УДК 621.792.6

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86

*И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. Л. Плотников, И. А. Гуцин***РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ
С АРМИРОВАНИЕМ НЕПРЕРЫВНЫМ ВОЛОКНОМ*****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: is.torubarov@gmail.com

Исследованы методы армирования изделий в аддитивном производстве с помощью непрерывных волокон, и обозначены общие проблемы, свойственные технологиям 3D печати, в том числе печати с непрерывным армированием. Предложено направление развития метода упрочнения изделий непрерывным волокном на основе многокоординатной печати изделий с неплоскими слоями.

Ключевые слова: аддитивные технологии, композиционный материал, непрерывное армирование, непрерывное углеволокно.

*I. S. Torubarov, A. V. Drobotov, A. L. Plotnikov, I. A. Gushchin***EVOLVEMENT OF THE 3D PRINTING WITH REINFORCEMENT
BY CONTINUOUS FIBER' TECHNOLOGY****Volgograd State Technical University**

Methods of reinforcing products in additive manufacturing using continuous fibers was investigated in the paper, and also common problems inherent in 3D printing technologies including printing with continuous reinforcement was identified. The direction of development of the method of strengthening products with continuous fiber based on multi-axis printing of products with non-planar layers is proposed.

Keywords: additive manufacturing, composite material, continuous reinforcement, continuous carbon fiber.

Аддитивные технологии (АТ), созданные как средство быстрого прототипирования, уже сейчас получают признание и в качестве способа получения конечных объектов производства. Для некоторых изделий они выступают наряду с традиционными способами изготовления, такими как механическая обработка или литье, или даже вытесняют их. АТ активно применяют при изготовлении пресс-форм и форм для литья, функциональных элементов авиационной и ракетно-космической техники, имплантов и протезов [1].

По сравнению с традиционными металлообрабатывающими станками установки аддитивного производства (АП) обладают рядом преимуществ, связанных в первую очередь с аддитивным характером производства (т. е. наращиванием материала вместо его срезания с заготовки): экологичность, экономичность, малый износ рабочего инструмента, меньшие требования к жесткости системы, быстрота и высокая степень автоматизации процесса подготовки производства, а также сокращение времени и стоимости при проведении НИОКР. Отдельно следует отметить возможность построения моделей со сложной внешней формой и неоднородной внутренней структурой.

В силу простоты и дешевизны как оборудования, так и используемых материалов наибольшее распространение среди АТ получила технология производства методом наплавления материала (Fused Filament Fabrication, FFF) – как правило, термопластичного полимера. Однако при производстве конечных изделий по этой технологии на первое место выходит вопрос прочности. В силу физических свойств полимерных материалов при плавлении их макромолекулы вытягиваются в направлении течения, в результате чего напечатанные по методу FFF объекты отличаются выраженной анизотропией механических свойств, что было показано, например, в работах [2, 3]: прочность изделий вдоль слоев существенно выше, чем в перпендикулярном направлении.

К периоду между 2015 и 2020 гг. в FFF-печати большое распространение получил такой способ повышения прочности, как использование филаментов, наполненных рубленым волокном. При испытаниях на растяжение и сжатие такие материалы показывали прочность уже на уровне пластиков, изготовленных литьем под давлением или пултрузией [4]. Однако эти характеристики получены с приложением усилия в плоскости слоя. Величина межслой-

ной прочности для наполненных термопластиков мало отличается от ненаполненных материалов.

В работе [5] анализировались возможные подходы к повышению прочности печатных изделий: оптимизация параметров процесса производства и использование высокотемпературных полимеров (таких как PEEK и ULTEM-пластики с температурой плавления около 400°C), печать моделей изогнутыми слоями вместо плоских и многоосевая печать. В отдельных случаях они обеспечивают некоторый прирост прочности, а применение многоосевой печати даже позволяет практически нивелировать анизотропию.

Однако у производства всегда стоит задача «еще прочнее и легче». И на данный момент самым перспективным способом дальнейшего повышения прочности полимеров является ис-

пользование непрерывных армирующих волокон. Статья [6] представляет актуальный (на конец 2020 г.) обзор разработанных методов укладки термопластика с непрерывными волокнами, которые схематично изображены на рис. 1.

