

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ПОЛИСТИРОЛА В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИ ЛГМ

А.З. Исагулов, Т.В. Ковалёва, Св.С. Квон, В.Ю. Куликов, Е.П. Щербакова
*Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Республика Казахстан*

Основным материалом для изготовления моделей при литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) в настоящее время является литейный полистирол мелких фракций порядка 0,4–0,7 мм. Недостатком этого материала является его достаточно высокая стоимость, что определяет и последующую относительно высокую стоимость отливки, полученной методом ЛГМ. Целью данного исследования являлось изучение возможности замены вторичного полистирола в составе материала для производства моделей при ЛГМ.

Суть исследования заключалась в следующем: вторичный полистирол фракции 0,3–0,5 мм смешивается с литейным полистиролом марки Т180F в соотношениях от 10 до 50 % по массе шихты. После перемешивания смесь подвспенивается паром и просушивается в течение 15 мин при температуре 30 °С. Затем вспененный полистирол вдвигается в пресс-формы, после чего заполненные пресс-формы помещаются в автоклав и выдерживаются до полного спекания гранул полистирола. Готовые модели охлаждаются до комнатной температуры. Затем осуществляется окраска блоков моделей, которая производится в один слой специальным противопожарным покрытием путем окунания в ванну. Сушка окрашенных модельных блоков производится в сушильной камере при температуре 45–65 °С в течение 2,5–3,5 ч.

Определено, что при увеличении доли вторичного полистирола до 50 % шероховатость поверхности модели резко возрастает (на 45 % по сравнению с эталоном), что исключает возможность его использования сверх указанного количества.

Также были проведены исследования микроструктуры и распределение полей напряженности в отливках, полученных указанным способом. Проведенные анализы показали отсутствие явных внутренних дефектов, таких как пористости, раковины, зоны сегрегации неметаллических включений и дендритного строения.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования вторичного строительного полистирола в составе материала для моделей при ЛГМ. Оптимальным является количество порядка 40, что обеспечивает высокое качество отливки.

Ключевые слова: модель, пенополистирол, вторичные гранулы, напряжение, структура.

Введение

Важным вопросом производства до сих пор является изготовление качественных литых заготовок различных сплавов и геометрических параметров [1–5]. Одним из распространенных способов изготовления качественных отливок является литье по газифицируемым моделям (ЛГМ).

Материалом для изготовления моделей при литье ЛГМ в настоящее время является литейный полистирол мелких фракций порядка 0,4–0,7 мм [6–8]. Такая величина фракции необходима для устранения склонности вспененного полистирола к слипанию, возникаю-

щему в результате взаимодействия между гранулами. Модели, получающиеся в результате использования этого материала, отличаются хорошей прочностью, высокой газопроницаемостью и качеством поверхности, что обеспечивает в дальнейшем высокое качество отливки. Недостатком этого материала является его достаточно высокая стоимость, что определяет и последующую относительно высокую стоимость отливки, полученной методом ЛГМ.

В ряде исследований [9–12] предлагается использовать в качестве материала смесь литейного полистирола и вторичного, перерабо-

танного из отходов строительного полистирола. Количество вторичного полистирола варьируется в зависимости от размера и массы модели, рекомендуемая фракция – 0,3–0,5 мм.

Экспериментальная часть

Целью данного исследования являлось изучение влияния количества вторичного полистирола в составе материала для производства моделей при ЛГМ на некоторые параметры получаемых моделей и качество последующей отливки.

Технологический процесс проводился с ранее определенными параметрами [13–15]. Вторичный полистирол фракции 0,3–0,5 мм смешивался с литейным полистиролом марки Т180F в соотношениях от 10 до 50 % по массе шихты. После перемешивания смесь подвспенивалась паром и просушивалась в течение 15 мин при температуре 30 °С. Затем вспененный полистирол вдвухался в пресс-формы, заполненные пресс-формы помещались в автоклав и выдерживались до полного спекания гранул полистирола. Готовые модели извлекались и охлаждались до комнатной температуры. Следующим этапом технологии является окраска блоков моделей. Окраска производилась в один слой специальным противогригарным покрытием путем окунания в ванну; при сложной конфигурации отливок окраску можно производить обливом. Сушка окрашенных модельных блоков производилась в сушильной камере при температуре 45–65 °С в течение 2,5–3,5 ч.

