

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-24-31](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-24-31)

Зубков А.А., Туркин И.С., Феоктистов Н.А., Ахметов И.И., Кузьяев Е.А., Юмабаев А.А., Штыленко Е.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК МЕТОДОМ ЛГМ

Аннотация. Традиционное литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) с использованием пенополистирола (ППС) требует изготовления дорогостоящей специализированной оснастки и пресс-форм. Это делает данный метод рентабельным преимущественно в условиях крупносерийного производства, в то время как мелкосерийный выпуск деталей остается слишком дорогим. В статье представлено комплексное исследование процесса литья по газифицируемым моделям с применением 3D-печати для изготовления легковесных газифицируемых моделей. В качестве модельного материала применялись полилактид (PLA), полилактид низкой плотности (PLA-LW) и полиметилметакрилат (PMMA), из которых 3D-принтером печатались тонкостенные образцы. Выполнена заливка чугуна сплава СЧ20 по моделям из PLA, PLA-LW, PMMA и традиционного ППС. Проведен сравнительный анализ микроструктуры. Для проведения теоретического анализа в системе «форма-модель-отливка» использован программный комплекс «ПолигонСофт». Опробован метод литья с применением печатных 3D-моделей из пластика с последующей заливкой чугуна, что позволяет полностью исключить стадию получения пресс-форм. Установлено, что характеристики отливок на основе печатных 3D-моделей не уступают традиционным. Предложенная комбинированная технология существенно снижает временные и финансовые затраты на технологическую подготовку мелкосерийного производства сложных металлических отливок, обеспечивая качество изделий на уровне традиционных процессов литейного производства.

Ключевые слова: литье по газифицируемым моделям (ЛГМ), ПолигонСофт, полилактид (PLA), газопроницаемость, микроструктура отливки

Введение

Классическая технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) обладает рядом неоспоримых преимуществ, к которым относятся высокая размерная точность получаемых отливок, принципиальная возможность воспроизведения деталей сложной пространственной конфигурации, а также устранение операций изготовления и сборки стержней, характерных для традиционного песчаного литья [1].

Однако данная технология сопряжена с существенными технологическими ограничениями. К числу ключевых недостатков относятся длительный цикл изготовления модели, обусловленный значительной продолжительностью процесса сушки нанесенного противопопригарного покрытия, которая может достигать нескольких недель, а также необходимостью производства дорогой пресс-формы. Последний фактор является энергоемким и представляет собой технологически ограничивающее звено, делающее экономически и технологически нецелесообразным изготовление единичной отливки или малой партии с использованием моделей из пенополистирола (ППС).

Данные ограничения формируют актуальный запрос со стороны литейной отрасли на разработку и внедрение новых подходов к производству моделей. В этом контексте значительный потенциал демонстрирует объединение технологии ЛГМ с методами аддитивного производства. В частности, существуют полимерные материалы для 3D-печати (например, PLA, PLA-LW, PMMA), подверженные термической деструкции, аналогичной газификации ППС.

Тем не менее для перевода таких материалов из разряда экспериментальных в область серийного промышленного использования необходимы комплексные и системные исследования. Эти исследования должны быть направлены на изучение поведения аддитивно изготовленных моделей в полном технологическом цикле ЛГМ, включая их взаимодействие с противопопригарным покрытием и кинетику газовыделения при контакте с расплавом, а также влияние на конечные свойства отливки.

Целью данного исследования является проведение системного анализа и комплексная оценка традиционного и комбинированного методов ЛГМ при получении отливок из серого чугуна. Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) сравнительный анализ технологических процессов получения моделей из ППС, PLA, PLA-LW, PMMA;
- 2) верификация технологических параметров методом компьютерного моделирования в программе «ПолигонСофт»;
- 3) экспериментальное исследование процесса заливки и газификации PLA-моделей в условиях вакуумного ЛГМ;
- 4) оценка качества полученных отливок.