Исторически первыми методами являются печать с пропиткой волокна на месте (In-situ Impregnation) и с проточной пропиткой (Inline Impregnation). В этих случаях жгут из сухих волокон проходит через емкость с жидким связующим в экструдере (In-situ) или перед экструдером, например, в ванне (Inline), после чего через сопло экструдера укладывается на платформу. Связующее либо самостоятельно застывает при охлаждении (если использовался термопластик), либо подвергается внешнему воздействию (например, фотополимерное связующее отверждают УФ-излучением).

Рис. 1. Принципиальные схемы укладки непрерывного волокна в процессе 3D печати

Как поточная, так и «местная» пропитка волокна имела один общий недостаток: невозможность обеспечить таким образом полную и равномерную пропитку всего жгута, что приводило к возникновению пор. На решение этой проблемы были направлены методы печати с экструзией препрега (Towpreg Extrusion) и ко-экструзией связующего с препрегом (Co-Extrusion with Towpreg): в этом случае использовалось волокно, предварительно пропитанное неким связующим материалом в ходе отдельного процесса (собственно, препрег), за счет чего удалось почти полностью устранить пористость в жгуте.

Пионером в этой области выступила американская компания Markforged. Технология Markforged основывается на использовании

препрегов с термопластичным связующим, в первую очередь – на основе нейлона (Опух – смесь нейлона с наполнителем из коротких углеродных волокон). По данным о прочности материалов Markforged за 2020 г. предел прочности образцов из нейлона, армированного непрерывным углеродным волокном, составил 800 МПа при растяжении и 540 МПа при изгибе, что в обоих случаях примерно в 10 раз превышает показатели для пластиковых образцов [7], и даже превосходит результаты лучших алюминиевых сплавов.

По пути коэкструзии препрега со связующим материалом пошла российская компания Anisoprint. Как материал для пропитки жгута был использован реактопласт – в отличие от термопластиков, этот класс полимеров после

нагрева, облучения или т. п. обработки затвердевает окончательно и не плавится каждый раз при нагреве. В качестве «связующего», для образования «тела» изделия, используется все тот же термопластик, который экструдируется в процессе печати одновременно с подачей нагретого препрега.

Среди недостатков всех технологий печати с укладкой непрерывного волокна можно отметить слабость межслойного взаимодействия все так же на уровне стандартной 3D печати или немногим выше [8], наличие пор на границах раздела матрицы и арматуры, а также невысокую производительность.

На решение проблем пористости был нацелен способ соединения (консолидации) на месте (In-situ Consolidation), разработанный компанией Arevo. Суть процесса заключается в подаче препрега, его резком нагреве с помощью лазера и соединении с предыдущим слоем посредством прижимного ролика. Предварительное исследование [8], проведенное компанией, показало прочность образцов при стандартных испытаниях на уровне данных Markforged или вдвое выше при однонаправленной укладке волокон (что естественным образом ухудшает механические характеристики во всех остальных направлениях).

Однако ни один из описанных выше методов не направлен на решение первичной проблемы: низкой прочности печатных изделий в направлении, перпендикулярном плоскости построения. Этот факт отмечается, например, в исследовании [9]. Там же предлагается способ упрочнения композитного печатного объекта: т. н. «Z-pinning»: оформление в модели специальных вертикальных отверстий и пропускание через них композитного филамента, который обеспечивает «сшивание» плоских слоев и принимает на себя нагрузку, приложенную перпендикулярно слоям. Данный способ имеет ограниченное применение и к тому же грозит образованием значительных пор в местах «сшивания». Тем не менее, он ясно показывает потребность в таких 3D печатных структурах, которые, безусловно, будут уступать «однонаправленным» образцам при растяжении вдоль слоев, но показывать лучшие результаты при более сложных способах нагружения.

