

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ FDM-ПЕЧАТИ ИЗ ABS-ПЛАСТИКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ПОД ЛИТЬЁ ИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОСКА: ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ

И.Ф Тимербаев¹, И.Ф Махмутов², Н.Ф. Карапов², М.Р. Фазлыев²

¹АН РТ ИПИ,
Российская Федерация, г. Казань, 420012

² ФИЦ КазНЦ РАН,
Российская Федерация, г. Казань, 420111

Аннотация. В статье рассматриваются особенности применения FDM-печати для изготовления литейных форм из ABS-пластика, предназначенных для многократного литья воска. Экспериментально исследовано поведение двух типов форм: базовой с толщиной стенок около 0,8 мм и заполнением 15 %, и модифицированной — с утолщёнными стенками (до 3–4 мм) и увеличенным заполнением (до 40 %). Установлено, что базовая форма уже после третьего цикла заливки деформировалась, теряя геометрию, тогда как усиленная конструкция выдержала более шести циклов без видимых повреждений. Полученные восковые отливки обладали стабильной формой и пригодностью к дальнейшему использованию при формировании керамических оболочек для инвестиционного литья. В работе представлены фотоматериалы, иллюстрирующие конструкцию формы, процесс заливки и полученные результаты (рис. 1–3).

Ключевые слова: литейные формы, воск, тепловая деформация, ABS-пластик, FDM-печатать, литьё.

Введение

Развитие аддитивных технологий, в частности FDM-печати, открыло новые возможности для изготовления формообразующей оснастки в инвестиционном литье. Использование ABS-пластика позволяет получать достаточно прочные и точные изделия, применимые на ранних стадиях производства. Одним из актуальных направлений остаётся исследование устойчивости таких форм к тепловым нагрузкам при многократной заливке воска, особенно в условиях отсутствия активного охлаждения.

Как подчёркивают Сафонов и соавт., «синтез материала заготовки, доведение его до жидкого агрегатного состояния, заполнение им литейной формы и затвердевание синтезированного материала происходит непрерывно и одновременно» [1, с. 119]. Этот подход применим и к процессу использования FDM-форм: эффективность определяется не только геометрией, но и их способностью сохранять параметры в процессе термического воздействия.

Исторически FDM-печать рассматривалась как вспомогательный инструмент прототипирования. Однако, как показано в работах Р. Blake и J. Vora [2], [3], подобные формы могут быть использованы и в серийных задачах инвестиционного литья. Согласно обзору E3S Web of Conferences, формы, изготовленные методом FDM, демонстрируют удовлетворительные результаты в условиях ограниченного термоагрессии [4]. При этом термостойкость ABS остаётся одним из главных ограничивающих факторов, особенно при работе с литыми средами.

Настоящее исследование направлено на экспериментальную оценку термостойкости двух вариантов FDM-форм и определение их пригодности для повторного литья воска. Конструкция сборной формы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Сборная FDM-форма из ABS после усиления конструкции

Материалы и методы

Для проведения эксперимента были изготовлены две литейные формы методом FDM-печати на 3D-принтере QIDI TECH Pro Q с использованием ABS-пластика (FDplast, серый). Первая форма имела минимальные конструктивные параметры: толщина стенок составляла около 0,8 мм, заполнение — 15 %. При заливке использовался низкотемпературный воск с температурой плавления около 60 °С. После третьей заливки наблюдалась выраженные деформации стенок, вслучивание и потеря точности геометрии восковой модели.

Вторая форма была изготовлена с утолщёнными стенками (3–4 мм) и увеличенным внутренним заполнением (до 40 %). Оба образца подвергались многократным заливкам воска в аналогичных условиях. Контроль состояния формы проводился визуально после каждой заливки: оценивалась стабильность геометрии, наличие повреждений и изменение качества восковой отливки.

Эффективность подхода подтверждается результатами численного анализа теплопередачи, проведённого в работе Reitz и соавт. [5], где подчёркивается важность термоуправления при проектировании форм для литья. Этап отливки воска в напечатанную, частично разобранную форму показан на рис. 2.



Рис. 2. Форма с застывшей восковой моделью ярко-красного цвета, частично извлечённая

Результаты

Результаты испытаний показали, что базовая FDM-форма, изготовленная с минимальными параметрами (0,8 мм стенка и 15 % заполнение), после трёх заливок подверглась значительным термическим деформациям. Было зафиксировано вспучивание стенок, утрата геометрической точности и ухудшение качества поверхности отливки. Полученные восковые модели имели локальные смещения и нарушение симметрии, что делало их непригодными для последующего получения точных керамических форм.

Усовершенствованная форма с утолщёнными стенками (до 3–4 мм) и заполнением 40 % показала устойчивость к термическим нагрузкам. Проведено более шести циклов литья, при этом не выявлено ни разрушений структуры, ни деградации точности. Восковые отливки сохраняли стабильную геометрию, а поверхность оставалась гладкой и однородной.

Как указывают Сафонов и соавт., «установлен минимально возможный размер литого зерна модифицированного сплава АК7, гарантированный с 95 % вероятностью на уровне 250 мкм» [2, с. 35]. Это подчёркивает важность стабильных условий при формообразовании и переносит акцент на сохранение формы и повторяемости в процессе многократного литья. Пример готовой отливки приведён на рис. 3.



Рис. 3. Готовая восковая отливка, извлечённая из формы

Обсуждение

Сравнительный анализ двух FDM-форм показал, что даже при использовании одного и того же материала (ABS) изменение геометрических параметров оказывает существенное влияние на термическую устойчивость формы. Минимальные значения толщины стенок и заполнения создают условия для тепловой перегрузки, при которой происходит накопление остаточного тепла в материале, что приводит к деформациям уже после нескольких циклов литья.