Перед окраской измерялась шероховатость поверхности моделей, полученных при разном соотношении вторичного и литейного полистирола. Шероховатость измеряли портативным измерителем шероховатости TR 100 согласно ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности модели является важным параметром качества модели, так как в последующем ше-

роховатость модели во многом определяет шероховатость поверхности готовой отливки [16].

Кроме шероховатости поверхности также определялась скорость горения и прочность модели. Скорость горения определялась по методике, описанной в ТУ 2214-126-05766801-2003 «Полистирол. Технические условия», предел прочности на сжатие – на испытательной машине INSTRON-100.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований приведены в таблице. В эксперименте данная технология реализовалась для модели «Бронева плита».

Как видно из приведенных результатов, чистота поверхности практически не меняется в образцах 1–4 и остается близкой к эталону, расхождение составляет около 5 %. Однако при увеличении доли вторичного полистирола до 50 % шероховатость поверхности модели резко возрастает – примерно на 45 % по сравнению с эталоном. Этот факт, по-видимому, связан с агрегацией частиц вторичного полистирола в процессе вспенивания, так как его частицы обладают ровной сферической поверхностью и имеют более высокую склонность к слипанию, чем частицы литейного полистирола.

Систему литейный полистирол – вторичный полистирол можно рассматривать как двухфазную систему. При содержании литейного полистирола выше 50 % последний выступает как матрица с равномерно распределенными включениями вторичного полистирола; при увеличении доли вторичного полистирола компоненты меняются ролями и матрицей выступает вторичный полистирол, который определяет основные свойства системы.

Надо отметить, что введение вторичного полистирола в количестве 10–20 % не окажет значительного влияния на себестоимость модели, поэтому практический интерес пред-

Свойства моделей с разным содержанием вторичного полистирола

Номер образца	Количество вторичного полистирола, % масс.	Шероховатость поверхности, мкм	Скорость сгорания, г/с	Предел прочности на сжатие, МПа
0	0	37	2,9	0,48
1	10	35	2,7	0,46
2	20	36	2,5	0,43
3	30	37	2,2	0,41
4	40	39	2,1	0,39
5	50	58	1,8	0,30
6	60	65	1,7	0,28



а



б

Рис. 1. Модель № 4 отливки (а); отливка «Броневая плита», полученная с использованием модели № 4 (б)

ставляют образцы с большим содержанием вторичного полистирола.

На базе модели № 4 была выплавлена отливка «Броневая плита» из стали 30ХГСЛ (рис. 1). Для оценки качества отливки использовали метод неразрушающего контроля – метод определения полей напряжений. Оценка полей напряжений позволяет косвенно судить о наличии внутренних дефектов в теле отливки, таких как наличие пористости, зон ликвации и скопления неметаллических включений, неоднородности структуры по величине зерна, анизотропии свойств [8].

Определение зон концентрации напряжений в образцах производилось методом магнитометрической диагностики, основанным на измерении величины собственного магнитного поля металлического образца и выяв-

лении аномальных зон магнитного поля, связанных с дефектными участками металла.

Для исследований использовался феррозондовый магнитометр со сканирующим устройством 1-8М. Величина и характер изменений напряжённости магнитного поля рассеяния H_p свидетельствуют о наличии или отсутствии дефектов в теле отливки. Метод имеет ограничения, так как не позволяет достоверно определять поля напряжений в крупногабаритных отливках, имеющих изометричные размеры в трех измерениях. В данном случае (отливка «Броневая плита») применение метода оправданно, так как толщина плиты – 120 мм, что входит в диапазон допустимых измерений.

Обработка данных производилась с помощью программы MMM-System версии 3.0. На рис. 2, 3 приведены магнитограмма и гра-