Материалы и методы исследования

Для создания моделей использовались следующие типы пластиков:

- PLA ООО «ТРАЕКТОРИЯ 3Д»;
- PLA-LW ePLA-LW ESUN;
- PMMA REC Cast FOR METAL CAST.

Данные пластики выбраны в силу своих термодеструкционных свойств, в частности температуры

начала активного разложения, сопоставимой с температурным режимом процесса заливки чугуна.

В качестве материала для традиционного подхода использовался литейный полистирол марки ПСВ-С (Полистирол, ТУ 2214-033-05762341-2009, с изм. 7, 8) фракция 0,6-1,0 мм, характеризующийся температурой стеклования в диапазоне 80-90°C, началом активной газификации при 275-300°C.

Формовочным материалом во всех случаях служил сухой кварцевый песок Балашейского месторождения фракции 0,63-0,70 мм.

В литейную форму заливали расплав серого чугуна марки СЧ20.

Противопригарное водное покрытие использовалось фирмы «Ставрополь ЛФ», разработанное специально для ЛГМ процесса. Оно представляет собой густую суспензию от светло-коричневого до коричневого цвета на водной основе, состоящую из минеральных наполнителей, связующих компонентов и реологических добавок. Плотность при (20±1)°C, 1,55–1,75 г/см³.

Объектом исследования выступила литейная технология с применением модельных материалов для ЛГМ.

Методика. Изготовление моделей из ППС по традиционной технологии выполнялось на универсальной ЧПУ-установке, позволяющей вырезать необходимую фигуру при помощи нагретой струны.

Модели из PLA создавались на 3D-принтере Creality по заданной CAD-модели.

Экспериментальные заливки проводились в лаборатории МГТУ им. Г.И. Носова на лабораторной установке ЛГМ, включающей виброплощадку, систему вакуумирования с рабочим разрежением порядка 0,06 МПа и индукционную тигельную печь. Стандартная процедура включала сборку модельного куста, нанесение противопригарного покрытия окунанием, сушку, послойную засыпку опоки песком фракции 0,63 мм с виброуплотнением, вакуумирование, заливку расплавом серого чугуна марки СЧ20 и последующую выдержку отливки в форме в течение 24 ч.

Для теоретического анализа процесса литья применялся программный комплекс «ПолигонСофт», позволивший провести моделирование гидродинамических процессов заполнения формы расплавом и тепловых полей в системе «форма-модель-отливка». Целью моделирования являлось научно обоснованное планирование эксперимента и минимизации эмпирического подбора параметров.

Для комплексной оценки влияния материалов модели на процесс ЛГМ была определена газотворность PLA, PLA-LW, PMMA и ППС.

Сравнительный анализ газовыделения моделей

Анализ проводили на анализаторе углерода и воды ELTRA CW-800M MULTIPHASE. Прибор позволяет определять различные виды оксида углерода и паров воды в органических и неорганических материалах. Метод основан на одноступенчатом или многоступен-

чатом нагреве пробы в печи сопротивления до температуры 1000°C в потоке нейтрального газа или кислорода при определении количества образовавшихся газобразного оксида углерода и паров воды методом инфракрасной абсорбции.

Образец помещали в кварцевую или фарфоровую лодочку, предварительно прокаленную при 1000°C, взвешивали с погрешностью не более ±1 мг и массу вводили в память анализатора. Далее лодочку с навеской перемещали в нагретую часть печи. При температуре 1000°C из образца выделяются газы, которые с потоком азота (кислорода) проходят пылевую ловушку, потом в детектор для анализа воды и затем для удаления воды в осушитель. После этого попадают на инфракрасный твердотельный детектор для анализа углерода, находящегося в виде соединений CO₂. На табло прибора выводятся результаты в процентах.

Метод направлен на определение общего объема газов, выделяющихся единицей массы материала при его нагреве до температур, соответствующих контакту с расплавом. Это ключевой параметр, так как чрезмерное газовыделение из материала в условиях замкнутой формы ЛГМ может привести к формированию газовых раковин в теле отливки или на ее поверхности.

