

Ключевые особенности FDM-печати и их влияние на определение прочности изделий

© О. Д. Медведева, В. Б. Распопина

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Новой вехой в производстве после традиционных стало появление аддитивных технологий. В их основе лежит метод послойного добавления материала. Аддитивные технологии обладают многими преимуществами, например, возможностью создания сверхсложных конструкций, специальных деталей для оборудования в ремонтных целях, сокращением производственных отходов. Но также в связи с их новизной, имеют ряд проблем, касающихся их внедрения в серийное и массовое производства, таких как стандартизация процессов производства и отсутствие базы для прогнозирования результатов. Ярким представителем аддитивных технологий является FDM-печать, которая имеет широкое применение в различных отраслях и основана на принципе экструзии. Эта технология обладает многообразным спектром выбора материала, принтеров, программных обеспечений, способов печати, но их применение в некоторых случаях затруднительно, если необходимо проверить физико-механические свойства изделия, полученного в результате печати. Особенно это важно для «ответственных» деталей, требующих высокой прочности. При этом характеристики изделия зависят во многом от параметров печати, задаваемых пользователем. Как правило, он основывается на собственном опыте, не имея систематизированной теоретической и экспериментальной базы знаний. В частности, нельзя применить для расчёта прочности FDM-изделия гипотезу о сплошности материала механики твёрдого деформируемого тела. Она справедлива только для изделий, полученных с помощью традиционных технологий. Следовательно, возрастает необходимость в проведении научно-исследовательских работ, ориентированных на формирование соответствующей базы знаний.

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM-печать, традиционное производство, прототип, напряжённо-деформированное состояние, прочность

FDM printing key features and their impact on the products strength determination

© Olga D. Medvedeva, Vera B. Raspopina

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. A new milestone in production after traditional technologies was the emergence of additive technologies. They are based on the method of layer-by-layer addition of material. Additive technologies have many advantages, for example, the possibility of creating highly complex structures, special parts for equipment for repair purposes, and reducing production waste. But also due to their novelty, there are a number of problems concerning their introduction into serial and mass production, such as standardization of production processes and the lack of a basis for predicting results. A prominent representative of additive technologies is FDM printing, which is widely used in various industries and is based on the principle of extrusion. These technologies have a diverse range of choice of materials, printers, software, printing methods, but their application in some cases is difficult if it is necessary to check the physical and mechanical properties of the product obtained as a result of printing. This is especially important for critical parts that require high strength. In this case, the characteristics of the product depend largely on the print parameters specified by the user. As a rule, the user is based on his own experience, without a systematic theoretical and experimental knowledge base. In particular, it is impossible to apply the hypothesis of material continuity of solid mechanics to calculate the strength of an FDM product. It is valid only for products obtained using traditional technologies.

Keywords: additive technologies, FDM printing, traditional production, prototype, stress-strain state, strength

К изделиям таких высокотехнологичных отраслей промышленности как авиационная, автомобилестроение, медицина, приборостроение предъявляют требования широкого диапазона, в частности, к надёжности, функциональности, технологичности. В связи с усложнением современных конструкций их

соблюдение невозможно без новых технологических решений.

Традиционные технологии основаны на придании формы заготовке за счёт удаления части материала различными инструментами (субтрактивное производство) или литьём, обработкой давлением, деформирующим ре-

занием и размерной обработкой поверхностным пластическим деформированием (формативное производство). В связи с этим у традиционного производства есть ряд недостатков [1]: высокая степень производственных отходов, большие затраты на создание технологической оснастки, вероятность невысокой точности изделий, затруднения в производстве оптимизированных сверхсложных конструкций, необходимость большого числа высококвалифицированных специалистов [2] и другие.

В конце 80-х гг. прошлого века стали появляться новые технологии, способные решить многие из перечисленных проблем в традиционном производстве. К числу таких относятся аддитивные технологии. Слово «add» с английского языка переводится как «добавлять». В основе этих технологий лежит метод послойного добавления материала. В связи с этим аддитивные технологии часто называют «3d-печатью» [3]. Если в традиционной технологии в качестве исходных данных может использоваться как чертёж, так и цифровая модель, то в аддитивной – только цифровая модель. Её можно получить моделированием с помощью соответствующего программного обеспечения САПР (систем автоматизированного проектирования) или 3d-сканированием объекта.

Суть любой автоматизации производства заключается в кооперации человеческого труда и ЭВМ-труда. Таким образом, за счёт использования фундаментальных методов анализа и математических моделей сокращается время на проектирование, повышается точность расчётов, находятся многие оптимальные компоновочные решения при сборке изделия из нескольких деталей. Однако эти возможности относятся, в основном, к традиционным технологиям. Они имеют большую нормативную базу: различные государственные, отраслевые, международные стандарты. Множество результатов исследований и экспериментов в этой сфере было проанализировано и адаптировано для цифрового формата с помощью соответствующих программных продуктов. По большей мере это отсутствует у аддитивных технологий.

