Таким образом, для литья по выжигаемым моделям оптимален PLA-пластик: он дает минимальную зольность (0,003 %) и полностью выгорает при 500 °С. Деталь «Вилка» из PLA пластика печатают горизонтально с заполнением «зигзаг» плотности 8 % (масса – 46 г, время печати – 2 ч 27 мин), что предотвращает деформацию при формовке и снижает твердый остаток.

Литература

1. Битюцкий, А. Д. Выбор материала для трехмерной печати моделей в ювелирном и художественном литье / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Прогрессивные литейные технологии : тр. X Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 9–13 нояб. 2020 г. – М., 2020. – С. 404–408. – EDN NKTRHL.
2. Аддитивные технологии. Современные методы 3D-печати : учеб.-метод. пособие для обучающихся по направлениям подготовки: 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.04 «Программная инженерия»; 27.03.03 «Системный анализ и управление»; 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» / С. Г. Менюк, В. В. Дядичев, Г. Р. Биленко, Д. С. Менюк. – Симферополь : Ариал, 2024. – 114 с. – EDN WGBJIM.

АНАЛИЗ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТЫХ ФИЛЬТРОВ

И. В. Селюков

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Рассмотрены принципы построения градиентных фильтров с пространственно-изменяемой структурой пор, обеспечивающих высокую эффективность очистки и увеличенный ресурс работы. Проведен анализ полимерных, металлических и керамических материалов. Предложен подход к созданию градиентных материалов на основе бентонитовой глины, дисперсных отходов (металлургический шлака, боя фарфора).

Фильтрационные материалы играют важную роль в химической промышленности, биотехнологии, медицине, системах очистки воды и газов. Одним из наиболее эффективных типов фильтров являются градиентные фильтры, обладающие пространственно изменяемой структурой пор. Такие фильтры представляют собой многослойные пористые материалы, в которых размер пор постепенно уменьшается по направлению движения фильтруемой среды. Реализация концепции градиентных структур с закономерно изменяемым размером пор в пространстве обеспечивает распределение задерживаемых частиц по всему объему и кратно увеличивает ресурс работы при сохранении тонкости очистки. В отличие от традиционных фильтров с однородной пористостью градиентные конструкции позволяют минимизировать перепад давления на фильтре при сохранении высокой удерживающей способности.

Процесс фильтрации начинается с прохождения жидкости или газа через первый слой фильтра, имеющий наиболее крупные поры. Этот слой выполняет функцию предварительной очистки и задерживает крупные частицы загрязнений, такие как механические примеси, пыль и крупные агрегаты молекул. Далее поток проходит через второй слой с меньшим размером пор, где задерживаются частицы среднего размера. Последний слой фильтра имеет наиболее мелкие поры и предназначен для задержания самых маленьких частиц, включая микроорганизмы и мелкодисперсные примеси. Современные требования к фильтрации, например, в системах топливоподачи высокого

давления, предполагают улавливание частиц размером менее 4 мкн. При этом градиентный профиль позволяет достичь ресурса работы, в 2–3 раза превышающего ресурс однослойных аналогов при одинаковой тонкости очистки.

Особое место занимают полимерные нановолокнистые композиты с контролируемым градиентом. Среднегеометрический диаметр волокон такого слоя должен находиться в диапазоне от 100 нм до 1 мкн, а коэффициент градиентности должен составлять от 1,1 до 2,8. Номенклатура полимерных материалов включает полиамиды, полиэфиры, полисульфоны, полипропилен и фторполимеры. Оптимальные характеристики достигаются при использовании композитных фильтрующих материалов с нановолокнистым слоем [1].

Среднегеометрический диаметр волокон такого слоя должен находиться в диапазоне от 100 нм до 1 мкн, а коэффициент градиентности должен составлять от 1,1 до 2,8. Номенклатура полимерных материалов включает полиамиды, полиэфиры, полисульфоны, полипропилен и фторполимеры.

Для более жестких условий эксплуатации применяются металлические градиентные материалы, получаемые методами порошковой металлургии. В таких структурах формируется высокопористая подложка с последующим нанесением тонких слоев с меньшим размером пор.

В работе предложен метод борьбы с микропластиком путем очистки воды с использованием градиентных фильтров.

Градиентный материал получается путем нанесения слоев определенной фракции дисперсности друг на друга (по снижению дисперсности). Затем материал подвергается спеканию. Такой профиль обеспечивает постепенное уменьшение пор по направлению от поверхности (рис. 1).

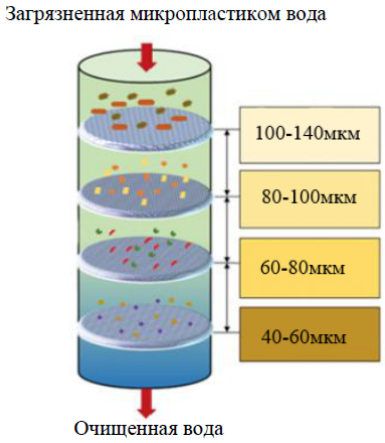


Рис. 1. Схема фильтра с градиентом пористости

Для получения таких фильтров использовалась бентонитовая глина, дисперсные металлургический шлак и бой готового фарфора. Материалы подвергались диспергированию при помощи планетарной мельницы с целью получения необходимых узких размерных фракций (например: 40–60 мкм; 60–100 мкм; 100–140 мкм). После диспергирования в планетарной мельнице полученные порошки разделяли на фракции с использованием классификатора. Это позволило сформировать слои фильтра с заданным размером частиц в каждом слое и соответственно – контролируемой пористостью [2].



