetannikov O.Iu. Chislennoe modelirovanie zatverdevaniia i struktury metallichesкого slitka [Numerical simulation of the hardening and structure of a metal ingot]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 1, pp. 152–167.

6. Albu A.F., Zubov V.I. Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie protsessa kristallizatsii metalla v liteinnoe dele [Mathematical modeling and study of metal crystallization process in the foundry business]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 2007, vol. 47, no. 5, pp. 882–902.

7. Turishchev V.V. Modelirovanie liteinykh protsessov: chto vybrat'? [Modeling of casting processes: what to choose?]. *SAPR i grafika*, 2005, no. 11, pp. 30–35.

8. Matvienko O.V., Ushakov V.M., Evtiushkin E.V. Matematicheskoe modelirovanie turbulentsnogo perenosа dispersnoi fazy v turbulentsnom potoke [Mathematical modeling of the turbulent transfer of the disperse phase in the turbulent flow]. *Vestnik Tomskogo gos. ped. univsiteta*, 2004, iss. 6 (43), pp. 50–54.

9. Sugak E.V. Imitatsionnoe modelirovanie turbulentsnykh zakruchennykh potokov gaza [Simulation of the turbulent twisted gas flows]. *Fundamental'nye osnovy mekhaniki*, 2018, no. 3, pp. 78–83.

10. V.N. Antsiferov, A.A. Makarov, A.M. Khanov et al. Modeli i svoystva vysokoporistykh iacheistykh materialov [Models and properties of the high-rise cellular materials]. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 3, pp. 5.

11. Kоротков V.G. Rafinirovanie liteinykh aliuminievykh spлавov [Refining of casting aluminium alloys]. Moscow: Mashgiz, 1963, 127 p.

12. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi [Basics of Heat Transfer]. Moscow: Energiia, 1977, 126 p.

13. Makarov G.S. Slitki iz aliuminievykh spлавov s magniemi i kremniem dlia pressovaniia. Osnovy proizvodstva [Aluminium alloy ingots with magnesium and silicon for pressing. The bases of production]. Moscow: Internet Inzhiring, 2011, 528 p.

14. Napalkov V.I. Nepreryvnoe lit'e aliuminievykh spлавov: справ. [Continuous casting of aluminium alloys: reference]. Moscow: Internet Inzhiring, 2005, 512 p.

15. Analiz protsessа blokirovaniia fil'trov nemetallicheskimii vklucheniiami [Analysis of the filter blocking process by non-tallic inclusions]. *IV chteniia Sh. Shokina: sb. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Pavlodar*, 2010, vol. 2, no. 5, pp. 173–177.

16. Suiundikov M.M. Fil'trovanie metalla v liteinoi forme [Filtering of metal in the lithocast form]. Sbornik materialov po fil'tram, effektivnosti primeneniia, opyту ispol'zovaniia v otechestvennoi i zarubezhnoi praktike. Moscow, 2005, pp. 11.

17. Tsaplin A.I. *Teplofizika v metallurgii* [Thermophysics in metallurgy: a training manual]. Perm', 2008, 230 p.

18. P.V. Trusov et al. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie: ucheb. posobie* [Introduction to the mathematical modeling]. Moscow: Logos, 2004, 440 p.

19. Lovtsov D.P. *Vliianie nemetallicheskih vklucheni na obrazovanie gazovoi poristosti* [Influence of non-metallic inclusions on gas porosity formation]. *Liteinoe proizvodstvo*, 1955, no. 12, pp. 18–20.

20. Verichev E.N., Cherepanov B.S., Opaleichuk L.S. et al. *Fil'truishchaia penokeramika dlia rasplavov tsvetnykh metallov* [Filtering foam-ceramics for the non-ferrous metal melts]. *Trudy NII stroikeramika*, 2008, no. 5, pp. 85–91.

21. Berkman A.S. *Poristaia pronitsaemaia keramika* [Porous permeable ceramics]. Moscow: Gosstroizdat, 1959, 170 p.

22. Guzman I.Ia. *Vysokoogneupornaia poristaia keramika* [High-resistant porous ceramics]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 208 p.

23. Aubrei S., Olson R., Kuchmenko A., Smit D.D. *Besfosfatnye penokeramicheskie fil'try dlia ochistki aluminievogo rasplava v zagotovitel'nom lit'e* [Phosphate-free foam-ceramic filters for the aluminum melt cleaning in the blank casting]. *SELEE Corporation, SShA*, 1974, no. 3, pp. 55–69.

24. Stepanova T.N., Gil'manshina T.R., Padalka V.A. *Osnovy polucheniia otlivok iz splavov tsvetnykh metallov* [Basics of obtaining castings from alloys of non-ferrous methalls]. Krasnoiarsk, 2012, 201 p.

25. Smirnova K.A. *Poristaia keramika dlia fil'tratsii i aeratsii* [Porous ceramics for filtration and aeration]. Moscow: Gosstroizdat, 1968, 171 p.

Получено 17.02.2020

Опубликовано 25.03.2020

Сведения об авторах

Безденжных Иван Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: FearFrag@icloud.com.

Матыгуллина Елена Вячеславовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: matik68@rambler.ru.

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

About the authors

Ivan S. Bezdenzhnykh (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: FearFrag@icloud.com.

Elena V. Matygullina (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: matik68@rambler.ru.

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