В настоящее время аддитивные технологии имеют два назначения: быстрое прототи-

пирование и быстрое производство. В первом назначении, применяя эти технологии, создают прототип за короткий срок. Во втором – с помощью данных технологий изготавливают конечное изделие [4].

Для решения проблемы низкой эффективности аддитивного производства, снижения стоимости выпуска серийных или массовых изделий с гарантированным функционалом нужны различные стандарты для используемых материалов, оборудования (принтеров), инструментов, поддержек (технологической оснастки), технологий, испытаний опытных образцов, контроля. Наряду с этим требуется программное обеспечение, позволяющее получать модели технологических процессов печати изделия, выполнять оценку его прочностных характеристик.

Аддитивные технологии имеют большое многообразие в зависимости от применяемых методов, материалов и оборудования. Общепринятой системы классификации аддитивных технологий на данный момент не принято, но наиболее распространёнными критериями являются следующие:

- применяемые материалы (фотополимерные смолы, пластмасса, металл, композиты, фотополимеры, нейлон, бетон, дерево, глина, лекарственные материалы, пищевое сырьё,);
- вид печати (лазерная, струйная);
- метод подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью света (видимого или УФ), за счёт тепла или связующего);
- метод формирования слоя (Bed Deposition и Direct Deposition);
- метод получения изделия.

Классификация аддитивных технологий по последнему признаку принята международной организацией American Society for Testing and Materials (в стандарте ASTM F2792.1549323-1). Она включает в себя следующие методы получения изделия:

- 1). Material Extrusion – «выдавливание материала» (послойное нанесение расплавленного материала через экструдер);
- 2). Material Jetting – «разбрызгивание материала» (послойное струйное нанесение строительного материала);
- 3). Binder Jetting – «разбрызгивание связующего» (послойное струйное нанесение

связующего материала);

4). Sheet Lamination – «соединение листовых материалов» (последовательное формирование изделия из листовых строительных материалов);

5). Vat Photopolymerization – «фотополимеризация в ванне» (последовательное отверждение фотополимерных смол);

6). Powder Bed Fusion – «расплавление материала в заранее сформированном слое» (последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала);

7). Directed energy deposition – «прямой подвод энергии непосредственно в место построения» (последовательное формирование изделия методом внесения строительного материала непосредственно в место подвода энергии) [5].

Для любого производства на этапе технологического процесса требуется делать выбор в пользу какой-либо технологии, которая будет соответствовать требованиям производства. В настоящее время одним из наиболее востребованных производителями является метод «Material Extrusion», а именно, технология FDM-печати (Fused deposition modeling) или по-другому – моделирование методом послойного наплавления. Данный факт – результат исследования, проведенного французской компанией Sculpteo [6] среди 1000 респондентов-профессионалов из нескольких отраслей промышленности, которые внедряют инновации и производят продукцию благодаря аддитивным технологиям.

Такой выбор в пользу FDM-печати обусловлен следующими преимуществами: высокая скорость изготовления модели; возможность применения широкого спектра материалов, различных полимеров; низкая стоимость создания прототипа или самого изделия.

Для технологии FDM применяют материал в виде филамента: пластиковой нити, намотанной на бобину. Филамент, проходя через экструдер, нагревается и расплавляется, а затем непрерывно размещается на столе через насадку сопла в форме нити, накладываемой на предыдущий слой по заданной программой траектории. В качестве расход-

ных могут использоваться следующие термopластичные материалы: ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол); PLA (полимолочная кислота); нейлон; PET-G (полиэтилентерефталат, G-модификация с гликолем); TPU (термопластичный полиуретан); PEEK (полиэфирэфиркетон); композитные термопластики и т. д.

Одним из препятствий к использованию данной технологии, например, в промышленных, ремонтных целях для создания не просто прототипов, а готовых изделий, является вопрос оценки прочности детали.

Во многом на прочность изделия, напечатанного с помощью FDM-технологии, влияет режим реализации FDM-технологии. В настоящий момент отсутствует единая нормативная база, регламентирующая технологический процесс FDM-печати. Ответственность за полученный результат полностью возлагается на пользователя, так как он сам задаёт настройки принтера. От этого зависит, во-первых, соответствие изделия 3D-модели; во-вторых, структура печати, заполняющая объём изделия, которая влияет на его на физико-механические свойства.

Для определения прочности изделия следует различать его внутреннее заполнение и внешнюю оболочку, которые обусловлены FDM-печатью (рис. 1). Нитевидная структура печати изделия определяется настройками толщины слоя, траекторией «укладывания» нити и количеством внешних линий (толщина элементов оболочки); процентом заполнения. Процент заполнения лежит в диапазоне от 0 % (тогда изделие пустотелое и имеет только оболочку) до 100 % («сплошное» заполнение). При этом сама оболочка (включает в себя стенки, верхний и нижний слои) печатается только со 100 % заполнением.

