Из полученного выражения (8) видно, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов, таких как геометрические размеры капель расплава, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, свойств распыляемого материала и других, что иллюстрируется графическими зависимостями, представленными на рис. 1, 2. Из рис. 1 видно, что потери теплочастицы наиболее интенсивно происходит при их диаметре менее 50 мкм, а при больших диаметрах изменение скорости охлаждения имеет линейно-затухающий характер. Из рис. 2 видно, что изменение температуры капель расплава зависит от их размеров и имеет линейно-возрастающий характер.

Установлено, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов: их геометрических размеров, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, физико-химических свойств. Уменьшение размера капель расплава после диспергирования ведет к росту скорости охлаждения с одновременным уменьшением времени охлаждения и затвердевания получаемых частиц.

Литература

1. Стасенко, Д. Л. Особенности центробежного диспергирования капельной фазы расплава / Д. Л. Стасенко // Материалы, технологии, инструменты. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 55–58.
2. Стасенко, Д. Л. Анализ влияния теплоотвода при вторичном диспергировании капельной фазы расплава на структуру и микротвердость получаемых металлических порошков / Д. Л. Стасенко, И. Н. Степанкин // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 86–90.
3. Жаров, М. В. Исследование закономерностей процесса охлаждения и кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов в водной среде / М. В. Жаров // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т. 64, № 6. – С. 4–16.
4. Зверева, Е. Н. Оценка переменной интенсивности отвода теплоты от поверхности падающих и кристаллизующихся капель расплавов в процессе их приллирования / Е. Н. Зверева, Ю. А. Таран // Теоретические основы химической технологии – 2017 – Т 12, № 1. – С. 45–49.

ФОТОПОЛИМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Е. А. Гавриленко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научные руководители: И. Н. Прусенко, И. Б. Одарченко

Представлены исследования влияния химического состава фотополимерных смол, геометрии образцов и температурного режима прокалки на зольность моделей, полученных методом 3D-печати, для литья по выплавляемым моделям. Показано, что снижение отношения площади поверхности к объему образцов и их ускоренный нагрев увеличивают коксовый остаток за счет диффузионных ограничений и неполного дожигания углеродистых фракций. Установлено, что оптимизация температурного профиля прокалки обеспечивает снижение зольности и повышения точности литейных процессов.

Ключевые слова: 3D-печать, VAT-полимеризация, SLA, MSLA, фотополимеры, литье по выплавляемым моделям, зольность.

Современные возможности фотополимерной 3D-печати (VAT-полимеризация) все больше применяются в литейном производстве и являются перспективным инструментом повышения точности и эффективности литейных процессов. Основной

областью применения данной технологии в литейном производстве, как правило, является изготовление мастер-моделей для технологии литья по выплавляемым моделям (ЛВМ), а также изготовление элементов технологической оснастки, шаблонов, вставок в модельные плиты. В отличие от традиционных методов изготовления мастер-моделей для ЛВМ фотополимеризация обеспечивает высокую размерную точность, минимальную шероховатость поверхности (*Ra* – 3,2 мкм) и возможность создания сложных геометрических элементов, включая внутренние каналы и тонкостенные структуры.

Известно, что фотополимеризация основана на инициировании радикальной или катионной полимеризации под воздействием света определенной длины волны. Данная технология включает стадии поглощения фотонов инициатором, генерации активных радикалов, роста цепи, формирования трехмерной сетки и последующего пост отверждения. Радикальная фотополимеризация, широко применяемая в технологиях VAT-полимеризации (SLA, MSLA, DLP), обеспечивает высокую скорость отверждения, однако чувствительна к кислороду и может приводить к неоднородности структуры при недостаточной экспозиции. Катионная фотополимеризация, напротив, менее подвержена ингибированию кислородом, но требует более сложных инициаторов и обладает меньшей скоростью [1]. Сравнение механизмов фотополимеризации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение радикальной и катионной фотополимеризации

Параметр	Радикальная фотополимеризация	Катионная фотополимеризация
Тип мономеров	Акрилаты	Эпоксиды
Усадка	3–6 %	0,5–2 %
Температура стеклования	50–90 °C	120–180 °C
Чувствительность к кислороду	Высокая	Отсутствует
Остаточные напряжения	Значительные	Низкие

Данные различия являются основой для выбора смолы под конкретную технологическую задачу литейного производства. В ювелирном производстве, где важна детализация (элементы с минимальным размером 0,1–0,2 мм), акрилаты остаются доминирующими. В ответственных инженерных конструкциях чаще используются эпоксидные составы.