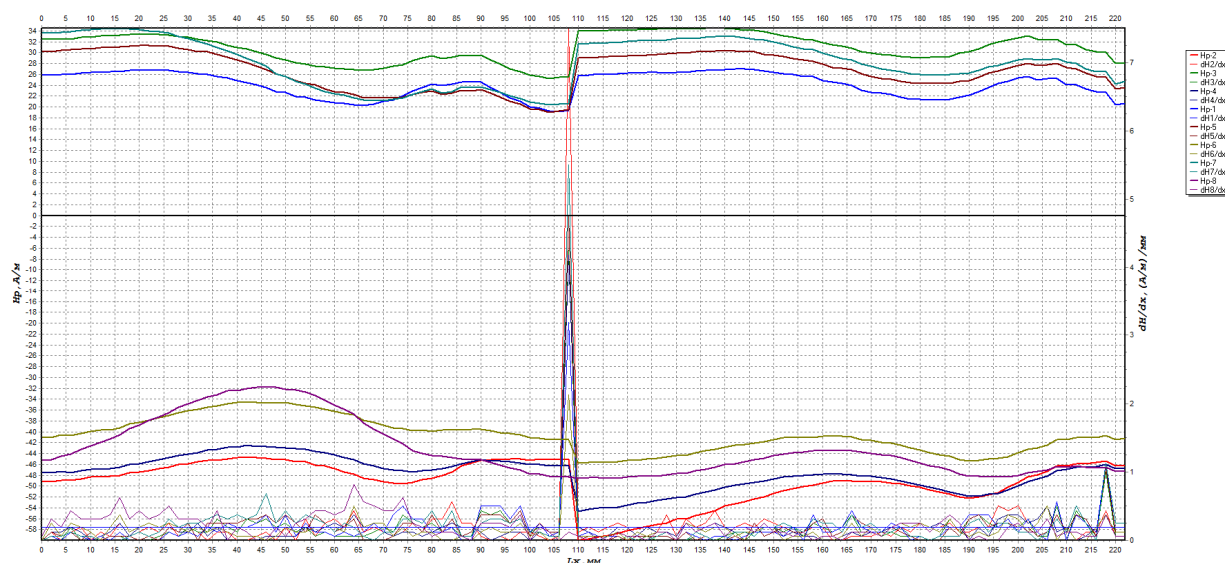


Рис. 2. Магнитограмма опытной отливки «Броневая плита»

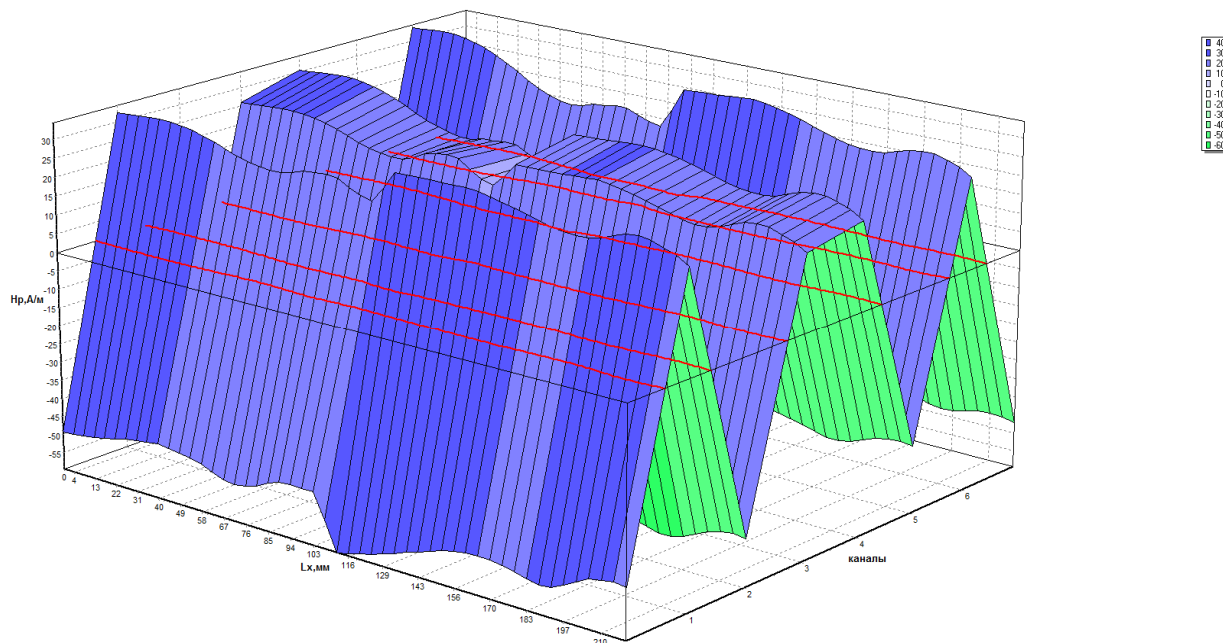


Рис. 3. Трёхмерный график распределения нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_p отливки «Броневая плита»

фик распределения поля напряжений в опытной отливке.