Такой характер заполнения объёма детали материалом не позволяет применить для расчёта её прочности традиционные методы оценки прочности [7–8]. Все они опираются на гипотезу о сплошности материала во всех точках объёма детали.

В данном случае можно заметить, что при FDM-печати нити, наложенные друг на друга, имеют чёткую границу и не соединяются в одну (рис. 1), а значит между ними нет молекулярных связей. Внутри самой нити между

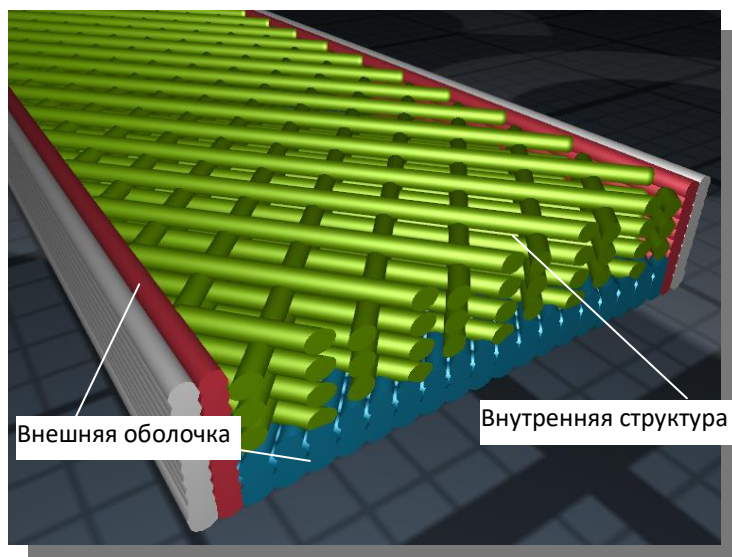


Рис. 1. 3D-модель FDM-структуры

молекулами такие связи есть. Соответственно, прочность изделия из нескольких наложенных друг на друга нитей нужно рассматривать другими более сложными методами в отличие от прочности одной нити.

Если речь идёт об изделиях, в которых использовался шаблон с неполным заполнением, наложение происходит и в узлах [9–10] – небольших областях контакта нитей. Напряжения в узлах отличаются от напряжений в самой нити между узлами (рис. 2).

В нитях возникают температурные напряжения вследствие неравномерности распределения температур [11]: расплавленная нагретая нить накладывается на уже остывшую. Для FDM-печати одним из важных фак-

торов является температурный режим. В зависимости от принтера температуру можно контролировать с помощью нагревательной камеры (в закрытом принтере), ограничивающей платформу или с помощью вентилятора охлаждения (в открытом принтере), ещё чаще используются принтеры, имеющие подогрев платформы. Важно поддерживать температуру одинаковой во всех слоях изделия, иначе его форма и габариты не будут соответствовать назначенным 3D-моделью. Такое изделие деформируется в процессе печати. Температурный фактор необходимо учитывать при анализе прочности. А это значит – прочность данного изделия рассчитать сложнее.

