

It was also found that the failure of the gyroid-type structures under mechanical load has several features related to their geometry and the materials they are made of. In particular, failure can occur in areas with the highest stress concentrations. In gyroids, such zones can occur at the points of connection of elements or near defects. In addition, gyroid structures can respond differently to static and dynamic loads. For example, fatigue cracks can be expected to form under dynamic loads.

Gyroid structures can exhibit fractal properties to the greatest extent, which affects the nature of crack propagation and failure. This can complicate the prediction of behavior under loads.

At the same time, modern gyroid structures can be made adaptive, changing their rigidity in response to changes in loads, which can help avoid failures.

Studying these features can help in the development of more stable and durable PLA structures based on gyroids, taking into account specific application conditions and the characteristics of materials with nanoscale fillers. This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (Project No. T23KUB-007).

References

1. Calcium phosphate compositions with polyvinyl alcohol for 3D-printing in Inorganic Materials / O. N. Musskaya, V. K. Krut'ko, A. I. Kulak [et al.] // Applied Research. – 2020. – Vol. 11, N 1. – P. 192–197.
2. Composite materials and coatings based on polylactide and nanosized fillers for bioprinting / S. A. Filatov, M. N. Dolgikh, O. S. Filatova [et al.] // Heat and mass transfer–2023 : collection of scientific papers / ITMO named after A. V. Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2023. – P. 283–287.
3. Formation of tissue-engineering materials based on porous scaffolds from bioresorbable materials based on polylactide / S. A. Filatov, M. N. Dolgikh, E. A. Paz Esteves [et al.] // Actual problems of strength : materials of the LXVIII Int. scientific conferences, Vitebsk, May 27–31, 2024 / UP “IVC of the Ministry of Finance”. – Minsk, 2024. – P. 313–315.

УДК 539.2-022.532

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ PLA С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

**С. А. Филатов¹, М. Н. Долгих¹, О. С. Филатова¹, Э. А. Пас Эстевес²,
Н. А. Гавриленко¹, Е. В. Батырев¹**

*¹ Государственное научное учреждение «Институт
тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной
академии наук Беларуси», г. Минск*

*² Центр изучения передового и устойчивого производства,
Университет Матансаса «Камило Сьенфуэгос», Республика Куба*

Возможность интерактивного внесения различных функциональных групп и компонентов на поверхность углеродных волокон позволяет адаптировать свойства в зависимости от планируемого применения. Добавление допированных углеродных волокон может быть сочетано с методами создания пористых структур, что улучшает прочность и проницаемость для биологических жидкостей, что, в свою очередь, способствует лучшей остеоинтеграции.

Ключевые слова: аддитивные технологии, послойный синтез, полимерные материалы, функционализация материалов, 3D-печать.

FUNCTIONALIZATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PLA AND CARBON FIBERS

S. A. Filatov¹, M. N. Dolgikh¹, O. S. Filatova¹, E. A. Paz Esteves²,
N. A. Gavrilenko¹, E. V. Batyrev¹

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk

²Center for the Study of Advanced and Sustainable Manufacturing,
University of Matanzas, the Republic of Cuba

The ability to introduce various functional groups and components onto the surface of carbon fibers interactively allows its properties to be adapted depending on the planned application. The addition of doped carbon fibers can be combined with techniques to create porous structures, that improves strength and permeability to biological fluids ensuring better osseointegration.

Keywords: additive technologies, layer-by-layer synthesis, polymer materials, functionalization of materials, 3D-printing.

Аддитивные технологии являются технологиями послойного синтеза, позволяющими осуществить прямое «цифровое» производство сложных трехмерных изделий по компьютерной модели. Использование биосовместимых углеродных волокон [1, 2] в полимерах, используемых для 3D-печати, позволяет сформировать изделия, включающие трехмерные структуры, имеющие различную электрическую проводимость, заданные механические и теплофизические свойства.

Другим перспективным классом материалов, для функционализации таких традиционных полимерных материалов как полилактида (PLA), являются углеродные (карбонизированные) аэрогели с большой удельно площадью поверхности (активированные углеродные волокна, аэрогели). Углеродные волокна и углеродные аэрогели имеют графитовую структуру с прочными ковалентными связями сильно анизотропных кристаллитов, со слабыми силами Ван-дер-Ваальса между слоями.

Модификация поверхности углеродных материалов перед введением их в PLA матрицу может быть осуществлена воздействием плазмы, термической и химической обработкой. Хотя благодаря сильным углеродным ковалентным связям поверхность углеродных материалов инертна по отношению к кислотам и щелочам при комнатной температуре, химическая модификация поверхности возможна в атмосфере барьерного разряда, либо за счет окисления или фторирования.

Примером функционализации является модификация поверхности углеродных волокон Бусофит барьерным разрядом в атмосфере изобутана и водорода (рис. 1).