Газотворность Γ , см³/г, определяют по формуле

$$\Gamma = \Gamma(\text{CO}_2) + \Gamma(\text{H}_2\text{O}) = \frac{10 \cdot C_1 \cdot m \cdot V}{M(\text{CO}_2)} + \frac{10 \cdot C_2 \cdot m \cdot V_m}{M(\text{H}_2\text{O})}, \quad (1)$$

где $\Gamma(\text{CO}_2)$ – газотворность за счет образования и выделения диоксида углерода (CO₂) из материала, см³/г;

$\Gamma(\text{H}_2\text{O})$ – газотворность за счет испарения разных видов воды из материала, см³/г;

C_1 – массовая доля диоксида углерода, %;

C_2 – массовая доля воды, %;

m – масса образца, г;

V_m – молярный объем одного моля газа, м³/моль;

$M(\text{CO}_2)$ – молярная масса диоксида углерода, моль/г;

$M(\text{H}_2\text{O})$ – молярная масса воды, моль/г.

Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1
Газовыделение ППС и PLA

Материал	Вес модели	$\Gamma(\text{CO}_2)$, см ³ /г	$\Gamma(\text{H}_2\text{O})$, см ³ /г	$\Gamma_{\text{общ}}$, см ³ /г	В эксперименте, всего см ³ /г
ППС	12 г	1291	663	1954	23,448
PLA	33 г	882	633	1515	49,995
Разница (%)	+175%	-31,7%	-4,5%	-22,5%	+113%
PLA-LW		870	598	1468	
PLA-LW 190 °C		880	660	1540	
PLA-LW 210 °C		765	428	1193	
PLA-LW 250 °C		782	569	1351	
PLA-LW 270 °C		800	656	1456	
PMMA		870	598	1468	

Экспериментальная часть

Компьютерное моделирование процесса

Результаты моделирования в программе «ПолигонСофт», визуализированные в виде карт распределения скоростей и температурных полей, позволили прогнозировать зоны возможного образования дефектов и оптимизировать ключевые технологические параметры, главным образом температуру заливки и конфигурацию литниковой системы, для последующей экспериментальной проверки.

Из представленной модели видно, что образование усадочной пористости (22–100%) локализуется в стояке и порядка 1,2% в теле самой отливки, чем можно пренебречь.

Результаты моделирования показывают, что центральная часть отливки затвердевает в последнюю очередь. Кроме того, полное затвердевание происходит через 5 мин, следовательно, к этому времени должна произойти не только полная газификация модели, но и устранение следов ее деструкции в зоне расплава.

Важным моментом исследования является определение соотношения температур в системе «стояк-отливка-форма». Температура заливки 1420°C, скорость подачи металла ~1 м/с, температурный интервал кристаллизации сплава 1231,63–1158,63°C. В процессе кристаллизации, протекающем в интервале от 8,3 до 40 мин, наблюдается активный разогрев контактного слоя формы. Согласно показаниям вирту-

альной термопары, установленной в форме, температурный максимум в 854°C достигается на 25-й минуте процесса. Установлено, что центральный стояк, выполняющий функцию прибыли, сохраняет температуру в диапазоне 1350–1150°C значительно дольше периферийных участков, что обеспечивает эффективную компенсацию усадочных процессов в рабочей зоне отливки. Определены основные параметры технологии процесса, скорость остывания заливки с 1420 до 387°C составила 4,8 ч. При этом температура формы в зоне контакта остается выше и составляет около 400°C. Направленное затвердевание, визуализированное на изотермах, соответствует физическим принципам процесса, что подтверждает корректность заданных коэффициентов теплопередачи (500 Вт/(м²·К)) и других граничных условий.

На следующем этапе исследовали газотворность модельных материалов PLA и ППС. Для PLA-LW были реализованы следующие режимы экструдирования: 190, 210, 250, 270°C.

Скорость подачи материала (экструдирования) составляла 150 мм/мин.

