

- Hallab N.J., Bundy K.J., O'Connor K., Moses R.L., Jacobs J.J. Evaluation of metallic and polymeric biomaterial surface energy and surface roughness characteristics for directed cell adhesion // *Tissue Eng.* 2001; 7: 55–71.
- Akkouch A, Zhang Z, Rouabhia M. A novel collagen/hydroxyapatite/poly(lactide-co-ε-caprolactone) biodegradable and bioactive 3D porous scaffold for bone regeneration. *J Biomed Mater Res A.* 2011 Mar 15;96(4): 693-704. doi:10.1002/jbm.a.33033. Epub 2011 Jan 31.

### ОБОСНОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*И.В. ЗЛОБИНА<sup>1</sup>, Н.В. БЕКРЕНЕВ<sup>1</sup>, С.П. ПАВЛОВ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

E-mail: [irinka\\_7@ru](mailto:irinka_7@ru)

Одним из наиболее актуальных технологических трендов в настоящее время являются аддитивные технологии, в которых послойное наращивание материала в соответствии с заданной компьютерной твердотельной моделью практически заменяет традиционные процессы резания, прессования и штамповки [1-4]. Основным преимуществом данных технологий является прямое воспроизведение на основе твердотельной модели изделия любой сложности без применения сложного инструмента и дорогостоящего оснащения. Необходимо отметить значительные успехи в использовании аддитивных технологий не только в быстром прототипировании, но и при изготовлении конструктивных элементов действующих технических систем.

Однако, не смотря на активное развитие отрасли полимерных композиционных материалов (ПКМ), использование последних сопряжено с преодолением различных проблем, среди которых можно выделить выраженную анизотропию физико-механических характеристик, определяемую видом и ориентацией армирующих компонентов. Полностью данный недостаток устранить невозможно, но необходимо стремиться к минимизации его влияния посредством управления структурой материала путем распределения упрочняющих компонентов по определенному закону. Необходимого эффекта можно добиться в частности модификацией объекта за счет введения дополнительной стадии в технологическом процессе - электрофизического воздействия, осуществление которого возможно без вмешательства в синтез материала и цикл производства. Такой способ структурирования ПКМ, полученных при использовании аддитивных технологий, на данном этапе является мало изученным, что обуславливает необходимость дополнительных исследований в области создания научных основ технологического обеспечения аддитивного производства изделий из композиционных материалов.

Как было упомянуто выше, предлагаемый метод обработки материала оказывает воздействие на структуру объекта, в связи с чем изучение данного параметра является определяющим при оценке степени влияния электрофизического воздействия.

В экспериментах использовали 3D принтер модели ZPrinter450 и СВЧ установку с магнетроном OM75S(31) с частотой 2450 МГц. Применяли три режима СВЧ мощности: низкий РI, средний РII и высокий РIII. Обработку осуществляли в течение 10 и 60 с. В соответствии с технологией 3DP из диэлектрического порошка марки Zp130 формировали образцы в виде пластин длиной 80 мм, шириной 8 мм и толщиной 1,5 мм. Применяли финишную пропитку для повышения прочности на основе цианокрилата Z-Bond<sup>TM</sup>90. Образцы были получены в соответствии со следующими схемами: I - образец без дополнительной пропитки; II – образец без дополнительной пропитки с СВЧ обработкой

после формирования; III - образец с дополнительной пропиткой; IV - образец с СВЧ обработкой после формирования и последующей дополнительной пропиткой; V - образец с СВЧ обработкой после дополнительной пропитки; VI – образец с СВЧ обработкой до и после дополнительной пропитки. Соответственно исследовали схемы введения СВЧ модифицирования в процесс 3D печати. Поверхность образцов до испытаний и поверхность зоны излома изучали при помощи цифрового микроскопа *Digital Microscope 2.0 MP 1000X*

Изучение структуры образцов на их изломе (Рисунок 1) показало, что применение СВЧ обработки после дополнительной пропитки сформированных образцов (схемы V и VI) вызывает образование микротрещин в связующем, что, очевидно, в последующем может являться причиной снижения предельных изгибных напряжений.

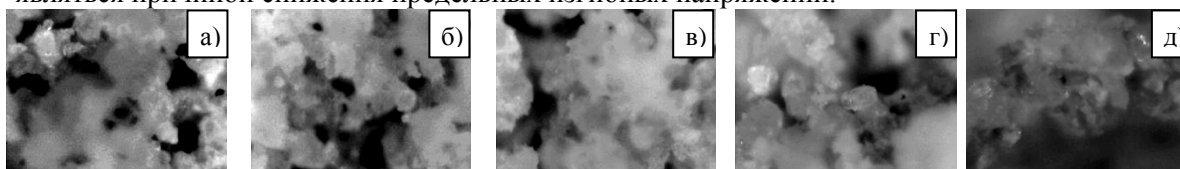


Рисунок 1 – Влияние СВЧ электромагнитного поля и времени обработки на микроструктуру образцов (x400): время 60 с (б, в), время 10 с (г, д) контрольный образец (а); после СВЧ обработки при мощности P1  $\sigma_F = 4,8 \text{ Н/мм}^2$  (б),  $\sigma_F = 4,0 \text{ Н/мм}^2$  (г); при мощности PII  $\sigma_F = 5,3 \text{ Н/мм}^2$  (в),  $\sigma_F = 4,2 \text{ Н/мм}^2$  (д)