Как видно из приведенных графиков, распределение магнитного поля H_p по всей длине образца – равномерное, существенных магнитных аномалий не наблюдается.

Максимальный показатель напряжённости магнитного поля H_p не превысил 36 А/м, интенсивности изменения поля по длине dH/dx – не выше 8,2 (А/м)/мм.

Относительно ровный и пологий характер распределения полей напряженности свидетельствует об отсутствии явных внутренних

дефектов в теле отливки, таких как пористость и газовые раковины; также можно говорить об отсутствии зон скопления неметаллических включений, однородности структуры по зерну.

Для сравнения на рис. 4, 5 приведены магнитограммы и график полей напряженности отливки «Броневая плита», полученных методом ПСС.

Как видно из рис. 5, распределение магнитного поля образца H_p – равномерное, однако в зоне $L_x = 40–80$ мм имеются отрицательные аномалии с амплитудой до 110 А/м.

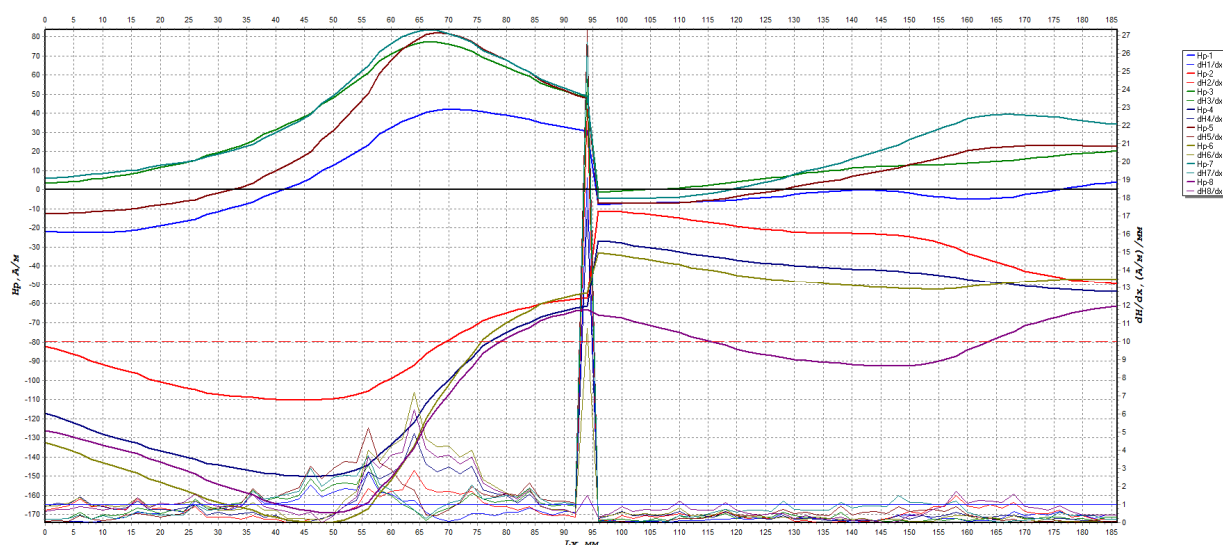


Рис. 4. Магнитограмма отливки «Броневая плита», полученная методом ПСС (эталон)