При одинаковой массе ППС дает в 22,5 % больше газов, чем PLA. Однако в нашем эксперименте PLA-модель весит 33 г; ее общее количество газов на 26,547 см³ больше по сравнению с ППС. Однако это не повлияло на качество заливки и не создало дефектов в виде газовых раковин в теле отливки.

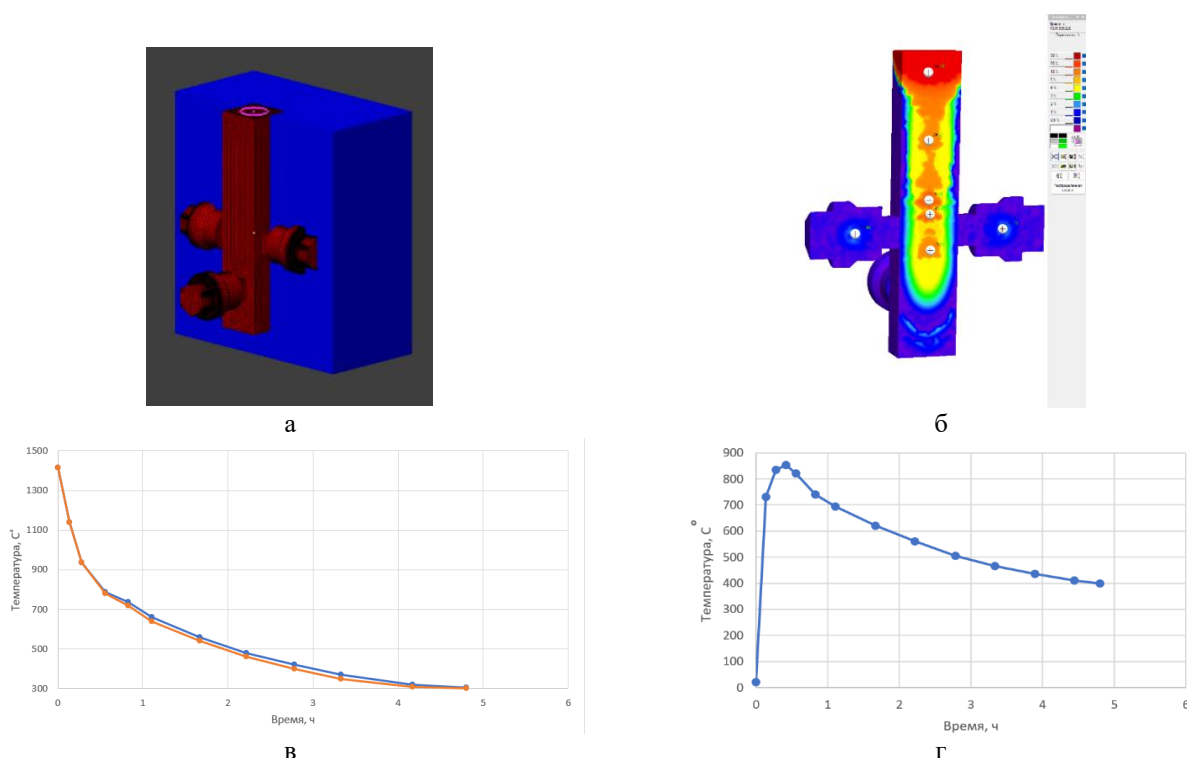


Рис. 1. Моделирование технологии изготовления отливки «пробка тампонажная»: а – сеточная модель отливки; б – карта распределения пористости в отливке (%); в – динамика остывания отливки (°C); г – динамика нагрева и остывания песчаной формы (°C)

Экспериментальная часть исследования была структурирована в два последовательных этапа, обеспечивающих переход от проверки исходной гипотезы к комплексной технологической апробации.