Проведенный анализ способов армирования в современном аддитивном производстве и их недостатков делает очевидным направление дальнейшего развития: построение изделия не из плоских слоев, т. к. при этом в принципе нельзя избавиться от слабой межслойной прочности, а путем выкладки материала по объемным (пространственным) траекториям. В настоящей работе авторами сделан следующий шаг: совмещены в одном процессе аддитивного производства композитная и многоосевая печать. Использование в многокоординатной установке АП композитного филамента на основе непрерывного волокна позволит многократно повысить прочность печатного изделия (по сравнению с неармированной 3D печатью), обеспечив при этом его способность эффективно противостоять разным видам нагрузки, действующим в различных направлениях. Увеличение прочности и сглаживание анизотропии – реализация двух этих требований еще больше раздвинет границы возможностей АП.

Как отмечено выше, вопросы армирования непрерывным волокном по плоским слоям уже рассматривались другими научными коллективами, а вот вопросы многоосевой печати решались только в «ручном» режиме. Для небольшого числа опытов использования сразу нескольких (более трех) осей для 3D печати управляющая программа составлялась практически вручную. Никаких универсальных подходов для автоматического получения G-кода программы производства изделия по его 3D модели ранее не предлагалось. Поэтому авторами предложен собственный алгоритм подготовки изделий к печати, использующий пять степеней свободы для позиционирования заготовки (печатной платформы) и инструмента (экструдера).

Процесс 3D печати изделия по пяти координатам схематично изображен на рис. 2. Кинематика устройства была описана в работе [10]. В общем виде процесс состоит из трех этапов: производство поддерживающей оснастки на цилиндрической приемной поверхности, создание на нем первой части изделия (сердечника цилиндрической или любой другой формы), послойное наложение материала на первую часть по пространственным траекториям.

Рис. 2. Схема процесса 3D печати по пяти координатам

Для реализации данного подхода для 3D моделей практически произвольной формы авторами разработано собственное программное обеспечение. В его основу положен популярный слайсер «Ultimaker Cura» с открытым исходным кодом, но алгоритм генерации траекторий движения печатающей головки в нем заменен на собственный. Интерфейс разработанной программы показан на рис. 3.

Для обеспечения возможности армирования изделия непрерывным волокном разрабатываемый слайсер был доработан с целью печати одного изделия двумя материалами: основным термопластичным материалом и препрегом.

Траектория выкладки препрега генерируется специальным образом: выбирается наиболее длинная траектория с минимизацией количества разрывов. Также внедрено управление «ножом», отрезающим препрег в нужный момент времени. Определение момента отреза происходит с учетом расстояния между «ножом» и соплом для выкладки препрега: в каждом слое отрез происходит заранее, после чего отрезанный участок выкладывается в конце траектории. Слайсер позволяет комбинировать внутри изделия произвольное количество армирующих слоев и слоев основного материала, гибко регулируя плотность волокон в слое.

Рис. 3. Интерфейс слайсера для создания изделий по пяти координатам с армированием

Рис. 4. Подготовка 3D моделей для печати с армированием:

a – призматический брусок с плоским армированием; *б* – призматический брусок с цилиндрическим армированием; *в* – модель адаптера противовирусного фильтра с армированием (в разрезе, показаны армирующие волокна); *г* – модель адаптера противовирусного фильтра (показана оболочка из термопластика)

С помощью разработанного слайсера сгенерированы программы производства призматических брусков размером $100 \times 15 \times 8$ мм (рис. 4, *a* и *б*) с плоским и цилиндрическим армированием, а также адаптеров противовирусных фильтров (рис. 4, *в* и *г*) с цилиндрическим армированием.

Для проверки предложенных решений опытный образец принтера был оснащен экструдером для печати непрерывным волокном и

системой подачи волокна в экструдер. Для устранения проблемы неравномерной пропитки волокна использовался препрег с термопластичным связующим, разработанный компанией Markforged. Экструдер для волокна и система его подачи заменяют соответственно дополнительный экструдер для пластикового филамента и крепление дополнительной катушки материала, которые имеют место в обычном двухэкструдерном 3D принтере.

