Результат

В лаборатории ГГТУ им. П. О. Сухого проведено упрочнение поверхностей деталей машин. Перед нанесением покрытия поверхность подвергалась пескоструйной очистке. Эксплуатационные испытания показали:

– срок службы поверхности с покрытием из порошка № 3 на 10–15 % выше, чем у поверхностей с напаянными пластинами из твердого сплава;

– срок службы в 2–3 раза выше, чем у поверхности из стали 95Т.

Дополнительный эффект – снижение стоимости восстановления за счет использования отходов чугунной дроби и отсутствия необходимости в дорогостоящей оснастке.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Состав наплавочного материала критически влияет на микротвердость и износостойкость покрытий при МЭН. Введение бора обеспечивает самофлюсование и формирование твердых боридов; добавка WC кратно повышает сопротивление абразивному износу.

2. Порошковая смесь на основе борированной чугунной дроби (3 ч, 950 °С) с 15–20 мас. % карбида вольфрама обеспечивает относительную износостойкость.

3. В результате проведенных экспериментов в 2–3 раза по сравнению со сталью 95Т и на 10–15 % по сравнению с напайкой твердого сплава повышается износостойкость поверхности.

Литература

1. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск : Технопринт, 2001. – 300 с.
2. Петришин, Г. В. Износостойкие покрытия, получаемые методом магнитно-электрического упрочнения из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков на основе отходов производства стальной дроби : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Петришин Григорий Валентинович ; Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2006. – 24 с.
3. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск : Технопринт, 2000. – 268 с.
4. Люцко, В. А. Технология и установки магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Люцко Василий Александрович. – Новополоцк, 2004. – 24 с.

ПОЛУЧЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ФИЛЬТРОВ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. В. Горовцова

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Рассмотрены способы получения градиентных фильтров с использованием аддитивных технологий. Градиентные фильтры, представляющие собой многослойные пористые материалы с постепенно уменьшающимся размером пор по направлению фильтрации, обеспечивают высокую эффективность разделения частиц различного размера. Показаны ограничения традиционных методов изготовления фильтров (спекание, формование волокон, вспенивание полимеров) и обоснованы преимущества аддитивного подхода: точный контроль геометрии пор, воспроизводимость структуры, возможность создания сложных градиентных конфигураций и снижение отходов производства. Описаны способы формиро-

вания пористости при 3D-печати, включая управление параметрами печати, изменение решетчатых структур, применение различных материалов и постобработку. Приведена классификация методов аддитивного производства применительно к изготовлению градиентных фильтров, отмечены перспективы их развития.

Ключевые слова: градиентные фильтры, аддитивные технологии, 3D-печать, пористые структуры, фильтрация.

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.

Градиентные фильтры представляют собой фильтрационные материалы с изменяющейся по толщине пористой структурой. В отличие от традиционных фильтров, где размер пор практически одинаков по всему объему, в градиентных фильтрах поры постепенно уменьшаются по направлению движения фильтруемой среды. Такая структура обеспечивает последовательное задержание частиц разных размеров.

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. Благодаря относительно большим порам поток среды свободно проходит через данный слой, что предотвращает быстрое засорение фильтра. Далее поток проходит через второй слой с меньшим размером пор. На этом этапе задерживаются частицы среднего размера, например, коллоидные частицы и мелкие суспензии. Данный слой обеспечивает более тонкую очистку среды. Последний слой фильтра имеет наиболее мелкие поры и предназначен для задержания самых маленьких частиц, включая крупные молекулы, мелкодисперсные примеси и микроорганизмы. В некоторых случаях такие фильтры способны задерживать даже ионы растворенных веществ.

Традиционные методы получения фильтрующих материалов, такие как спекание порошков, формование волокон или вспенивание полимеров, имеют ряд ограничений. Они позволяют создавать градиентные структуры лишь приближенно, например, путем прессования нескольких слоев с разной плотностью, однако точный контроль геометрии пор и их распределения по объему изделия практически недостижим.

Аддитивные технологии позволяют создавать фильтрационные материалы с контролируемой пористой структурой и заранее заданным распределением размеров пор. В отличие от традиционных методов изготовления фильтров, при которых пористость формируется случайным образом или за счет механического смешивания материалов, 3D-печать дает возможность точно управлять внутренней геометрией изделия. Благодаря этому становится возможным формирование градиентных фильтров, в которых размер пор постепенно уменьшается по толщине материала. Такой подход позволяет создавать фильтры с высокой эффективностью очистки и оптимальной пропускной способностью.

Процесс создания градиентных фильтров с использованием аддитивных технологий включает несколько основных принципов формирования пористой структуры.

Управление пористостью материала. Одним из наиболее распространенных методов является регулирование общей пористости материала непосредственно

в процессе печати. Пористость можно изменять за счет изменения параметров печати, таких как толщина слоя, мощность лазера, скорость сканирования или плотность укладки материала. При печати верхние слои фильтра могут формироваться с меньшей плотностью структуры, что приводит к образованию крупных пор. По мере формирования последующих слоев плотность материала постепенно увеличивается, а размер пор уменьшается. В результате формируется градиентная структура, которая обеспечивает последовательную фильтрацию частиц различных размеров.

