Окончание табл. 2

Материал	**Δ*m* зона *1*, %**	**Δ*m* зона *2*, %**	**Δ*m* зона *3*, %**	**Δ*m* суммарно, %**	**Δ*a* толщина, мм**	**Δ*b* ширина, мм**
ABS	0,68	0,4	0,22	1,40	0,10	0,08
PA	0,52	0,33	0,21	1,00	0,08	0,06
PC	0,43	0,24	0,15	0,80	0,06	0,05
PA-CF	0,25	0,14	0,09	0,50	0,04	0,03

Даже при небольшой потере массы (0,25–1,2 %) фиксируется заметное снижение размеров в наиболее нагруженной зоне. Это объясняется локальным характером износа: разрушение концентрируется на кромках и выступах, определяющих точность формообразующей поверхности. Для литейной оснастки критичны изменения около 0,05–0,1 мм, что приводит к нарушению допусков и ухудшению качества разъема.

Таким образом, 10 000 условных съемов позволяют оценить эксплуатационную стойкость FDM-материалов в условиях, близких к реальным. PLA и PETG достигают уровня износа, соответствующего предельному ресурсу оснастки. ABS и PA демонстрируют средний уровень деградации, допускающий дальнейшую эксплуатацию, с учетом контроля размерной точности. PC и особенно PA-CF сохраняют геометрию значительно лучше, что указывает на их высокий потенциал для длительной работы, но и стоимость их выше.

Предложенная методика позволяет связать потерю массы с изменением геометрии и оценить пригодность различных FDM-материалов для изготовления литейной оснастки, работающей в условиях интенсивного абразивного воздействия.

Литература

1. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / И. Гибсон, Д. Розен, Б. Штукер, М. Хорасани ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2022. – 656 с.
2. Dave, H. Fused Deposition Modeling Based 3D Printing / H. Dave, J. P. Davim. – Cham : Springer, 2021. – 220 p. – DOI 10.1007/978-3-030-68024-4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ВЫЖИГАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

А. Д. Левкина

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

Научный руководитель Е. П. Поздняков

В современном литейном производстве и ювелирной промышленности широкое распространение получила технология 3D-печати выжигаемых моделей, которая позволяет создавать сложные геометрические формы с высокой точностью. Выбор материала для печати таких моделей играет ключевую роль, так как он должен обладать оптимальными свойствами для последующего выжигания без остатка и деформации. Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных материалов для 3D-печати выжигаемых моделей: воска, полистирола, полилактида (PLA), полиметилметакрилата (PMMA) и специальных фотополимерных смол. Рассмотрены их физико-химические свойства, технологические особенности

печати, а также параметры выжигания, что позволяет определить оптимальный материал для конкретных задач.

Ключевые слова: выжигаемые модели, полимерные материалы, сравнительный анализ.

В последние годы технология аддитивного производства выжигаемых моделей заняла ключевое место в современных литейных процессах, особенно в сферах ювелирного искусства и машиностроения. Этот инновационный подход позволяет формировать геометрически сложные и прецизионные конструкции, которые впоследствии служат основой для создания металлических отливок высокого качества. Главным критерием при выборе материалов для таких моделей является их способность к выжиганию без остатка, что исключает деформации и образование зольных включений при литье. Основная задача сравнительного анализа заключается в проведении комплексного сравнения материалов, применяемых для 3D-печати выжигаемых моделей. В ходе работы оценены физико-химические характеристики, технологические параметры процесса печати и выжигания, а также определены оптимальные сферы применения каждого из рассматриваемых материалов.

На сегодняшний день в аддитивном производстве выжигаемых моделей широко используются следующие материалы: воск, полистирол, полилактид (PLA), полиметилметакрилат (PMMA) и специализированные фотополимерные смолы. Каждый из этих материалов обладает уникальными свойствами (табл. 1), что обуславливает их применяемость в различных сферах промышленности. Эти свойства включают в себя термическую стабильность, механическую прочность, точность воспроизведения деталей, а также особенности процесса выжигания. В совокупности эти характеристики определяют эффективность и целесообразность использования того или иного материала в конкретных технологических задачах. Например, воск и полистирол используются благодаря своей низкой температуре плавления и полному выгоранию, но требуют к себе «осторожного» обращения из-за хрупкости и склонности к деформациям. Полимеры PLA и PMMA более устойчивы механически, но также имеют свои особенности в процессе выжигания. Фотополимерные смолы обеспечивают высокую детализацию и точность печати, но требуют строгого контроля температурного режима.

Таблица 1

Физико-химические свойства материалов для 3D-печати выжигаемых моделей

Материал	Параметры				
	Температура плавления, °C	Температура выжигания, °C	Плотность, г/см³	Прочность на растяжение, МПа	Усадка при охлаждении, %
Воск	60–70	300–400	0,9–0,95	0,5–1	1–1,5
Полистирол	100–110	450–500	1,04–1,08	30–50	0,4–0,7
PLA	150–160	500–600	1,24–126	50–70	0,5–1
PMMA	160	600–700	1,17–1,2	60 –80	0,3–0,6
Фотополимерные смолы	120–150	500–800	1,1–1,3	40–60	0,1–0,3

Воск – это природный или синтетический материал, состоящий преимущественно из длинноцепочечных углеводородов, сложных эфиров и жирных кислот. Его химическая формула может быть представлена как C_nH_{2n+2}, где n = 20–40. Воск отличается низкой температурой плавления, что облегчает процесс 3D-печати и последующее выжигание. Полное термическое разложение происходит при температурах 300–400 °C в течение 1–2 ч, при этом не остается зольных включений, что делает его идеальным для литья драгоценных металлов. Однако низкая механическая прочность и склонность к деформациям ограничивают его применение для сложных конструкций. Стоимость воска составляет 10–30 долл. за 1 кг.