Современные 3D-принтеры и фотополимерные материалы позволяют обеспечивать размерную точность до ± 0,05 мм к номинальному размеру, что значительно превосходит традиционные методы изготовления восковых моделей. Однако фотополимеры обладают, как правило, более высокой зольностью по сравнению с инжекционным воском, что требует тщательного выбора материала и оптимизации режима выжигания.

Для исследования зольности фотополимерных материалов разработано четыре типа образцов одинакового объема, массы, с различной площадью поверхности (табл. 2).

Таблица 2

Геометрические параметры экспериментальных образцов

Геометрическая форма	*S*, см²	*V*, см³	*S*/*V*, см²/ см³	Масса, г
Куб 20 × 20 × 20 мм	24	8	3	9
Пластина 40 × 40 × 5 мм	40	8	5	9
Перфорированная пластина	56	8	7	9
Оболочка 40 × 40 × 11 мм, S = 2 мм	80	8	10	9

Экспериментальное определение зольности проводилось на трех марках литейных фотополимерных смол: Formlabs Castable Wax, HARZ Labs Dental Cast Cherry PRO, Formlabs Black Resin. Для всех материалов применялся единый подход, обеспечивающий сопоставимость результатов и минимизацию влияния внешних факторов. Прокаливание осуществлялось в печи сопротивления в двух режимах: эштрих-режим (плавный, ступенчатый нагрев) и ускоренный режим. Такой подход обеспечил формирование различных условий реального выжигания моделей в полости литейной формы.

В эштрих-режиме использовался ступенчатый нагрев, чтобы разделить стадии испарения, пиролиза и дожигания остатка. Сначала осуществлялся подъем температуры до 149 °С со скоростью около 20 °С/мин и выдержка 60 мин для удаления влаги и низкомолекулярных фракций; затем подъем до 371 °С с выдержкой 60 мин – стадия активной деструкции связующего и начала выгорания органических компонентов; далее подъем до 482 °С с выдержкой 60 мин для завершения пиролиза и дожигания основной массы органической матрицы; после этого подъем до температуры 732 °С с выдержкой 60 мин для полного окисления остаточного углерода и перевода неорганических компонентов в устойчивые оксидные формы. Такой режим создает условия для полного и контролируемого выгорания органической составляющей.

В ускоренном режиме термическое разложение образцов проводилось без ступенчатого нагрева. Образцы помещались в камерную печь сопротивления, в которой происходил нагрев до температуры 732 °С со скоростью около 80 °С/мин. После достижения данной температуры осуществлялась изотермическая выдержка продолжительностью 60 мин, обеспечивавшая завершение процессов пиролиза и окисления остаточного углерода. По окончании выдержки образцы охлаждались совместно с печью до температуры окружающей среды.

Навески массой 9 г взвешивали на лабораторных аналитических весах. Количество коксового остатка определяли по изменению массы навески до и после прокаливания, производили расчет зольности (табл. 3). Каждый эксперимент повторен 5 раз, приведены средние значения.

Проведенное исследование показало, что величина зольности фотополимерных смол определяется сочетанием химического состава, геометрии образца и температурного режима прокалки (с учетом полного выгорания органической матрицы). Для всех материалов установлено, что уменьшение отношения площади поверхности к их объему приводит к росту коксового остатка. При переходе от $S/V = 10$ к S/V = 3 зольность увеличивается с 0,012 до 0,037 % для Formlabs Castable Wax V1, с 0,03 до 0,085 % – для HARZ Labs Dental Cast Cherry PRO и с 0,18 до 0,41 % –

для Formlabs Black Resin. Рост зольности (в 2–3 раза) при уменьшении удельной поверхности связан с тем, что в массивных образцах кислород проникает вглубь значительно хуже, вследствие чего пиролиз протекает преимущественно в условиях ограниченного окисления и сопровождается усиленным образованием углеродистого остатка.

Таблица 3

Зольность исследованных смол при прокаливании

Смола	*S*/*V*	Formlabs Castable Wax V1, %		HARZ Labs Dental Cast Cherry PRO, %		Formlabs Black Resin, %	
		Эштрих-режим	Ускоренный режим	Эштрих-режим	Ускоренный режим	Эштрих-режим	Ускоренный режим
Куб 20 × 20 × 20 мм	3	0,037	0,071	0,085	0,125	0,41	0,552
Пластина 40 × 40 × 5 мм	5	0,025	0,04	0,065	0,095	0,3	0,43
Перфорированная пластина	7	0,018	0,029	0,045	0,075	0,23	0,34
Оболочка 40 × 40 × 11 мм, *S* = 2 мм	10	0,012	0,017	0,03	0,055	0,18	0,28