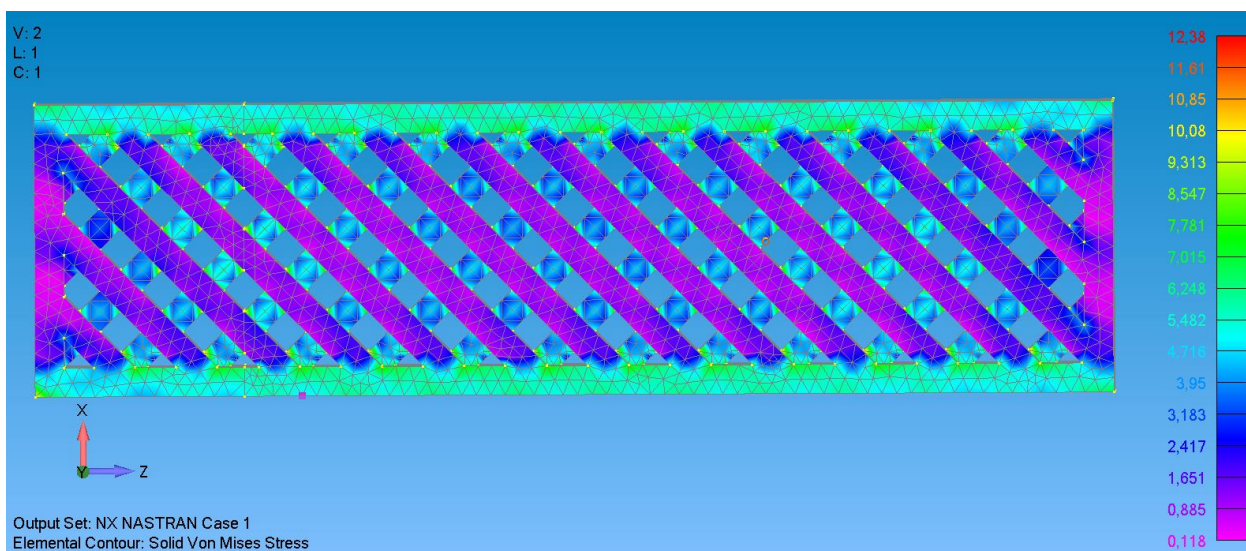


Рис. 2. Карта эквивалентных напряжений в продольном сечении растянутого образца

Таким образом физико-механические свойства изделия, напечатанного с помощью FDM-технологии, зависят в первую очередь от параметров, которые были заданы пользователем: толщина слоя и толщина элементов оболочки; процент заполнения; скорость печати; высота слоя. Следовательно, расчёт на прочность такого изделия непростой. Основной трудностью является невозможность применить гипотезу о сплошности материала механики твёрдого деформированного тела ко всему объёму детали. Эта гипотеза работает только в пределах объёма нити, заполняющей объём в границах заданной геометрии, так как нить представляется однородной и сплошной.

Именно эта гипотеза легла в основу ГОСТов по испытанию на прочность для изделий,

полученных с помощью субтрактивной или формообразующей технологии.

Отсутствие единой теории оценки прочностных характеристик FDM-изделий является сдерживающим фактором для реализации потенциала FDM-технологии в полной мере. Для поиска решения этой проблемы важно изучить напряженно-деформированное состояние изделия, полученного с помощью FDM-печати, в объёме его нитей и узлов при различных вариациях «укладывания» нитей, параметрах принтера и других условий, влияющих на физико-механические свойства. В связи с высокой сложностью задачи возрастает необходимость в проведении научно-исследовательских работ, включающих как натурные эксперименты, так и численные.

Список источников

1. Каблов Е. Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. №1. С. 2–6.
2. Каблов Е. Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сборник научно-информационных материалов. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. ГОСТ Р 57558-2017 (ISO/ASTM 52900:2015) Российской Федерации. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. Национальный стандарт. М.: Стандартинформ, 2018. 16 с.
4. Смирнов В. В., Шайхутдинова Е. Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. 2013. № 2–2. С. 90–94.
5. ГОСТ Р 57589-2017 (ISO/ASTM 52900:2015) Российской Федерации. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. Национальный стандарт. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
6. Moreau C. *Sculpteo: the state of 3D PRINTING. The data you need to understand the 3D Printing world and build your 3D Printing strategy* [Электронный ресурс]. URL: https://www.sculpteo.com/media/ebook/State_of_3DP_2018.pdf (05.02.2022).
7. Фролов Д. А., Гаврилова А. О., Распопина В. Б. Численный эксперимент: анализ напряжённого состояния в характерных точках FDM-структуры // *Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: сборник материалов 110-й Международной научно-технической конференции (2–4 июня 2021г.)*. Министерство науки и высшего образования РФ, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Ассоциация автомобильных инженеров [и др.]. Иркутск: Изд-ство ИРНТУ, 2021. С. 160–167.
8. Шеметов Л. И., Распопина В. Б. Натурный эксперимент: сравнительный анализ прочностных характеристик FDM-образцов с разным процентом заполнения // *Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: сборник материалов 110-й Международной научно-технической конференции (2-4 июня 2021г.)*. Министерство науки и высшего образования РФ, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Ассоциация автомобильных инженеров [и др.]. Иркутск: Изд-ство ИРНТУ, 2021. С. 167–174.
9. Кочетов Д. В. Почему аддитивные технологии не востребованы в промышленности // *PROкачество*. [Электронный ресурс]. URL: <https://kachestvo.pro/innovatsii/plastmassovyy-mir-pobedil/> (05.02.2022).
10. Кондрашов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А., Сорокин А. Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 10 (82). Ст. 04. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.viam-works.ru> (09.02.2022).
11. Межецкий Г. Д., Загребин Г. Г., Решетник Н. Н. *Сопротивление материалов*. Москва, 2016. 432 с.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ольга Дмитриевна Медведева,
студентка группы СМ-19-1,
Институт авиационного строительства и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
olgamedvedevav8.9@gmail.com

Olga D. Medvedeva,
Student,
Institute of Aircraft Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation,
olgamedvedevav8.9@gmail.com

Вера Борисовна Распопина,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации
авиационной техники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
vbr2604@mail.ru

Vera B. Raspopina,
Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of Aircraft Engineering
and Operation of Aviation Equipment Department,
Irkutsk National Research Technical University
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
vbr2604@mail.ru