

УДК 624.016

**СПОСОБ ВОЗВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ НА 3D ПРИНТЕРЕ
С ВНУТРЕННИМ СИЛОВЫМ КАРКАСОМ ИЗ КАРБОНОВОГО ВОЛОКНА****Торопов А.Л.***ООО «Инженерный центр «Апрель», Москва, e-mail: office@aprilgroup.ru*

В статье рассмотрены вопросы прочности пространственных конструкций, выполненных по аддитивным технологиям на 3D принтере. Представлен анализ зависимости прочности деталей от направления формирования структуры, плотности заполнения, диаметра сопла экструдера, скорости печатания и ряда других параметров. Представлены данные по испытаниям образцов деталей на разрушение для некоторых материалов. Выявлен большой разброс параметров прочности деталей и узлов, выполненных на 3D принтере и их противоречивость, в частности отсутствие зависимости монотонного повышения прочностных характеристик от прочности заполнения структуры. Описан способ возведения каркаса конструкций с использованием 3D принтеров с двумя экструдерами. Применены растворимые пластики для формирования структуры оболочки произвольного силового каркаса с последующим формированием внутреннего силового каркаса, армированного карбоновым волокном в виде нитей или рукавов. Способ защищен патентом РФ. Представлены результаты испытаний на разрушение деталей, выполненных по данной технологии. Технология формирования пространственных конструкций с произвольными структурами силовых каркасов применена в ряде узлов солнечных коллекторов и корпусов автомобилей. Даны некоторые рекомендации построения указанных структур. Описаны возможные направления применения разработанной технологии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D принтер, каркас конструкций, карбоновое волокно, прочность**METHOD OF BUILDING OF CONSTRUCTIONS ON 3D PRINTER
WITH INTERNAL POWER FRAMES MADE FROM CARBON FIBER****Toropov A.L.***ООО «Engineering Center «April», Moscow, e-mail: office@aprilgroup.ru*

This article deals with the issues of strength of spatial constructions made with use of additive technologies on a 3D printer. This article includes analysis about the dependence of strength of parts from direction of formation of structure, filling density, extruder nozzle diameter, printing speed and several other parameters. Data are presented about testing of samples of parts for destruction for some materials. Identified a large variation in the strength parameters of parts and components made on a 3D printer and their inconsistency, in particular, the lack of dependence of monotonous increase in strength characteristics connected with the strength of filling of the structure. A framework construction method using 3D printers with two extruders is described. Soluble plastics are used for the formation of the arbitrary shell structure with further forming inner power frame with use of reinforced carbon fiber in the form of filaments or sleeves. This method is protected by Russian Federation patent. Presented the results of tests about the destruction of the parts made by this technology. The technology of forming of spatial constructions with structural elements of the power frames, is used in the nodes of solar collectors and car bodies. This article provides some guidance how to build such structures. The possible directions of application of the developed technology are described.

Keywords: additive technology, 3D printer, frame designs, carbon fiber, toughness

Аддитивные технологии находят все большее применение и являются одним из путей замены традиционных методов (литья, штамповки) изготовления сложных пространственных конструкций и деталей в совершенно разных областях промышленности. Запуск любого нового серийного изделия массового производства связан с изготовлением большого количества прессформ, стоимость которых велика и влияет на конечную стоимость товаров для потребителя. Кроме того, традиционные технологии требуют значительных сроков подготовки производства для ввода новой модели, развитой инфраструктуры предприятия и высокой квалификации персонала.

В настоящее время 3D принтеры широко применяются в изготовлении макетов, прототипов, моделей и практически не используются в массовом производстве. Это

обусловлено недостаточным изучением прочностных свойств деталей и узлов, выполненных по данной технологии, при различных механических и температурных нагрузках реальных условий эксплуатации.

Цель исследования: изучение прочностных свойств деталей, изготовленных по FDM технологии, и возможности ее применения для изделий массового производства.

При использовании FDM (моделирования методом наплавления) технологии печати деталей на 3D принтере, как наиболее массовой, важно исследование влияния как механических характеристик применяемых материалов, так и параметров пространственно-скоростного режима печатания, расположения печатающей головки и диаметр сопла экструдера, температурного режима печати. Это обусловлено тем, что прочностные характеристики деталей, уз-

лов и вопросы их старения при длительной эксплуатации в реальных условиях, зависят не только от прочностных характеристик и физико-механических свойств пластического материала, но и от адгезионного сцепления между волокнами структуры, напечатанной на 3D принтере.

Вопросы испытания на прочность деталей, изготовленных по FDM технологии, в том числе сравнение прочности исходного материала (нити) и переплавленного, изготовленной ячеистой структуры при разных направлениях приложенной нагрузки, представлены в работах [1–3], высокотемпературных FDM пластиков, в работе [4].