Рис. 5. Напечатанные пробные изделия с непрерывным армированием волокном:

a – цилиндрическая деталь с плотным армированием; *б* – адаптер противовирусного фильтра с редким армированием в несколько слоев

Итак, было установлено, что по причине технических сложностей с пропиткой арми-

рующих волокон в процессе печати, приводящей к значительной пористости в слое армиро-

вания, целесообразно печатать волокном, предварительно пропитанным термопластичным связующим. В рамках разработки конструкции опытного образца принтера для печати непрерывным волокном было установлено, что армирование «в плоскости» повышает прочность изделия только в одном или максимум в двух направлениях, а в направлении, перпендикулярном оси построения, прочность изделия в несколько раз меньше, чем в слое армирования. Поэтому для получения симметричного армирования нужно строить изделие не из плоских слоев, а из пространственных пересекающихся траекторий, для чего необходимо задействовать дополнительные степени свободы в системе заготовка-инструмент. Наиболее рациональным представляется использование пяти степеней свободы [10]. Для их применения разработано собственное программное обеспечение для автоматической генерации программы производства изделия по его 3D модели.

Следующий этап в разработке опытного образца принтера – отладка программного обеспечения и технологии производства армированных волокном изделий. После получения удовлетворительных результатов по печати более сложных моделей с армированием также необходимо провести прочностные испытания для оценки влияния непрерывного армирования по 5 координатам в сравнении с 3-координатной укладкой волокна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) : учебное пособие / В. А. Валетов. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
2. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach / A. Alafaghani, A. Qattawi, B. Alrawi, A. Guzman // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – № 10. – С. 791-803. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917302615> (дата обращения: 23.03.2021).
3. Hambali, R. H. Determination of the effect of part orientation to the strength value on additive manufacturing FDM for end-use parts by physical testing and validation via three-dimensional finite element analysis / R. H. Hambali, P. Smith, A. Rennie. // *International Journal of Materials Engineering Innovation*. – 2012. – № 3 (3/4). – С. 269-281.
4. Yasa, E. Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites / E. Yasa, K. Ersoy. // *Aircraft Technology*. – 2018. – № 7. – С. 147-169. – URL: <https://cdn.intechopen.com/pdfs/60211.pdf> (дата обращения: 20.03.2021).
5. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition / А.Р. Авдеев, А.А. Швец, И.А. Гушин [и др.]. // *Machines*. – 2019. – № 7 (3). – 18 с. – URL : <https://www.mdpi.com/2075-1702/7/3/57> (дата обращения: 02.04.2021).
6. Mason, H. 3D printing with continuous fiber: A landscape / H. Mason, G. Gardiner // *CompositesWorld* : [сайт]. – 2020. – 15 окт. – URL: <https://www.compositesworld.com/articles/3d-printing-with-continuous-fiber-a-landscape> (дата обращения: 02.04.2021).
7. Markforged Composites Datasheet [Электронный ресурс] // Markforged, Inc. – 2020. – URL: <https://www-objects.markforged.com/craft/materials/composites-data-sheet.pdf> (дата обращения: 31.03.2021).
8. Zhang, D. Reliable Optimized Structures with High Performance Continuous Fiber Thermoplastic Composites From Additive Manufacturing (AM) / D. Zhang, N. Rudolph, P. Woytowicz. // *SAMPE 2019 Conference & Exhibition, 20-23 May 2019, Charlotte, NC, USA*. – Diamond Bar, CA, United States : SAMPE Journal, 2019. – 20 с. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Reliable-Optimized-Structures-with-High-Performance-Zhang-Rudolph/6c376e30cdf8c17a91951492caaae8ba2b44fbbc> (дата обращения: 02.04.2021).
9. Z-Pinning approach for 3D printing mechanically isotropic materials / C. Duty, J. Failla, S. Kim [и др.]. // *Additive Manufacturing*. – 2019. – № 27. – С. 175-184. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860418310492> (дата обращения: 06.02.2021).
10. Пушкарев, В. В. Компоновка устройств для объемной печати экструдруемым расплавом деталей сложной формы / В. В. Пушкарев, А. В. Дроботов // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 1). – С. 121–123.