Сравнение исследованных материалов показало, что Formlabs Black Resin обладает наибольшей зольностью, достигающей 0,552 % в ускоренном режиме и 0,41 % – при ступенчатом нагреве. Повышенный остаток обусловлен высокой степенью сшивки полимерной матрицы, значительным содержанием пигментов и неорганических наполнителей, которые формируют устойчивый остаток после термического разложения. Литейные фотополимеры Castable Wax V1 и Dental Cast Cherry PRO характеризуются меньшей долей неорганических компонентов (в случае Castable Wax V1, наличием восковой фракции), и обеспечивают более низкую зольность – от 0,012 до 0,125 %. Это подтверждает их соответствие технологическим требованиям литья по выплавляемым моделям, где критически важна минимизация твердого остатка после прокалки.

Температурный режим прокалки оказывает значительное влияние на величину остатка. Быстрый нагрев до 732 °C со скоростью около 80 °C/мин приводит к увеличению зольности всех материалов: для Castable Wax V1 рост составляет от 0,037 до 0,071 %, для Cherry PRO – от 0,085 до 0,125 %, для Black Resin – от 0,410 до 0,552 %. Увеличение остатка на 40–90 % по сравнению со ступенчатым режимом связано с формированием выраженных температурных градиентов, локальным перегревом поверхностных слоев и задержкой прогрева внутренних областей, что способствует образованию более плотного пироуглеродного слоя и частичному переходу неорганических компонентов в устойчивые оксидные формы. При ступенчатом эштрих-режиме термическое разложение протекает последовательно через стадии удаления летучих компонентов, пиролиза и окислительного дожигания, что позволяет достичь минимальной зольности, ограниченной исключительно составом материала.

Таким образом, оптимизация температурного профиля прокалки является ключевым фактором для снижения зольности фотополимерных материалов. Литейные

акрилатные и воскомодифицированные смолы демонстрируют наилучшие показатели при использовании ступенчатого режима нагрева, тогда как наполненные технические акрилаты, такие как Formlabs Black Resin, требуют более строгого контроля температурных условий из-за высокой склонности к образованию невыгораемого остатка.

Литература

1. Fouassier, J. P. Photoinitiators for Polymer Synthesis: Scope, Reactivity and Efficiency / J. P. Fouassier, J. Lalevée. – Wiley-VCH, 2012. – 491 p.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ FDM-ПЕЧАТИ ОСНАСТКИ: СТАНДАРТЫ КАЧЕСТВА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

К. Д. Лапицкий

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научные руководители: И. Б. Одарченко, И. Н. Прусенко

Произведен анализ механических свойств, нормативной документации современных полимеров, применяемых в FDM-печати для изготовления элементов литейной оснастки. Предложена методика испытаний полимерных материалов на абразивный износ, адаптированная к реальным условиям литейного производства.

Ключевые слова: FDM-печать, абразивная стойкость, износ, литейная оснастка.

Современное развитие аддитивных технологий [1] позволяет существенно изменить подходы к изготовлению элементов технологической оснастки в литейном производстве. Как правило, производство модельных комплектов осуществляется преимущественно субтрактивной обработкой алюминиевых сплавов, древесных и полимерных материалов. Однако FDM-печать обеспечивает возможность оперативного производства мастер-моделей для ЛВМ, элементов модельных плит сложной геометрии, вставок стержневых ящиков, а также приспособлений для сборки и контроля. Существенным преимуществом является возможность оперативной корректировки конструкции, что сокращает длительность подготовительных операций и ускоряет производственный цикл.

При создании технологической оснастки для литейного производства ключевыми параметрами являются геометрическая точность, стабильность размеров при нагреве, стойкость к абразивному воздействию наполнителя, химическая инертность к разделительным составам, низкая усадка и пригодность к постобработке. Полимеры, применяемые в FDM-печати, должны сочетать эти свойства, что требует системного анализа их структуры, механики и методов контроля качества. Целью настоящей работы является оценка применимости современных FDM-материалов для изготовления литейной оснастки и формирование методики испытаний, отражающей реальные условия эксплуатации.

Для исследования выбраны шесть материалов: PA, PA-CF, ABS, PLA, PC и PETG [2]. Такой перечень материалов охватывает диапазон от доступных недорогих полимеров (PLA, PETG) до инженерных композитов и с повышенными эксплуатационными характеристиками (PA-CF, PC), что позволяет провести корректное сравнение по параметрам, значимым для литейного производства.