В работе [1] указано, что ожидаемого монотонного увеличения прочностных характеристик напечатанного образца при увеличении процента заполнения не происходит. В диапазоне заполнения 20–60% прочностные характеристики испытываемых деталей остаются практически постоянными. Рост характеристик прочности при плотности заполнения от 60 до 80% составил около 30%. Более того, имело место снижение прочности при 50-процентном заполнении испытываемого образца, которое авторы объяснили возрастанием концентраторов на единицу объема. Также отмечено, что адгезионная прочность материала ниже механической.

В работе [2] также отмечается незначительное изменение прочности испытываемых деталей на изгиб при заполнении 20–80% и снижение характеристик при заполнении в диапазоне 50–60%. С значительным ростом до 6 раз прочности на изгиб при 100% заполнении, при этом масса детали в 2,5 раз больше, чем при 20% заполнении.

Анализ литературы по изучению вопросов прочности деталей, напечатанных по FDM технологии, выявил большой разброс прочностных характеристик в зависимости от конфигурации деталей, пространственной ориентации структуры детали при ее изготовлении, диаметра и скорости перемещения сопла печатающей головки, величины заполнения, толщин стенок, направления укладки волокон, способах хранения исходных материалов и многих других факторов. Зафиксированы значительные отличия в определении прочностных параметров при математическом моделировании и фактическими испытаниями. Все это затрудняет использование данного способа изготовления в массовом и мелкосерийном производстве ответственных деталей и конструкций. Преимущества универсальности FDM технологии нивелируются неопределенностью поведения изготовленных изделий, особенно если рассматривается экс-

плуатация их длительное время при разных температурных и климатических условиях.

В последнее время появляются различные композитные материалы для использования на 3D принтере. Обзор некоторых из них представлен в работах [5, 6]. Инженерные филаменты, армируемые углеродным волокном, имеют более высокие прочностные характеристики. Но важен размер волокон, в противном случае данные добавки становятся декоративными присадками. Мелкодисперсный порошок из любого материала практически никак не влияет на прочность, а более длинные волокна повышают прочность, но при небольших диаметрах сопла печатающей головки использование длинных армирующих волокон проблематично. Кроме того, возникают дополнительные проблемы с подбором материала сопла головки экструдера, поскольку применение данных материалов имеет абразивный эффект и сильно влияет на срок службы сопел. За несколько часов непрерывной работы принтеров, диаметр сопла может увеличиться на 20–30%, что также влияет на стабильность механических свойств изготавливаемых конструкций.

Универсальность FDM технологии при изготовлении изделий произвольной формы большое преимущество, которое не хочется терять. В работе [7] предложен компромисс, который позволяет, с одной стороны, использовать все преимущества технологий, с другой стороны, дать конструкции стабильные прочностные характеристики, причем очень высокого порядка.

Суть изобретения заключается в способе возведения каркаса конструкций с использованием FDM технологии на 3D принтерах с двумя экструдерами. Первый материал предназначен для формирования внешней формы изделия, второй – для формирования внутренней структуры произвольного силового каркаса. В качестве второго материала 3D печати применяются растворимые пластики, к примеру PVA-пластик (Polyvinyl alcohol) или поливинилацетат, или другие, совместимые с основным материалом пластики. После растворения второго материала внутри изделия произвольной формы возникает пространственная пустотелая канальная структура, которая особым способом заполняется полноценными карбоновыми нитями или рукавами с последующим наполнением каналов твердеющим полимером. После окончательного затвердевания мы имеем легкую конструкцию произвольной формы, напечатанной на 3D принтере по FDM технологии, внутри которой находится силовой каркас из углепластика или стекловолокна.

Материалы и методы исследования

Для подтверждения идей, указанных в работе [7], а также для проверки влияния некоторых процессов изготовления конструкций на показатели прочности, проведены стендовые испытания. В качестве образца рассматривались детали тип III, № 6 по ГОСТ 1497-84. Испытательное оборудование: универсальная испытательная машина ИР 5082-50, зав. № 45 (свидетельство о поверке № 325475, действительно до 17.10.2019 г.), экстензометр УДН 12,5/10 Температура в помещении: 20 °С. Относительная влажность воздуха: 43%. Испытание проведено в соответствии с ГОСТ 1497-84. Образцы выполнены на 3D принтерах Picaso 3D Designer X и Hercules Strong при 100-процентном заполнении. При диаметрах сопел 0,3; 0,4; 0,5 мм из материалов одной партии поставки. Также рассматривалось влияние горизонтального и вертикального направления формирования образцов при изготовлении на их механические свойства. Образец, выполненный с использованием идей патента [7], изготовлен следующим образом. Габаритный каркас выполнен из ABS пластика с центральным каналом диаметром 2 мм. В канале размещена углеродная нить Акса А-49 12к, предел прочности 4900 МПа, линейная плотность 800 текс, предельная деформация 2%, модуль упругости при растяжении 250 Гпа. Внутренний канал с предварительно натянутой углеродной нитью заполнен эпоксидной смолой вакуумным методом с последующим ее затвердением.