Увеличение толщины стенок до 3–4 мм и повышение плотности заполнения до 40 % способствовали более равномерному распределению тепла и повышению общей жёсткости конструкции. Это подтвердило применимость таких форм в условиях повторяющегося термического воздействия, характерного для мелкосерийного производства.

Принцип взаимосвязанности всех стадий процесса, подчёркнутый Сафоновым и соавт. — «синтез материала заготовки, доведение его до жидкого агрегатного состояния,

заполнение им литейной формы и затвердевание синтезированного материала происходит непрерывно и одновременно» [1, с. 119], — применим и в случае FDM-оснастки. Эффективность литейной формы напрямую зависит от её способности интегрироваться в единый производственный цикл без потери качества при повторных операциях.

Результаты также согласуются с наблюдениями, приведёнными в работе Vora и соавт. [3], где подчёркивается важность конструктивной адаптации FDM-форм под термические нагрузки. Несмотря на это, основным ограничением остаётся теплопроводность ABS, что требует дополнительных исследований в направлении модификации структуры заполнения или применения комбинированных материалов.

Заключение

Проведённый эксперимент показал, что литейные формы, изготовленные методом FDM из ABS-пластика, могут эффективно использоваться для многократного литья воска, при условии соблюдения определённых конструктивных параметров. Форма с минимальной толщиной стенок (0,8 мм) и малым заполнением (15 %) теряла геометрию уже после трёх циклов заливки. В то же время, модифицированная форма с утолщёнными стенками (3–4 мм) и заполнением 40 % выдержала более шести циклов без признаков деформации или ухудшения качества отливок.

Стабильность геометрии восковых моделей, полученных в улучшенной форме, позволяет использовать их при последующем изготовлении керамических оболочек для инвестиционного литья. Таким образом, FDM-печать с правильно подобранными параметрами может применяться как эффективный инструмент в подготовке литьевых форм, включая задачи мелкосерийного производства.

Представленные данные согласуются с результатами теплового анализа форм, описанными в ряде зарубежных и отечественных исследований [2], [3], [5], и подтверждают перспективность подхода при условии контроля теплового режима и выбора подходящих геометрических характеристик.

Благодарности

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список литературы

1. Сафонов Н.Н. Формирование лигатуры на основе системы Al-Ti-B электрошлаковым процессом с привлечением дисперсных отходов машиностроения / Н. Н. Сафонов, Л. Р. Харисов, М.Р. Фазлыев // Ползуновский вестник. – 2022. – № 1. – С.118–125. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.016. – EDN: KPCRXZ.
2. Blake P. FDM of ABS Patterns for Investment Casting / P. Blake // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. – 1997. – URL: <https://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/1997/1997-22-Blake.pdf> (дата обращения: 01.08.2025).
3. Vora J., Dave H., Patel V. Evaluation of ABS Patterns Produced from FDM for Investment Casting Process / J.Vora, H.Dave, V.Patel // Rapid Prototyping Journal. – 2016. – V. 22, Issue5. – DOI: 10.1108/RPJ-07-2014-0083. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/230737484> (дата обращения: 01.08.2025).

4. Investigation of the Efficiency of Manufacturing Polymer Molds by FDM-Printing // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 395. – Article No. 01035. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/35/e3sconf_abr2023_01035.pdf (дата обращения: 01.08.2025).
5. Reitz M. Heat Transfer Analysis of 3D Printed Wax Injection Mold / M.Reitz, A.Patel, A. Rizzo // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 19. – DOI: 10.3390/ma15196461. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9571762/> (дата обращения: 01.08.2025).
6. Сафронов Н. Н. Оптимизация модифицирования силуминового сплава лигатурой Al-Ti-B, полученной из дисперсных отходов машиностроения электрошлаковым литьём / Н.Н. Сафронов, Л.Р. Харисов, М.Р. Фазлыев // Вестник Югорского государственного университета. – 2022. – № 1(64). – С. 32–41. – DOI: 10.18822/byusu20220132-41. – EDN: CVGIVJ.
7. 3D-Printed Molds for Casting: Possibilities & Best Practices // Xometry. – URL: <https://xometry.pro/en-tr/articles/3d-printed-molds-for-casting/> (дата обращения: 01.08.2025).

USE OF FDM PRINTING FROM ABS PLASTIC FOR THE MANUFACTURE OF CASTING MOLDS FOR LOW-TEMPERATURE WAX CASTING: PROBLEMS OF THERMAL DEFORMATION

I.F. Timerbaev¹, I.F. Makhmutov², N.F. Kashapov², M.R. Fazlyev²

¹AS RT IPI
Kazan, 420012, Russian Federation

² FRC KazSC RAS
Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. The article discusses the features of using FDM printing for the manufacture of ABS plastic casting molds intended for multiple wax casting. The behavior of two types of molds was experimentally investigated: a basic mold with a wall thickness of about 0.8 mm and a filling of 15%, and a modified mold with thickened walls (up to 3–4 mm) and increased filling (up to 40%). It was found that the basic mold deformed after the third pouring cycle, losing its geometry, while the reinforced design withstood more than six cycles without visible damage. The wax castings obtained had a stable shape and were suitable for further use in the formation of ceramic shells for investment casting. The paper presents photographs illustrating the mold design, the pouring process, and the results obtained (Figs. 1–3).

Keywords: casting molds, wax, thermal deformation, ABS plastic, FDM printing, and casting.

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2-3 октября 2025 года).

Статья представлена в редакцию 15 августа 2025 г.