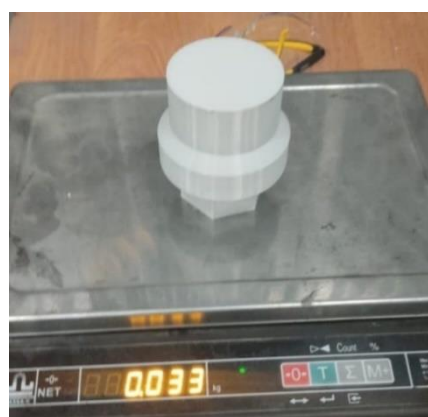
На первом этапе решалась задача подтверждения принципиальной способности материала PLA к полной газификации в контакте с жидким чугуном. С этой целью модель, полученная методом 3D-печати, заливалась в форму без применения вакуума. Качественный анализ, проведенный после выбивки, продемонстрировал отсутствие твердых остатков пластика в объеме отливки, что подтвердило пригодность материала для процессов типа ЛГМ.

Второй этап представлял собой полноценную проверку в условиях технологического цикла ЛГМ. Были изготовлены идентичные модельные блоки из PLA и традиционного ППС, включающие литниковую систему. После нанесения противопригарного покрытия и сушки осуществлялась формовка в опоке с виброуплотнением сухого песка. Заливка чугуном производилась под разрежением 0,06 МПа. После стандартного цикла охлаждения проводился сравни-

тельный анализ полученных отливок, включавший макроструктурные исследования для оценки качества поверхности и выявления внутренних дефектов.



Рис. 2. Готовый куст



а



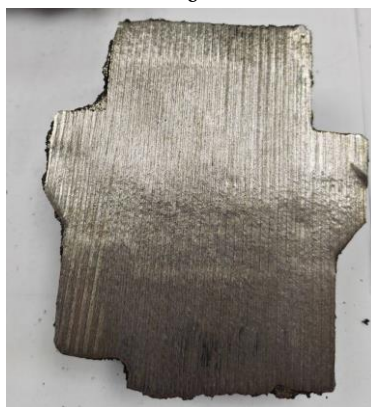
б



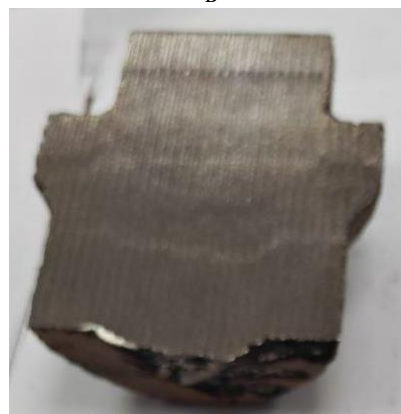
в



г



д



ж

Рис. 3. Модель и отливки по технологии ЛГМ:

а – PLA-модель на весах; б – ППС-модель на весах; в – отливка по PLA-модели; г – отливка по ППС-модели; д – внутренняя часть отливки по PLA-модели; ж – внутренняя часть отливки по ППС-модели

Анализ микроструктуры

Микроструктура отливки представлена ферритно-перлитной основой, в которой встречается вермикулярный графит. При детальном изучении графита также был обнаружен пластинчатый графит. Следует отметить, что такая структура характерна для изделий, изготовленных из вспененного полистирола, а также пластика PLA.

В пограничной зоне, непосредственно контактировавшей с литейной формой, сформирован отбелённый слой. Глубина отбелённого слоя составляет от 0,5 до 2 мм.

Структура отливки на глубине свыше 2 мм пред-

ставлена ферритно-перлитной основой. Процентное содержание графита на этой глубине составляет 2,7%, графит – вермикулярный (ВГф2, ВГф3, ВГр2, ВГ85) (рис. 4).

На глубине свыше 10 мм содержание графита составляет 1,9%, графит – пластинчатый (ПГф1, ПГр1, ПГд90, ПГ2) (рис. 3).

Сравнение микроструктур отливок, которые заливались в разные материалы, показало, что кардинальных отличий в структурах не наблюдается. Это является доказательством возможности отказа от традиционных моделей из вспененного полистирола при соответствующих технологических доработках.