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания показали следующие результаты:

- при изучении влияния направления формирования деталей по отношению к направлению нагрузки выявлено, что адгезионная прочность переплавленного ABS пластика ниже механической прочности на 38 %;

- влияние диаметра сопел экструдера на прочность в диапазоне значений 0,3 и 0,4 мм при продольном направлении формирования образцов и направлении нагрузки для ABS пластика незначительно. Наблюдается рост 12% прочностных характеристик при диаметре сопла 0,5 мм. Результаты испытаний в виде диаграммы растяжения образцов с горизонтальной структурой формирования и продольным способом нагружения для диаметров сопел 0,3; 0,4 и 0,5 мм представлены на рис. 1. На рис. 2 представлен характер изменения предела текучести материала в зависимости от диаметра сопла экструдера;

- предел текучести образцов из ULTRAN по сравнению с ABS при изготовлении образцов с использованием сопла 0,3 мм, в варианте адгезионной прочности в три раза выше;

- образец, выполненный по способу [7], показал десятикратное увеличение запасов прочности по сравнению с ABS пла-

стиком и трехкратный запас относительно ULTRAN, после чего произошло разрушение внешней оболочки образца, выполненной из пластика и выдергивание углеродной нити из остатков структуры в зоне крепления образцов на испытательном стенде. Углеродная нить не разрушилась. Данная аномалия может объясняться наличием раздельных поверхностей в теле оболочки образца 3D печати при переходе печати с одного диаметра на другой. При рассмотрении места разрушения под микроскопом выявлена неоднородность структуры, внутренние зоны в виде ровных плоскостей, занимающих до 50% от сечения, которые не видны снаружи образца. Внешне однородная деталь, в действительности не представляет собой единое целое с точки зрения непрерывности ее изготовления, а состоит из отдельных склеенных между собой фрагментов. Это еще раз подтверждает непредсказуемость прочностных характеристик деталей, напечатанных по аддитивным технологиям;

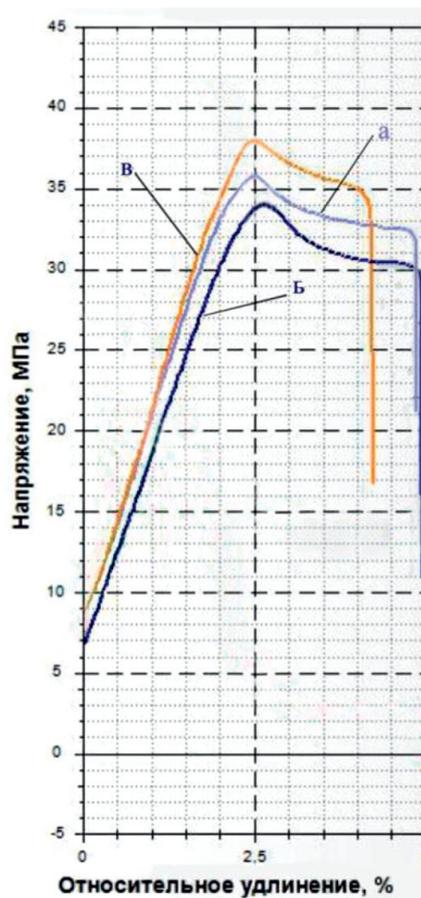


Рис. 1. Диаграммы растяжения образцов с горизонтальной структурой формирования и продольным способом нагружения для диаметров сопел 0,3; 0,4 и 0,5 мм: а = 0,3 мм, б = 0,4 мм, в = 0,5 мм

– при печати образцов, даже относительно простой формы, при 100-процентном заполнении, совершенно не понятно, является ли испытываемая структура однородной. Программы печати, установленные на 3D принтерах производителями, не учитывают особенности формирования структур из соображений прочности. Ставится под сомнение целесообразность проведения испытаний на прочность по стандартным образцам, указанным в ГОСТах. Возникает востребованность в разработке отдельных стандартов испытаний пластиковых образцов, изготовленных по аддитивным технологиям.

