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.

• PLA – полукристаллический алифатический полиэфир с жесткими эфирными группами –COO–, обладает высокой жесткостью, но низкой ударной вязкостью. Низкая температура стеклования (55–60 °C) приводит к быстрому снижению прочности при нагреве. Разрушается PLA хрупко из-за ограниченной пластичности и склонности к формированию поверхностных микротрещин.

• PETG – аморфный полиэфир, модифицированный гликолевыми звеньями, что уменьшает кристалличность и повышает ударную вязкость. Однако сравнительно низкая теплостойкость (HDT 70–80 °C) и умеренный модуль упругости ограничивают его износостойкость. Тем не менее PETG остается технологичным материалом для оснастки средней нагруженности благодаря стабильности размеров и химической стойкости.

• PA-CF представляет собой полиамид, армированный короткими углеродными волокнами. Армирующая структура снижает усадку, уменьшает анизотропию, ограничивает рост кристаллитов и частично экранирует амидные группы, уменьшая водопоглощение. В результате материал отличается высокой размерной стабильностью, жесткостью.

• Полиамиды (PA) относятся к полукристаллическим полимерам и содержат амидные группы –CONH–, формирующие развитую сеть водородных связей. Эти связи обеспечивают высокую прочность и вязкость, но одновременно делают материал чувствительным к влаге. Водопоглощение приводит к изменению размеров и снижению жесткости, что критично для точной оснастки. Тем не менее способность к пластической деформации делает PA востребованным в деталях, работающих под ударными нагрузками.

• ABS – аморфный сополимер, включающий стеклообразную SAN-матрицу и эластомерные частицы бутадиена. Такая морфология обеспечивает сочетание жесткости и ударной вязкости, однако аморфная структура склонна к образованию микротрещин при трении. Следует учитывать, что межслойные связи ABS слабее, чем в полукристаллических полимерах, что снижает прочность по оси Z и ускоряет его разрушение.

• PC – аморфный поликарбонат с жесткими ароматическими звеньями, соединенными карбонатными группами. Ограниченная подвижность цепей обеспечивает высокую теплостойкость и прочность. Аморфная структура способствует стабильности размеров, а способность к пластической деформации снижает вероятность хрупкого разрушения при трении.

Механические свойства данных полимеров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства полимеров для FDM-оснастки

Материал	HDT, °C	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Примечание
PLA	50–60	3000–3500	50–65	Высокая точность, низкая термостойкость
PETG	65–75	2000–3000	50–55	Умеренная химстойкость, средняя износостойкость
ABS	88–100	2000–2500	40–55	Хорошая стабильность размеров

Окончание табл. 1

Материал	HDT, °C	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Примечание
PA	65–75	2700–3300	70–85	Высокая вязкость, водопоглощение
PA-CF	160–200	6000–12000	80–160	Высокая жесткость, низкая усадка
PC	100–135	2200–2500	55–70	Высокая термостойкость и прочность

Оценка свойств полимеров традиционно проводится по отечественным стандартам: ГОСТ 11262-2017, ГОСТ 4648-2014, ГОСТ 12021-2017 и ГОСТ 11645-2021, а также по международным: ISO 178:2019, ISO 75-2:2013, ISO 1133-1-2022. Однако эти методы ориентированы на материалы, полученные литьем или прессованием, и не учитывают слоистую морфологию FDM-изделий, характеризующуюся анизотропией, межслойными границами и локальной пористостью. Эти особенности существенно влияют на эксплуатационные параметры и не отражаются в стандартных методиках.

Кроме того, ни один из действующих стандартов не предусматривает комплексной оценки поведения полимеров в условиях абразивного воздействия формовочных смесей. Литейная оснастка испытывает интенсивный износ при контакте с кварцевым песком, поэтому требуется специализированная методика испытаний. Для решения этой задачи проведены исследования, направленные на количественную оценку износа FDM-материалов.

Испытания проводились на шнековом смесителе периодического действия, моделирующем реальные условия работы оснастки. Частота вращения шнека составляла 2 об/с, что обеспечивало устойчивый абразивный поток. В качестве среды использовался кварцевый песок фракции 0,2–0,63 мм, массой 10 кг. Образцы представляли собой пластины 80 ×20 мм, которые погружались в песок и были разделены на три зоны по высоте. Такое деление позволило оценить влияние давления песчаного столба и локальной кинематики потока на износ.

Всего выполнено 10 000 условных погружений (съемов) образцов. Это значение сопоставимо с реальным ресурсом пластиковой оснастки, который варьируется от 200–500 съемов для низкостойких материалов до 10 000–30 000 для инженерных полимеров. Измерение массы и контроль геометрической и размерной точности осуществлялись через каждые 2000 циклов. Установлено, что максимальный износ наблюдается в зоне *1*, где давление песчаного столба и плотность контактов максимальны. В зоне *3* износ ниже из-за меньшего статического давления и более разреженного потока (табл. 2).

Таблица 2

Потеря массы и изменение размеров после 10 000 съемов

Материал	Δ*m* зона *1*, %	Δ*m* зона *2*, %	Δ*m* зона *3*, %	Δ*m* суммарно, %	Δ*a* толщина, мм	Δ*b* ширина, мм
PLA	1,20	0,65	0,4	2,40	0,18	0,12
PETG	0,91	0,52	0,37	1,80	0,14	0,10

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