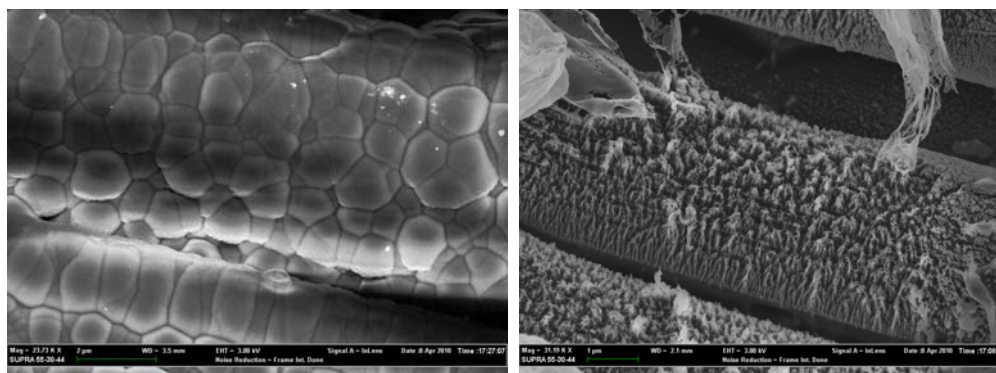


Рис. 1. Модификация поверхности углеродных волокон барьерным разрядом в атмосфере изобутана (слева) и водорода (справа)

Для создания полимерных материалов с бактерицидными свойствами в их состав можно вводить волокна, декорированные металлическими наночастицами при их обработке в растворах солей с последующим восстановлением в водороде при температурах до 400 °С (рис. 2).

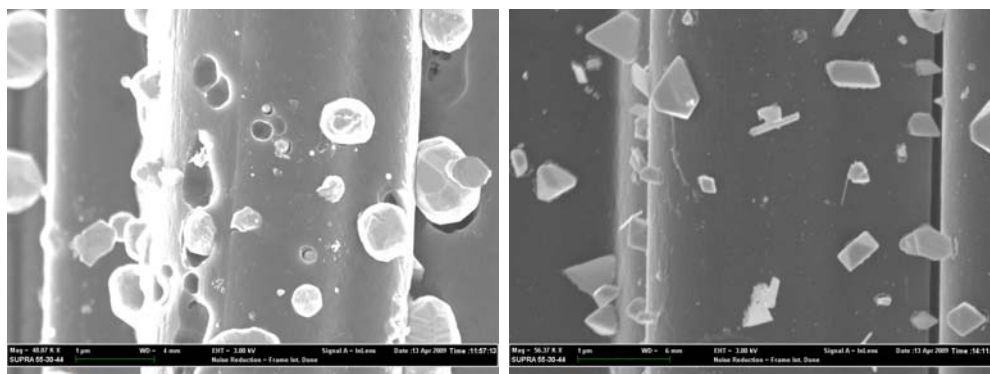


Рис. 2. Углеродное волокно, используемое в качестве наполнителя полимерного PLA филамента при 3D-биопринтинге, декорированное частицами кобальта (слева) и никеля (справа)

Использование плазмы барьерного разряда в электродной системе, где один из электродов изолирован от поверхности, на которую подается напряжение, позволяет создать высокоэнергетические условия для ионизации и возбуждения газов, при этом минимизируя термическое воздействие на обрабатываемый материал. В таком процессе плазма взаимодействует с углеродными волокнами, приводя к удалению загрязнителей и образованию активных функциональных групп (например, $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$). Это увеличивает реакционную способность поверхности, а возросшая реакционная способность улучшает адгезию углеродных волокон к матрицам, что особенно важно в композитных материалах. Применяя плазменную обработку, можно создать пространство, способствующее адсорбции металлов или оксидов, которые затем будут преобразованы в наночастицы. Эти частицы могут служить для введения новых функциональных свойств, таких как антимикробное действие или каталитическая активность. При этом процесс плазменной функционализации позволяет точно контролировать размер и распределение наночастиц на поверхности углеродных волокон через регулирование условий обработки (параметры давления, времени и состава плазмы).

Существенным преимуществом плазменной функционализации является то, что плазма барьерного разряда дает возможность проводить функционализацию без разрушения волокон (это критично для сохранения их механических свойств). Возможность интерактивного внесения различных функциональных групп и компонентов на поверхность углеродных волокон позволяет адаптировать свойства в зависимости от планируемого применения. В качестве наполнителей для полимерных материалов могут быть также использованы углеродные аэрогели, полученные по золь-гель технологии (рис. 3).

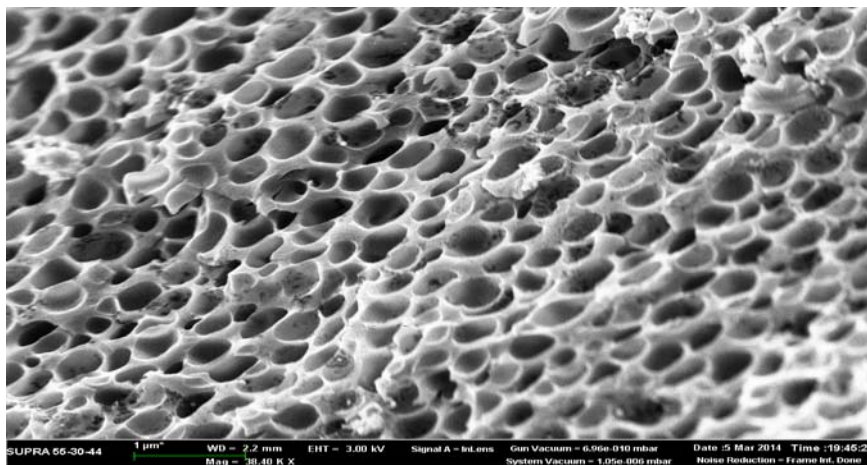


Рис. 3. Типичная структура углеродного аэрогеля с наноразмерными мезопорами ($S_{BET} = 800\text{--}900 \text{ m}^2/\text{g}$)