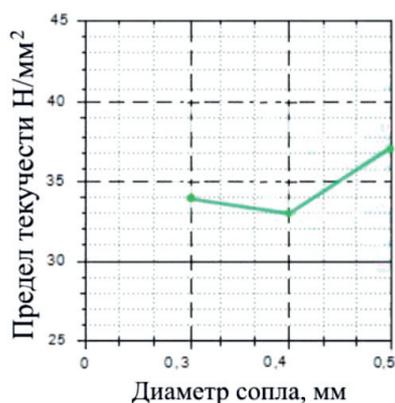


Рис. 2. Предел текучести материала в зависимости от диаметра сопла экструдера

Выводы

Пространственные сложные силовые конструкции, выполненные по технологии FDM на 3D принтерах, обладают большим разбросом прочностных характеристик, вызванным зависимостью от многих факторов. К наиболее значимым можно отнести геометрию формирования пространственной оболочки изделия, направления приложения нагрузки, скорость печатания, диаметра сопла, а также внешним воздействиям температурно-климатических факторов режимов эксплуатации рассматриваемых устройств.

Особое внимание обращаем на алгоритм печати. Практика показывает, что одинаковые детали, выполненные при одинаковом исполнении: материала, скоростью печати, диаметра сопла, способе приложения нагрузки, температуре изготовления – но на разных принтерах, имеют различные прочностные характеристики. В ряде случаев эта разница достигала 100%. Детали печатаются фрагментами, алгоритм которых заложен в программах печати без учета понятия равнопрочности.

Математические методы расчета конструкций, часто значительно отличаются от фактических экспериментальных результатов. Они не учитывают большинство важнейших факторов технологии изготовления, таких как скорость печати, температурных режимов. Особенностей структуры заполнения, концентраторов, дефектов формирования структур и многих других особенностей технологического процесса, а также моментов, связанных со старением исходного материала и готовой продукции. Все это практически исключает, на данном этапе развития 3D FDM технологии, применение данного способа для массового производства ответственных конструкций длительного использования, в том числе строительных конструкций и деталей машиностроения.

Разработанный способ формирования каркаса конструкций [7] с использованием традиционных 3D аддитивных технологий и широко применяемых материалов в качестве внешней оболочки требуемой формы и пространственного произвольного внутреннего силового каркаса, армированного углеродным волокном в виде нитей или рукавов со стабильными физико-механическими характеристиками, позволяет создать продукт с уникальными свойствами. Оболочка с заполнением 20%, выполненная по 3D FDM технологии, обеспечивает внешний вид изделия при минимальном весе. Внутренний армированный каркас выполняется в зонах наибольшей нагрузки, с использованием способа растворимых каналов и армирования, имеет произвольную форму и стабильные характеристики, поскольку углеродные нити и рукава производятся оборудованием с отлаженными технологическими процессами.

Физико-технические свойства углеродного волокна в виде нитей и рукавов практически не зависят от времени эксплуатации и климатических условий.

Создаются уникальные стабильные объемно-механические характеристики изделия, сочетающие в себе произвольную форму, легкость, прочность, долговечность.

Способ возведения каркаса конструкций с использованием технологии FDM печати на принтере с двумя экструдерами с последующим армированием и созданием внутреннего силового скелета использован на практике при создании элементов силового каркаса пространственного солнечного коллектора [8], изготовленного на заводе «АРДЕРИЯ», Республика Адыгея.

Идеи формирования армированного каркаса с использованием разработанного

способа могут найти широкое применение в различных направлениях промышленности, в том числе. строительных конструкциях при возведении зданий уникальной формы, авиации и космической технике, судостроении, автомобилестроении и в других отраслях машиностроительного профиля.

Список литературы

1. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.
2. Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Ананьин С.В., Белоплов С.В. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати // Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 61–64.
3. Штогрин Я. REC/Прочность на изгиб [Электронный ресурс]. URL: <https://rec3d.ru/wiki/16/prochnost-na-izgib/> (дата обращения: 19.03.2019).
4. Штогрин Я. REC/Прочность на сжатие [Электронный ресурс]. URL: <https://rec3d.ru/wiki/14/prochnost-na-szhatie/> (дата обращения: 19.03.2019).
5. Top D Shop/Обзор высокотемпературных FDM-пластиков для промышленной 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: <http://top3dshop.ru/blog/obzor-vysokotemperaturnyh-fdm-plastikov-dlja-promyshlennoj-3d-pechati/> (дата обращения: 19.03.2019).
6. Top D Shop/ Подробный гид по выбору пластика для 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: <http://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlja-3d-pechati/> (дата обращения: 19.03.2019).
7. Торопов А.Л. Способ возведения каркаса конструкций // Патент РФ № 2679013. Патентообладатель Торопов А.Л. 2019. Бюл. № 4.
8. Торопов А.Л. Комбинированные тепловые гелиосистемы. Ч. 1. Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных и децентрализованных систем отопления и горячего водоснабжения: учебное пособие. 2019. 88 с. DOI:10.17513/np.346.