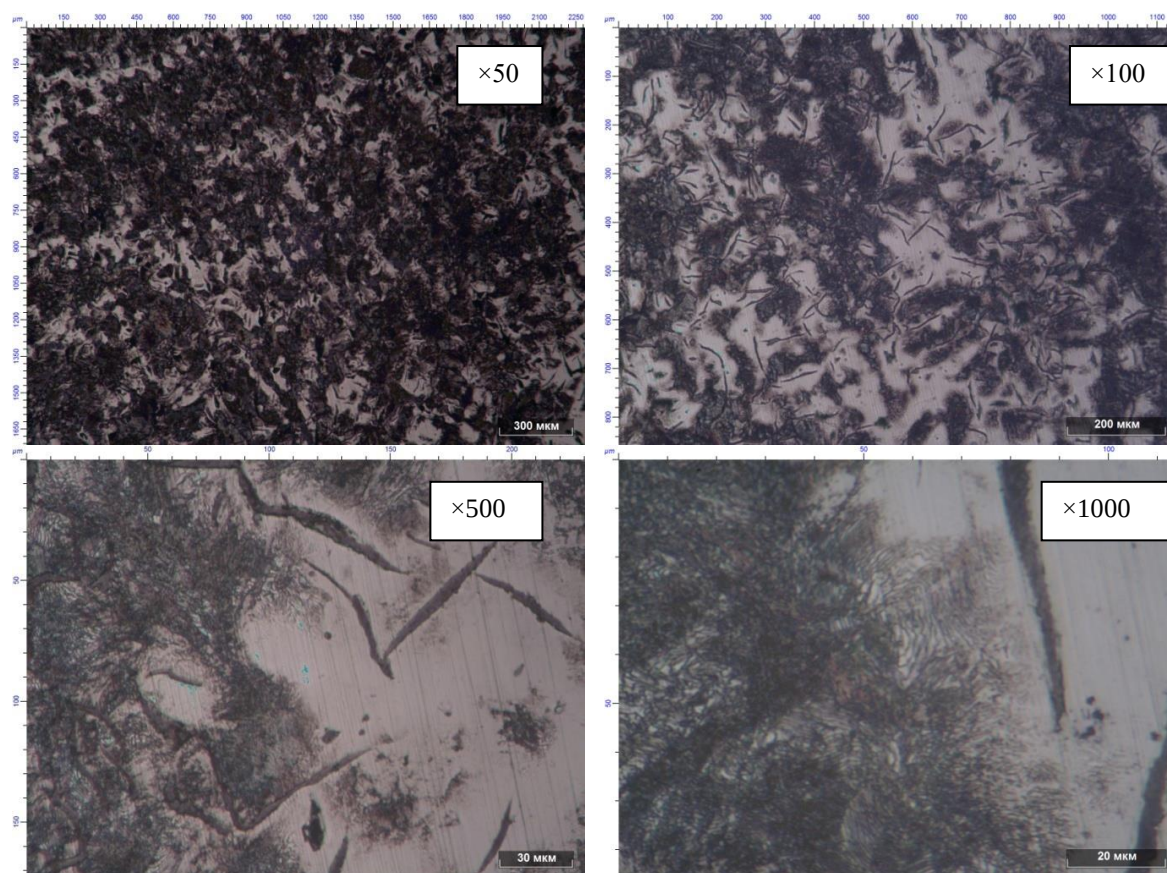


Рис. 4. Микроструктура чугуна отливки «Пробка тампонажная»



Рис. 5. Вермикулярный графит



Рис. 6. Пластинчатый графит

Исследование свойств PLA-моделей на формирование пригара

Большинство огнеупорных покрытий ЛГМ были разработаны для ППС. Пригар песка, который остается на отливке по PLA-модели, возникает из-за того, что примененное противопопригарное покрытие не подходит для такого вида пластика, оставляя непокрытые части модели, так как PLA является более полярной молекулой, чем ППС, и может проявлять другие смачивающие свойства.