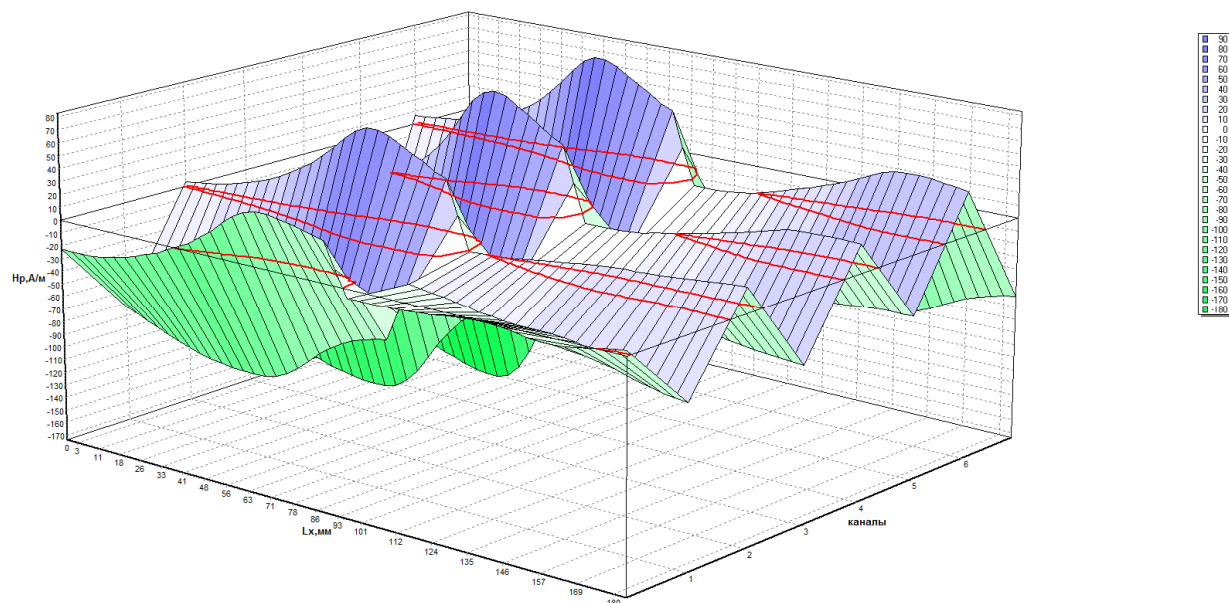
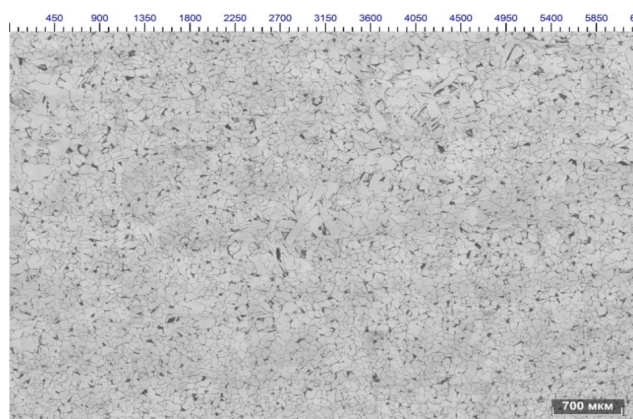
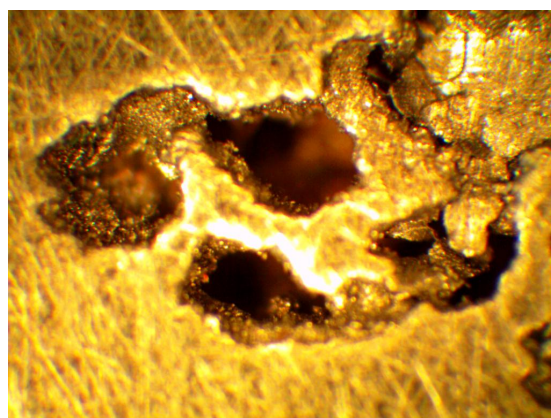


Рис. 5. Трёхмерный график распределения нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_p отливки «Броневая плита», полученной методом ПСС (эталон)



а)



б)

Рис. 6. Микроструктура опытной отливки «Броневая плита»: а – опытная отливка, $\times 500$; б – микроструктура эталона, $\times 5000$

Максимальный показатель напряжённости магнитного поля H_p составил около 83 А/м, интенсивности изменения поля по длине $dH/dx \sim 23$ (А/м)/мм = $23 \text{ А/м}^2 \cdot 10^3$. Характер и параметры полей напряженности свидетельствуют о наличии дефектов в зоне 40–80 мм, возможно скопление неметаллических включений или пористости.

Для подтверждения выводов, сделанных на основании результатов метода магнитной памяти (ММП), провели анализ микроструктур опытной отливки и эталона. Были изготовлены металлографические шлифы, травление проводили с помощью 10%-ного раствора азотной кислоты, увеличение $\times 500$ (рис. 6).