Преимущества остеоимплантов с добавлением углеродных волокон обусловлены увеличением прочности и жесткости материала. Это позволяет уменьшить риск деформации и разрушения импланта под действием нагрузок, которые возникают в процессе эксплуатации. Также структура углеродных волокон может способствовать улучшению взаимодействия с костной тканью. Многочисленные работы показали, что импланты с углеродными волокнами лучше интегрируются с окружающими тканями, что повышает надежность их фиксации.

Использование углеродных волокон позволяет создавать более легкие конструкции по сравнению с традиционными металлическими имплантами, сохраняя при этом достаточную прочность.

Функционализация поверхности углеродных волокон с помощью плазмы барьерного разряда – это эффективный и многообещающий подход, дающий возможность создавать новые свойства и улучшать взаимодействие углеродных волокон с различными матрицами, что открывает новые перспективы в области материаловедения и новейших технологий. Функционализированные углеродные волокна могут использоваться в различных отраслях, в том числе в медицине (например, для остеоимплантов), а также в композитных материалах для улучшения их механических и химических свойств.

Добавление допированных углеродных волокон возможно в сочетании с методами создания пористых структур, в результате чего улучшается прочность и проницаемость для биологических жидкостей, что, в свою очередь, способствует лучшей остеоинтеграции. Следует отметить, что углеродные волокна считаются биосовместимыми. Это минимизирует риск отторжения импланта организмом, а долгосрочные эффекты на биологическую совместимость и свойства материалов при длительном контакте с живыми тканями требуют дальнейших исследований. Для достижения оптимальных биомеханических свойств и остеоинтеграции необходимо учитывать особенности структуры и распределения углеродных волокон в матрице.

Выполненные исследования показывают, что остеоимпланты с добавлением углеродных волокон обладают потенциалом для улучшения результатов хирургических вмешательств и качества жизни пациентов, но требуют дальнейшего изучения и оптимизации.

Введение углеродных наполнителей в состав PLA при биопринтинге перспективно для создания остеоимплантатов с высокой биохимической инертностью и хорошей пролиферацией клеточного материала.

Литература

1. Carbon fiber-reinforced bone cement in orthopedic surgery / R. M. Pilliar, R. Blackwell, I. Macnab, H. U. Cameron // Biomed. Mater. Res. – 1976. – Vol. 10. – P. 893–906.
2. A new volar plate made of carbon-fiber-reinforced polyetheretherketon for distal radius fracture: Analysis of 40 cases / L. Tarallo, R. Mugnai, R. Adani [et al.] // Orthop. Traumatol. – 2014. – July 15 (4). – P. 277–283.

УДК 617.55-007.43-089.844

**ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ СОЗДАНИЯ
ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ СТЕЛЕК**

**С. А. Филатов¹, М. Н. Долгих¹, Э. А. Пас Эстевес², О. С. Филатова¹,
Н. А. Гавриленко¹, Е. В. Батырев¹**

¹*Государственное научное учреждение «Институт
тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной
академии наук Беларуси», г. Минск*

²*Центр изучения передового и устойчивого производства,
Университет Матансаса «Камило Сьенфуэгос», Республика Куба*

Рассмотрены особенности создания персонализированной обуви по цифровым моделям с помощью аддитивных технологий 3D-печати. Показано, что использование аддитивных подходов к производству обуви позволяет ускорить процесс производства индивидуальных корректирующих и ортопедических изделий.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, персонализированные технологии.

**3D-PRINTING TECHNOLOGIES FOR CREATING
PERSONALIZED INSOLES**

**S. A. Filatov¹, M. N. Dolgikh¹, E. A. Paz Esteves², O. S. Filatova¹,
N. A. Gavrilenko¹, E. V. Batyrev¹**

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk*

²*Center for the Study of Advanced and Sustainable Manufacturing,
University of Matanzas, the Republic of Cuba*

The article examines the features of creating personalized footwear based on digital models using additive 3D-printing technologies. The use of additive approaches to the production of footwear allows us to speed up the process of producing customized corrective and orthopedic products.

Keywords: 3D-printing, additive manufacturing, personalized technologies.

Современное производство обуви в мире достигает 20 млрд пар обуви в год (стоимость глобального рынка обуви – 400 млрд долл.). Для ее прототипирования широко используется 3D-печать. В последние годы развитие аддитивного производства позволило перейти к массовому производству так называемых межподошв (3D-printed midsoles) – сэндвич-структур на основе материала, зажатого между внешней и внутренней стороной обуви. Уровень использования 3D-печати в произ-