Необходимо подобрать состав, который бы имел более лучшую адгезию к PLA-пластику, так как плохая адгезия при окутывании ведет к незакрытым частям модели, через которые происходит пролив жидкого металла, вследствие чего происходит налипание формовочного материала (песка).

Для решения проблемы требуются новые типы противопопригарных покрытий, химически совместимые с PLA. Возможно, на основе спирта.

Переход от водной основы к спиртовой решает сразу две фундаментальные проблемы: идеальное смачивание полярной поверхности полилактида, благодаря низкому поверхностному натяжению спиртов и отсутствие температурной деформации. PLA размягчается уже при 55–60°C, поэтому традиционная сушка водных покрытий в термощкафах часто приводит к короблению геометрии.

Поверхностное натяжение воды составляет около 72 мН/м, в то время как у изопропилового или этилового спирта оно находится в пределах 21–23 мН/м. Поверхностная энергия PLA составляет порядка 40 мДж/м². Поскольку натяжение растворителя значительно ниже энергии поверхности пластика, спиртовая суспензия идеально и равномерно растекается по модели без использования сложных комплексов ПАВ, не собираясь в капли.

Существенное влияние на формирование пригара и общее качество отливок в процессе ЛГМ оказывает не только противопопригарное покрытие, но и сам формовочный песок. Используемый в экспериментах сухой кварцевый песок Балашейского месторождения фракции 0,63–0,70 мм в целом отвечает требованиям ГОСТ 2138-91 к пескам для литья по газифицируемым моделям: содержание глинистой составляющей в нём не превышает 1,0%, что минимизирует спекаемость и сохраняет газопроницаемость формы при высоких температурах. Не менее важна форма зёрен: для достижения максимальной плотности упаковки и равномерного отвода газов зёрна должны обладать высокой сферичностью (коэффициент сферичности не ниже 0,7 по ГОСТ 29234.1-91), обеспечивающей низкое межзерновое трение и стабильную проницаемость при виброуплотнении. Однако даже при соблюдении указанных требований инертный кварцевый наполнитель остаётся пассивным элементом системы «модель–форма–отливка»: его высокая теплопроводность в контактной зоне спо-

собствует локальному переохлаждению расплава и фиксации дефектов, а химическая инертность не позволяет активно связывать продукты деструкции полимерной модели. В связи с этим перспективным направлением совершенствования технологии представляется частичная или полная замена кварцевого песка на альтернативные формовочные материалы, способные не только удерживать модель в форме, но и целенаправленно управлять тепловым режимом и газоотводом, что открывает путь к дальнейшему снижению дефектности отливок из PLA и подобных пластиков.

На основе результатов компьютерного моделирования и апробации в реальных условиях цикла ЛГМ были сформулированы следующие требования к новым противопопригарным покрытиям:

- хорошая адгезионная способность к пластику PLA;
- огнеупорность наполнителя в покрытии не менее 900°C;
- газопроницаемость – это фактическое количество газа, которое реально проходит через покрытие в единицу времени в заданных условиях. Поэтому противопопригарное покрытие должно быть способно пропускать через себя то количество газа, которое выделяет модель из пластика.

Заключение

Таким образом, многоуровневый эксперимент и исследования, объединяющие вычислительный эксперимент, лабораторную апробацию, обеспечил получение научно обоснованных результатов, позволяющих объективно оценить потенциал комбинированной технологии ЛГМ.

В ходе работы при помощи ПО «ПолигонСофт» были рассчитаны температурные поля и выявлены зоны вероятного образования дефектов. Сравнительный анализ макроструктуры позволил оценить качество отливок из разных модельных форм, а определение газотворности материалов – сформулировать четкие требования к противопопригарному покрытию.

Доказано, что использование 3D-печати позволяет отказаться от дорогостоящей пресс-оснастки для традиционных моделей из пенополистирола (ППС), делая технологию экономически эффективным и быстрым решением для мелкосерийного производства. Кроме того, замена ППС на биоразлагаемый полилактид (PLA) снижает экологическую нагрузку, открывая перспективы для использования экологически чистых материалов в литейной отрасли.

Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной академии наук № 26-99-20057, <https://rscf.ru/project/26-99-20057/>

Список источников

1. Шуляк В.С., Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. Санкт-Петербург: Профessional, 2007. ISBN 978-5-91259-011-5. EDN QNBQLR.
2. Феоктистов Н.А., Ахметов И.И. Современное состояние и перспективы развития технологии литья по газифицируемым моделям // Технологии металлургии, машиностроения и материалов обработки. 2025. № 24. С. 73-79. EDN YZLWEI.
3. Понамарева Т.Б. Исследование и разработка новых ресурсосберегающих составов противопригарных покрытий литейных форм для обеспечения качественной поверхности отливок: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2025. 46 с.
4. Озеров В.А., Шуляк В.С., Плотников Г.А. Литье по газифицируемым моделям из пенополистирола. М.: Машиностроение, 1970. 183 с.
5. Кондратьев С.Ю., Хайдоров А.Д. Науглероживание стальных отливок при литье по газифицируемым моделям и способы его устранения // Литейное производство. 2010. № 4. С. 15-18.
6. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. Введ. 01.07.1988.

Сведения об авторах

Зубков Антон Анатольевич – доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Туркин Иван Сергеевич – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Феоктистов Николай Александрович – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: fna87@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6091-7983>

Ахметов Ильназ Ильгизович – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Кузяев Евгений Анатольевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Юмабаев Азамат Аслямович – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Штыленко Егор Денисович – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH OF ALTERNATIVE MODEL MATERIALS FOR CASTING BY THE LGM METHOD

Anton A. Zubkov – Doctor of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ivan S. Turkin – Candidate of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nikolay A. Feoktistov – Candidate of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6091-7983>

Ilnaz I. Akhmetov – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Evgeny A. Kuzyaev – master student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Azamat A. Yumabayev – Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Egor D. Shtylenko – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstracts. Traditional Lost Foam Casting (LFC) using expanded polystyrene (EPS) requires the production of expensive specialized tooling and molds. This makes the method cost-effective primarily for high-volume production, while small-batch manufacturing remains prohibitively expensive. This study presents a comprehensive investigation of the LFC process integrated with 3D printing for the fabrication of lightweight gasifiable models. Polylactide (PLA), low-density polylactide (PLA-LW), and polymethyl methacrylate (PMMA) were utilized as modeling materials to 3D-print thin-walled specimens. Casting of SCh20 gray cast iron was performed using models made of PLA, PLA-LW, PMMA, and traditional EPS. A comparative analysis of the resulting microstructures was conducted. To perform a the-

oretical analysis of the "mold-model-casting" system, the "PolygonSoft" software suite was employed. For the first time, a casting method using 3D-printed plastic models followed by cast iron pouring is proposed, which completely eliminates the mold machining stage. It was established that the mechanical properties of castings produced via 3D-printed models are equivalent to those of traditional ones. The proposed hybrid technology significantly reduces the time and financial costs of engineering preparation for small-batch production of complex metal castings, while maintaining product quality at the level of traditional foundry production.

Keywords: Lost Foam Casting (LFC), PolygonSoft, polylactide (PLA), gas permeability, casting microstructure

The study was carried out by grant of the Russian Science Foundation No. 26-99-20057, <https://rscf.ru/project/26-99-20057/>

Ссылка на статью:

Исследование альтернативных модельных материалов для получения отливок методом ЛГМ / Зубков А.А., Туркин И.С., Феоктистов Н.А., Ахметов И.И., Кузяев Е.А., Юмабаев А.А., Штыленко Е.Д. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 24-31. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-24-31](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-24-31)

Zubkov A.A., Turkin I.S., Feoktistov N.A., Akhmetov I.I., Kuzyaev E.A., Yumabayev A.A., Shtylenko E.D. Research of alternative model materials for casting by the LGM method. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 24-31. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-24-31](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-24-31)