Выводы

Сравнительный анализ микроструктур подтвердил выводы, сделанные на основе метода ММП. Микроструктура опытной отливки представлена однородной структурой с достаточно мелким зерном, балл 7–8. В исследуемых полях зрения отсутствуют дефекты в виде ситовидной пористости, скопления неметаллических включений, форма зерна изометрично развита, отсутствуют дендриты и вытянутые зерна.

В эталоне (отливка, полученная методом ПСС) обнаружена ситовидная пористость, что и явилось причиной появления отрицательных отклонений амплитуды магнитного поля.

Проведенный анализ полей напряженности и микроструктуры отливки, выплавленной с использованием модели № 4, показал:

– во-первых, высокое металлургическое качество отливки, полученной с использованием модели №4: отсутствие пористости, зон сегрегации неметаллических включений и дендритного строения; наличие мелкого и изометричного зерна;

– во-вторых, возможность использования вторичного полистирола в количестве 35–45 % фракцией 0,3–0,5 мм в составе материала для изготовления моделей при методе ЛГМ.

Замена литейного полистирола на вторичный полистирол в количестве 35–40 % позволит снизить себестоимость модели. По предварительным расчетам себестоимость модели снизится на 20–25 %, при этом качество модели, а значит, и самой отливки остаются неизменными.

Литература

1. Balint, T.S. Designing the design at JPL'S innovation foundry / T.S. Balint, A. Freeman // *Acta Astronautica*. – 2017. – Vol. 137. – P. 182–191. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.04.026
2. Javidani, M. Impact of the main casting process parameters on floating crystals in Al alloy DC-cast ingots / M. Javidani, M. Fortier, J. Colbert // *Minerals, Metals and Materials Series*. – 2019. – Cod 224839. – P. 451–459. DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_58
3. Влияние способа формовки на качество алюминиевых сплавов, изготовленных методом ЛГМ / В.Б. Деев, А.С. Юдин, К.В. Пономарева и др. // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. – 2014. – № 32. – С. 94–97.
4. Improving production technology of tube steel grades in converter process / P.V. Kovalev, S.V. Ryaboshuk, A.Z. Issagulov et al. // *Metalurgija (Croatia)*. – 2016. – Vol. 55, no. 4. – P. 715–718.
5. Нестеров, Н.В. Система создания разрядки в опоках для литья по газифицируемым моделям / Н.В. Нестеров, Б.С. Воронцов, Л.М. Савиных // *Литейное производство*. – 2016. – № 7. – С. 30–34.
6. Кукса, А.В. Универсальная лабораторная установка для получения гранул пенополистирола и изготовления из них газифицируемых моделей для ЛГМ / А.В. Кукса, Н.А. Кидалов, В.Ф. Щипанов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2010. – № 4 (64). – С. 61–65.
7. Дорошенко, В.С. Получение крупных стальных отливок по газифицируемым моделям с использованием наливной формовки / В.С. Дорошенко, В.А. Болюх // *Тяжелое машиностроение*. – 2010. – № 10. – С. 16–20.
8. Effect of temperature, heating rate and zeolite-based catalysts on the pyrolysis of high impact polystyrene (HIPS) waste to produce fuel-like products / Z. Tamri, A.V. Yazdi, M.N. Haghighi et al. // *Polyolefins Journal*. – 2019. – Vol. 6 (1). – P. 43–52. DOI: 10.1016/j.jaap.2018.05.001
9. Дорошенко, В.С. О литье по термокомпактируемым моделям / В.С. Дорошенко, В.О. Шинский, О.А. Тихонова // *Литейное производство*. – 2014. – № 11. – С. 16–20.
10. Овчаренко, П.Г. Литье по газифицируемым моделям композиционных отливок твердотельных теплообменников / П.Г. Овчаренко, А.Ю. Лецев // *Литейное производство*. – 2015. – № 5. – С. 26–28.
11. Wu, C. Influence of differential roll rotation speed on evolution of internal porosity in continuous casting bloom during heavy reduction / C. Wu, C. Ji, M. Zhu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 271. – P. 651–659. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.041
12. Kinetic model for reactions of indole under supercritical water gasification conditions / Y. Guo, S. Wang, C.M. Huelsman, P.E. Savage // *Chemical Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 241. – P. 327–335.
13. Исследование структуры пенополистирола при литье по газифицируемым моделям / Св.С. Квон, В.Ю. Куликов, А.З. Исагулов и др. // *Литейное производство*. – 2017. – № 7. – С. 18–20.
14. Совершенствование литья по газифицируемым моделям / А.З. Исагулов, В.Ю. Куликов, С. Laurent и др. // *Литейное производство*. – 2014. – № 4. – С. 16–18.
15. Using high-chromium iron as material for production of the equipping components of mine shafts / S.S. Kvon, V.Y. Kulikov, T.S. Filipova, A.E. Omarova // *Metalurgija (Croatia)*. – 2016. – Vol. 55, no. 2. – P. 206–208.
16. Влияние краски на качество чугуновых и стальных отливок сложной конфигурации при ЛГМ / А.З. Исагулов, В.Ю. Куликов, Н.И. Твердохлебов и др. // *Литейное производство*. – 2015. – № 7. – С. 17–19.