а) *б*)

Рис. 2. Общий вид:
а – планетарная мельница; *б* – классификатор

Аддитивные технологии принципиально меняют подход к проектированию фильтров. Благодаря послойному синтезу изделия становится возможным проектировать внутреннюю структуру фильтра с высокой точностью, создавать поры определенных размеров и получать градиент пористости с высокой воспроизводимостью.

Классификация методов аддитивного производства градиентных фильтров представляет особый научный интерес, так как именно способ формирования слоев определяет точность воспроизведения пористой структуры, механические свойства изделия и область его практического применения.

Для поставленной цели можно выделить следующие методы получения фильтров:

• Экструзионные методы (FDM/FFF) являются наиболее доступными и широко распространенными в современной практике аддитивного производства.

Для получения градиентных фильтров данный метод особенно удобен благодаря возможности изменять расстояние между соседними нитями материала, толщину слоя, скорость подачи и температуру экструдера. За счет этого можно целенаправленно управлять размером внутренних каналов и пор. Например, в верхних слоях фильтра может использоваться более редкая укладка нитей, что формирует крупные поры для предварительной фильтрации. По мере продвижения к нижним слоям плотность структуры увеличивается, а размеры пор уменьшаются, формируя выраженный градиент.

Преимуществами метода являются низкая стоимость оборудования, простота моделирования и возможность быстрого изготовления экспериментальных образцов. Однако точность формирования микропор ограничена диаметром сопла и реологическими свойствами полимера.

• Фотополимеризационные методы (SLA/DLP) основаны на послойном отверждении жидкой фотополимерной смолы под действием ультрафиолетового излучения. Данные методы обеспечивают значительно более высокую точность по сравнению с экструзионной печатью. Это особенно важно для изготовления микрофильтрационных и мембранных структур, где размер пор может составлять десятки микрометров. Использование SLA и DLP позволяет формировать сложные пространственные каналы, тонкие перегородки и высокоточные ячеистые структуры. Благодаря этому возможно получение фильтров для медицинских, биотехнологических и лабораторных применений.

• Порошковые методы (SLS/SLM) являются наиболее перспективными для изготовления металлических и керамических градиентных фильтров. Принцип работы основан на селективном лазерном спекании или плавлении порошкового материала.

В качестве исходного сырья используются металлические, керамические или полимерные порошки различной дисперсности.

Градиент пористости достигается несколькими способами: изменением мощности лазера; изменением скорости сканирования; использованием порошков разной дисперсности; варьированием толщины наносимого слоя. Этот метод особенно важен для создания фильтров, работающих при высоких температурах, давлениях и в агрессивных средах.

Фильтры, изготовленные методом SLS/SLM, обладают высокой механической прочностью, термостойкостью и длительным сроком службы, что делает их востребованными в химической промышленности, энергетике и машиностроении.

• Струйные методы (PolyJet/MultiJet) основаны на послойном нанесении жидкого материала микрокаплями с последующим отверждением. Главным преимуществом данных технологий является возможность одновременного использования нескольких материалов с различными физико-химическими свойствами. Это особенно важно при создании композиционных градиентных фильтров, где один слой должен обладать высокой механической прочностью, а другой – селективными фильтрационными свойствами.

Подобный подход позволяет получать многофункциональные фильтрующие системы с заданными зонами жесткости, пористости и химической устойчивости.

Таким образом, выбор аддитивного производства основывался на достижении определения точности размеров и форм пор при применении данного материала.

Литература

1. Деформация конденсата при формовании и активированное спекание сферических порошков при получении пористых материалов / П. А. Витязь, В. Н. Ковалевский, А. В. Ковалевская [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 2. – С. 139–145.
2. Горовцова, В. В. Исследование возможности получения градиентных фильтров / В. В. Горовцова // МИТРо 2025 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : материалы докл. науч.-техн. конф., Гомель, 5 дек. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2025. – С. 63–65.

ТЕПЛОПОТЕРИ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ РАСПЛАВА В ПОЛЕТЕ К МИШЕНИ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

Т. Д. Стасенко, В. Ю. Процко

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Приведен качественный анализ влияния теплопотерь капельной фазы расплава в полете к мишени при газотермическом напылении. 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 ведет к росту скорости охлаждения с одновременным уменьшением времени охлаждения и затвердевания частиц [1].

Ключевые слова: расплав, теплоотвод, конвекция, излучение, температура, тепловая энергия.

За время полета капли через газ одновременно происходит перенос количества движения и теплоты. Поэтому для расчета кинетики выделяемой теплоты и пробега капли необходимо решить серию дифференциальных уравнений теплопереноса и изме-