Образование микротрещин может быть связано с различными тепло- и электрофизическими характеристиками порошкообразного материала и связующего, приводящими к различному взаимодействию с СВЧ электромагнитным полем и возможному изменению размеров и деформаций отдельных компонентов сформированного композиционного материала. У образца с СВЧ обработкой непосредственно после формирования (схема II) размеры промежутков между частицами (макропоры) снижаются на 9,2 – 24 %, а у образца с пропиткой без СВЧ (схема III) практически не изменяются. При обработке с пропиткой после СВЧ обработки (схема IV) дополнительно повышается однородность структуры – дисперсия размеров пор снижается на 25-32 %. Повышение однородности структуры и уменьшение размеров пор после СВЧ обработки, очевидно, способствует увеличению количества связей между частицами и увеличению предельных изгибных напряжений.

Таким образом, на основе изучения микроструктуры изученных образцов может быть предложен следующий рациональный технологический маршрут при введении операции СВЧ модифицирования в процесс трехмерной печати по технологии 3DP: формирование изделия из порошка на 3D принтере, обработка в СВЧ электромагнитном поле, финишная стабилизирующая пропитка. Для выявления технологических режимов необходимо исследование прочностных характеристик сформированных образцов. Пропитка такой модифицированной структуры очевидно происходит более равномерно, связующее проникает по всему объему в приблизительно равной концентрации «частицы-связующее», что дополнительно увеличивает вероятность равномерного сцепления частиц и формирования однородно прочной (изотропной) композиции.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».*

#### Список литературы

1. Павлов С.П. Оптимизация формы термоупругих тел / С.П. Павлов, В.А. Крысько. – Монография. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. – 160 с.

2. Павлов С.П. Оптимальное армирование стержней в задачах кручения / С.П. Павлов, М.В. Жигалов, Т.С. Балабуха // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: Межвузовский научн. сб. – Саратов, 2009. – С. 151-157.

3. Павлов С.П. Влияние свойств межфазового слоя на эффективные механические характеристики нано композитов / Павлов С.П., Пальков Р.С. // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (DFMN-2013): Материалы V междунар. конф. – Москва, 2013. – С. 554-556.

4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1 (34). – С. 3-33.

### **ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ FDM ИЗ ФИДСТОКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В MIM ТЕХНОЛОГИЯХ**

*Б.Б. БАЗАРБАЙ<sup>1</sup>, Ю.В. ДОНЦОВ<sup>1</sup>, К.С. КОСТИКОВ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Томский политехнический университет

E-mail: bauyrzhan\_4@mail.ru

Аддитивные технологии это одно из прорывных направлений развития современной науки и техники. В основе данных технологий лежат научные аспекты поведения материалов при их высокоэнергетической обработке. Получить заданные свойства материала с помощью аддитивных технологий возможно применяя знания материаловедения и понимая какая структура будет сформирована в готовом изделии.

В процессе 3D печати металлических изделий методами SLM и EBМ зачастую в изделии формируются внутренние напряжения из-за сильно выраженной неравномерности, происходящих при сплавлении процессов, неравномерного остывания изделий.

Данные особенности технологий послойного сплавления при высокоэнергетическом воздействии на порошок металла диктует необходимость постобработки получаемых изделий для снятия внутренних напряжений в материале. Другими характерными недостатками технологий SLM и EBМ является высокая стоимость оборудования и используемого металлического порошка. При этом количество порошка, который необходимо иметь при получении деталей вышеуказанными методами, должно кратно превышать по весу саму деталь. Часть порошка металла в данном случае не подлежит восстановлению и уходит в отход.

С другой стороны, в настоящее время практически в каждый дом, офис, предприятие вошли технологии 3D печати в виде установок, реализующих метод FDM. Эти установки имеют главное достоинство – это их низкая цена и простота использования. Применяемые сырьевые материалы также отличаются низкой стоимостью и высокой доступностью.

Целью данной работы явилось разработка принципиально новой технологии получения металлических изделий сложной формы методом FDM с использованием в качестве сырьевых материалов фидстоков, используемых в MIM (Metal Injection Molding) технологиях.

Реализация данной цели позволит получить комбинацию преимуществ FDM технологии [1] с качеством готовых изделий, получаемых методом MIM.

В качестве исходного сырья в работе планируется применять готовые композиции для MIM фирмы Catamold, а также композиции собственной разработки, представляющие собой смесь металлического порошка и полимерного связующего.

Для реализации вышеуказанной технологии создан специальный 3D принтер, реализующий технологию подачи массы не плунжерным методом, как в традиционном FDM, а шнековую. Этот подход дает ряд преимуществ: повышение плотности получаемых изделий, а также отсутствие необходимости изготовления филамента.