Исагулов Аристотель Зейнуллинович, д-р техн. наук, профессор, первый проректор, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; a.isagulov@kstu.kz.

Ковалёва Татьяна Викторовна, магистр, преподаватель кафедры нанотехнологий и металлургии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; sagilit@mail.ru.

Квон Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, профессор кафедры нанотехнологий и металлургии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; svetlana.1311@mail.ru.

Куликов Виталий Юрьевич, канд. техн. наук, профессор кафедры нанотехнологий и металлургии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; mlpikm@mail.ru.

Щербакова Елена Петровна, доктор PhD, старший преподаватель кафедры нанотехнологий и металлургии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; sherbakova_1984@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 мая 2019 г.

DOI: 10.14529/met190305

USE OF SECONDARY POLYSTYRENE AS THE MATERIAL COMPONENT FOR PRODUCTION OF MODELS UNDER LFC

A.Z. Issagulov, a.isagulov@kstu.kz,

T.V. Kovalyova, sagilit@mail.ru,

Sv.S. Kvon, svetlana.1311@mail.ru,

V.Yu. Kulikov, mlpikm@mail.ru,

E.P. Chsherbakova, sherbakova_1984@mail.ru

Karaganda State Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Nowadays the main material for manufacturing the models for lost-foam casting (LFC) is foundry polystyrene of fine fractions of the order of 0.4–0.7 mm. The disadvantage of this material is its relatively high cost, which determines the subsequent relatively high cost of casting by the LFC method. The purpose of this study is to investigate the possibility of replacing recycled polystyrene in the composition of the material for manufacturing the LFC models.

The essence of the study is as follows: the secondary polystyrene 0.3–0.5 mm fraction is mixed with cast polystyrene of the T180F grade in the ratios from 10 to 50 % by weight of the mixture. After mixing the mixture is foamed in steam and dried within 15 minutes at the temperature of 30 °C. Then the expanded polystyrene is injected into the molds, after which the filled molds are placed in the autoclave and kept until the polystyrene granules are completely sintered. The finished models are cooled down to the room temperature. Then the blocks of the models are painted, which is done in one layer with a special nonstick coating by dipping into the bath. The painted model blocks are dried in a drying chamber at the temperature of 45–65 °C within 2.5–3.5 hours.

It has been determined that with the increase of the share of secondary polystyrene to 50 %, the surface roughness of the model increases sharply (by 45 % compared to the standard), which excludes the possibility of its use over a specified amount.

There has also been studied the microstructure and the distribution of tension fields in the castings obtained by this method. The performed analysis has shown no obvious internal defects, such as porosity, shells, non-metallic inclusions, segregation zones and dendritic structures.

Thus, the conducted research has demonstrated the possibility of using recycled polystyrene in the composition of the material for the LFC models. The optimal amount is about 40, which ensures high quality castings.

Keywords: model, expanded polystyrene, secondary granules, stress, structure.