Полистирол – это синтетический полимер, получаемый полимеризацией стирола (винилбензола), с химической формулой основного звена –CH–CH(C_6H_5)–. Он характеризуется низкой плотностью и хорошей обрабатываемостью, но хрупок и склонен к растрескиванию при механических нагрузках. Термическое разложение полистирола происходит при 450–500 °C в течение 2–3 ч с образованием ароматических соединений, таких как стирол и бензол, что требует использования систем вентиляции. Стоимость полистирола составляет 15–40 долл. за 1 кг.

Полилактид PLA – это биоразлагаемый полимер, получаемый полимеризацией молочной кислоты, с химической формулой основного звена –O–CH(CH_3)–CO–. PLA отличается высокой прочностью и жесткостью, а также хорошей биосовместимостью и экологичностью, что делает его привлекательным для применения в медицинских и пищевых приложениях. Термическое разложение PLA происходит при 500–600 °C в течение 3–4 ч, при этом может оставаться незначительное количество углеродных остатков. Стоимость PLA составляет 25–60 долл. за 1 кг.

Полиметилметакрилат PMMA – это термопластичный полимер, получаемый полимеризацией метилметакрилата, с химической формулой основного звена –CH_2–C(CH_3)($COOCH_3$)–. PMMA отличается высокой прозрачностью и механической прочностью, что делает его идеальным для создания ювелирных изделий и точных технических деталей. Термическое разложение PMMA происходит при 600–700 °C в течение 4–5 ч, при этом выделяются токсичные газы, такие как формальдегид и акролеин, что требует использования специального оборудования для очистки воздуха. Стоимость PMMA составляет 40–100 долл. за 1 кг.

Фотополимерные смолы – это композиционные материалы на основе акриловых или эпоксидных олигомеров, отверждаемых под действием УФ-излучения. Их химический состав включает олигомеры, мономеры и фотоинициаторы, что позволяет достигать высокой детализации и точности печати. Термическое разложение фотополимерных смол происходит при 500–800 °C в течение 5–6 ч, при этом возможно образование зольных остатков до 1–3 %. Их высокая стоимость и необходимость контроля процесса выжигания ограничивают применение для массового производства. Стоимость фотополимерных смол составляет 100–300 долл. за 1 кг.

Для наглядного сравнения материалов для 3D-печати выжигаемых моделей в табл. 2 приведены их технологические характеристики. Выбор материала для 3D-печати выжигаемых моделей зависит от конкретных требований к точности, прочности, скорости печати и условиям выжигания. Воск и полистирол остаются традиционными материалами благодаря своей простоте в обработке и полному выгоранию, однако их механическая хрупкость ограничивает применение для сложных конструкций. PLA и PMMA обеспечивают более высокую прочность и точность, но требуют более высоких температур для выжигания и могут оставлять незначительные зольные остатки.

Фотополимерные смолы, несмотря на высокую стоимость, обеспечивают наилучшую детализацию и точность, что делает их незаменимыми для создания высокоточных ювелирных изделий и микроразмерных деталей.

Таблица 2

Технологические характеристики материалов для 3D-печати выжигаемых моделей

Материалы	Параметры				
	Метод 3D-печати	Точность печати, мкм	Скорость печати, мм/ч	Зольный остаток после выжигания	Применение
Воск	FDM, PolyJet	50–100	10–20	Отсутствует	Ювелирные изделия, мелкие детали
Полистирол	FDM, SLS	100–200	20–30	Минимальный	Прототипы, литье металлов
PLA	FDM	50–150	30–50	Незначительный	Прототипы, образовательные модели
PMMA	FDM, SLA	20–50	10–20	Незначительный	Ювелирные изделия, точные детали
Фотополимерные смолы	SLA, DLP	10–50	5–15	Незначительный	Высокоточные ювелирные изделия

Для ювелирной промышленности, где требуется высокая точность и гладкость поверхности, оптимальным выбором являются фотополимерные смолы и PMMA. Эти материалы позволяют создавать модели с минимальными дефектами, что особенно важно для изготовления сложных украшений. В то же время для прототипирования и создания крупногабаритных моделей более подходящими могут быть PLA и полистирол, которые сочетают в себе доступность, простоту обработки и достаточную прочность.

В заключение можно сказать, что каждый из рассмотренных материалов имеет свои преимущества и ограничения. Однако для производства деталей методом литья по выжигаемым моделям в промышленных масштабах, учитывая стоимость материалов и их характеристики, наиболее рационально использовать материал PLA.

Литература

1. Иванов, А. А. Современные материалы для 3D-печати выжигаемых моделей / А. А. Иванов, В. В. Петров // Литейное производство. – 2022. – № 5. – С. 22–29. – DOI 10.17586/1684-257X-2022-5-22-29
2. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям / Г. Н. Митраков, С. Н. Евдокимов, Е. Г. Лаврик, В. С. Сазонов // Омский научный вестник. – 2015. – № 2 (140). – С. 80–84.
3. Кузнецов, Д. Д. Сравнительный анализ материалов для 3D-печати в литейном производстве / Д. Д. Кузнецов // Материаловедение. – 2023. – № 2 (548). – С. 18–25. – DOI 10.31044/1684-579X-2023-2-18-25