Изменение геометрии внутренней решетчатой структуры. Современные системы компьютерного моделирования позволяют проектировать сложные пористые структуры еще на этапе создания цифровой модели фильтра. Внутренняя структура фильтра может быть представлена в виде различных решетчатых или ячеистых элементов. К таким структурам относятся тетраэдрические, кубические, гексагональные и другие типы решеток. Изменяя размер ячеек и толщину перемычек между ними по толщине изделия, можно создавать фильтры с постепенным уменьшением размеров пор. Такой метод широко используется при экструзионной 3D-печати полимерных материалов, а также при лазерном спекании порошков.

Использование различных материалов или композиций. Еще одним способом создания градиентных фильтров является применение нескольких материалов с различными физическими свойствами. В процессе аддитивного производства возможно постепенное изменение состава материала, например, путем смешивания порошков различного размера или использования материалов с различной степенью спекания. Это позволяет формировать участки фильтра с различной плотностью и пористостью. В некоторых случаях применяются композиционные материалы, включающие полимеры, керамику или металлические порошки. Такие материалы позволяют создавать фильтры, обладающие высокой механической прочностью и устойчивостью к агрессивным химическим средам.

Контроль размера частиц исходного порошка. При использовании порошковых аддитивных технологий, таких как селективное лазерное спекание или селективное лазерное плавление, важную роль играет размер исходных порошковых частиц. Более крупные частицы порошка после спекания образуют более крупные поры, тогда как мелкие порошки формируют более плотную структуру. Используя порошки различной дисперсности на разных этапах печати, можно создавать фильтры с выраженным градиентом пористости. Постобработка и дополнительная модификация структуры.

После завершения процесса печати фильтрационный материал может подвергаться дополнительной обработке, которая также влияет на структуру пор. К таким методам относятся термическая обработка, химическое травление, вымывание связующих компонентов и спекание. Эти процессы позволяют дополнительно регулировать размер пор, улучшать механические свойства материала и повышать устойчивость фильтра к внешним воздействиям.

В зависимости от используемого материала и принципа формирования слоев можно выделить несколько основных методов аддитивного производства, применяемых для создания градиентных фильтров:

1. *Экструзионные методы* (*FDM/FFF*) – наиболее доступные и распространенные. Позволяют создавать градиентные фильтры из термопластичных полимеров с контролируемой структурой пор за счет изменения расстояния между нитями материала. Преимуществом является простота и низкая стоимость оборудования.

2. *Фотополимеризационные методы* (*SLA, DLP*) – обеспечивают высокую точность формирования пор и возможность работы с фотополимерными смолами, включая биосовместимые. Особенно эффективны для создания микрофильтрацион-

ных элементов с размером пор до 50–100 мкм. Градиентная структура достигается за счет изменения экспозиционных параметров (мощности и времени засветки) по высоте изделия, а также постепенного уменьшения размера ячеек или изменения толщины перемычек между ними в цифровой модели.

3. *Порошковые методы* (*SLS, SLM*) – позволяют изготавливать фильтры из металлов, керамики и тугоплавких полимеров. Такие фильтры обладают высокой термостойкостью и химической инертностью. Градиент достигается изменением параметров лазерного спекания.

4. *Струйные методы* (*PolyJet, MultiJet*) – дают возможность одновременно использовать несколько материалов с различными свойствами, что особенно ценно для создания композиционных градиентных структур.

Дальнейшее развитие технологий 3D-печати открывает новые возможности для создания градиентных фильтров. Основными направлениями исследований являются:

• Разработка новых материалов, специально предназначенных для аддитивного производства фильтрующих элементов.

• Совершенствование методов математического моделирования фильтрационных процессов для оптимального проектирования градиентных структур.

• Создание гибридных технологий, сочетающих несколько методов печати в одном процессе.

• Масштабирование производства от лабораторных образцов к промышленному выпуску.

Градиентные фильтры представляют собой перспективный класс фильтрационных материалов, обеспечивающих высокую эффективность очистки и длительный срок службы. Применение аддитивных технологий для их создания позволяет реализовать принципиально новые подходы к проектированию пористых структур и получать изделия с уникальными характеристиками, недостижимыми при использовании традиционных методов производства.

Методы 3D-печати дают возможность точно контролировать размер, форму и распределение пор по объему фильтра, создавать сложные градиентные структуры и использовать широкий спектр материалов – от полимеров до тугоплавких металлов и керамики. Это открывает путь к созданию фильтров нового поколения для различных отраслей промышленности, медицины и биотехнологии. Дальнейшее развитие аддитивных технологий, совершенствование методов моделирования и появление новых материалов позволит расширить области применения градиентных фильтров и повысить эффективность процессов фильтрации в самых различных областях науки и техники.

Литература

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : учеб. пособие / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина ; М-во образования и науки Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 223 с.
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.