References

1. Balint T.S., Freeman A. Designing the Design at JPL'S Innovation Foundry. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 137, pp. 182–191. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.04.026
2. Javidani M., Fortier M., Colbert J. Impact of the Main Casting Process Parameters on Floating Crystals in Al Alloy DC-Cast Ingots. *Minerals, Metals and Materials Series*, 2019, cod 224839, pp. 451–459. DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_58
3. Deev V.B., Judin A.S., Ponomareva K.V., Cecorina S.A., Alhimov V.N. [The Influence of the Molding Method on the Quality of Aluminum Alloys Made by Casting According to Gasified Models]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekci Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Otdelenie metalurgii*, 2014, no. 32, pp. 94–97. (in Rus.)
4. Kovalev P.V., Ryaboshuk S.V., Issagulov A.Z., Kulikov V.Y., Kvon S.S., Chsherbakova Y.P., Sultamurat G.I., Jironkin M.V. Improving Production Technology of Tube Steel Grades in Converter Process. *Metalurgija (Croatia)*, 2016, vol. 55, no. 4, pp. 715–718.
5. Nesterov N.V., Voroncov B.S., Savinyh L.M. [Vacuum System for Lost Foam Casting Technology]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2016, no. 7, pp. 30–34. (in Rus.)
6. Kuksa A.V., Kidalov N.A., Shhipanov V.F. [A Universal Laboratory Setup for the Production of Polystyrene Foam Granules and the Manufacture of Gasified Models from Them for Casting According to Gasified Models]. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2010, no. 4 (64), pp. 61–65. (in Rus.)
7. Doroshenko V.S., Boljuh V.A. [Obtaining Large Steel Castings According to Gasification Models Using Bulk Molding]. *Tjazeloe mashinostroenie*, 2010, no. 10, pp. 16–20. (in Rus.)
8. Tamri Z., Yazdi A.V., Haghighi M.N., Abbas-Abadi M.S., Heidarinassab A. Effect of Temperature, Heating Rate and Zeolite-Based Catalysts on the Pyrolysis of High Impact Polystyrene (HIPS) Waste to Produce Fuel-Like Products. *Polyolefins Journal*, 2019, vol. 6 (1), pp. 43–52. DOI: 10.1016/j.jaap.2018.05.001
9. Doroshenko V.S., Shinskij V.O., Tihonova O.A. [About Casting Process for Thermally Compactability Patterns]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2014, no. 11, pp. 16–20. (in Russ.)
10. Ovcharenko P.G., Leshhev A.Ju. [Manufacturing of Composite Castings Solid heat Exchanger by Casting for Consumable Pattern]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2015, no. 5, pp. 26–28. (in Russ.)
11. Wu C., Ji C., Zhu M. Influence of Differential Roll Rotation Speed on Evolution of Internal Porosity in Continuous Casting Bloom during Heavy Reduction. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 271, pp. 651–659. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.041
12. Guo Y., Wang S., Huelsman C.M., Savage P.E. Kinetic Model for Reactions of Indole under Supercritical Water Gasification Conditions. *Chemical Engineering Journal*, 2014, vol. 241, pp. 327–335. DOI: 10.1016/j.cej.2013.11.012
13. Kvon Sv.S., Kulikov V.Ju., Isagulov A.Z., Arinova S.K., Kovaljova T.V. [Examination of Polystyrene Foam in the Gasifiable Pattern Casting]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2017, no. 7, pp. 18–20. (in Russ.)
14. Isagulov A.Z., Kulikov V.Ju., Laurent C., Tverdohlebov N.I., Shherbakova E.P. [Improved Method for Producing Cast Billets Casting Method on Gasified Models]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2014, no. 4, pp. 16–18. (in Russ.)
15. Kvon S.S., Kulikov V.Y., Filippova T.S., Omarova A.E. Using High-Chromium Iron as Material for Production of the Equipping Components of Mine Shafts. *Metalurgija (Croatia)*, 2016, vol. 55, no. 2, pp. 206–208.

16. Isagulov A.Z., Kulikov V.Ju., Tverdohlebov N.I., Shherbakova E.P., Kovaljova T.V. [Effect of Wash on the Quality of Intricate Iron and Steel Castings in Expanded Pattern Casting]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2015, no. 7, pp. 17–19. (in Russ.)

Received 21 May 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Использование вторичного полистирола в качестве компонента материала для изготовления моделей при ЛГМ / А.З. Исагулов, Т.В. Ковалёва, Св.С. Квон и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 44–52. DOI: 10.14529/met190305

FOR CITATION

Issagulov A.Z., Kovalyova T.V., Kvon Sv.S., Kulikov V.Yu., Chsherbakova E.P. Use of Secondary Polystyrene as the Material Component for Production of Models under LFC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 44–52. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190305
