

УДК 539.382.2, 67.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ЧЕРНОГО ABS-ПЛАСТИКА МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕНИЯ НА ТРЕХМЕРНОМ ПРИНТЕРЕ¹

В.В. Терауд, М.М. Вергазов

Описаны технология изготовления и экспериментальные исследования образцов на растяжение из черного ABS-пластика, изготовленных методом наплавления на трехмерном принтере. Рассмотрен процесс создания управляющей программы для получения образца на 3D-принтере. Образцы размерами 120x10x3 мм³ растягивались на испытательной машине Zwick Z100 до разрушения. Показан различный характер разрушения образцов в зависимости от температуры изготовления и направления заливки. Проведен микроскопический анализ поверхности разрыва образцов. Обнаружены микропоры регулярного и нерегулярного характера, влияющие на разрушение материала.

Ключевые слова: разрушение, прочность, эксперимент, пластик, ABS-пластик, 3D-печать.

Введение

Технологии трехмерной печати постепенно входят в современную жизнь. Если в прошлые годы 3D-принтеры были дорогими, то теперь их стоимость снизилась, и на рынке присутствуют модели, доступные даже обычному пользователю. В настоящее время с помощью таких технологий создаются корпуса машин и механизмов, оружие, фрагменты скелета и черепа, кости, хрящевые ткани. Активно используется прозрачный пластик при производстве прототипов, для исследования работы различных механизмов.

В основе трехмерной печати лежит принцип послойного создания объекта. Известны две технологии формирования слоев: лазерная и струйная, которые, в свою очередь, делятся на следующие виды: лазерная печать, лазерное спекание, ламинирование и застывание материала при охлаждении, полимеризация под

действием ультрафиолета, спекание порошкообразного материала и печать стволовыми клетками (биопринтеры).

В настоящей работе рассмотрена струйная технология получения образцов [1], используется метод наплавления [2] – один из способов застывания материала при охлаждении. Нити из плавкого рабочего материала, формирующие объект, укладываются послойно, обычно с поворотом на 90° (рис. 1). Пластик в жидком состоянии подается в экструзионную головку диаметром 0,4 мм, которая выдавливает тонкую нить на охлажденную платформу слой за слоем. Особенностью струйной печати является эллиптическая форма сечения нитей.

В качестве рабочего материала используется ABS- или PLA-пластик. Эти материалы обладают сходными техническими характеристиками. Однако плотность PLA-пластика выше, чем ABS-пластика, к тому же он более вязок

¹ Работа проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №12-08-31166.

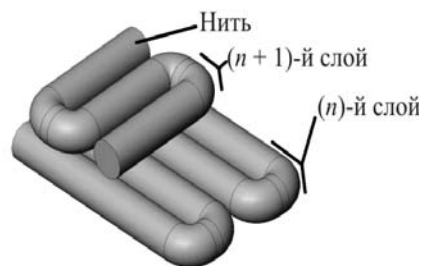


Рис. 1. Принцип создания модели методом наплавления

и имеет другой температурный диапазон. Существенным моментом при выборе пластика служат его характеристики по взаимодействию с агрессивной средой. Так, ABS-пластик растворим в ацетоне, а PLA-пластик – в феноле и концентрированной серной кислоте.

При трехмерной печати объектов возникает ряд сложностей: 1) при их остывании появляются остаточные напряжения, что ведет к нарушению формы и прочности; 2) в процессе печати ABS-пластиком происходит отслаивание материала от рабочего стола, что приводит к потере точности печати; 3) висячие части объекта требуют поддержки; 4) существует около 100 настраиваемых параметров: толщина слоя, температура печати, скорость печати, скорость экструзии, форма сечения нити, процент заполнения и др., в значительной степени влияющих на форму и прочность объекта; 5) внутри объектов появляются поры. Все эти сложности ведут к снижению прочности объектов.

В данной работе рассматривается влияние только температуры изготовления образцов на их механические и прочностные характеристики. Был проведен ряд испытаний на разрыв образцов для определения прочностных и упругих характеристик в зависимости от условий печати и температуры экструзии.

Целью работы явилось определение зависимостей массы и геометрических параметров образцов, а также физико-механических характеристик материала от расположения нитей и температуры изготовления.

Постановка исследований

В исследованиях используются два типа образцов – с продольным и с поперечным расположением нитей. На рисунке 2 схематично представлены типы образцов и расположение нитей в них, полученных при продольной (а) и поперечной (б) заливке. Существенным раз-

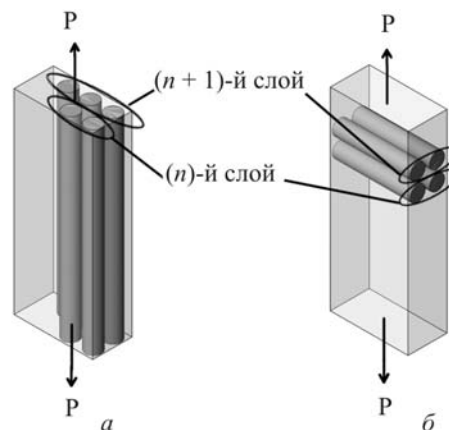


Рис. 2. Расположение нитей в образце при продольной (а) и поперечной (б) заливке относительно растягивающей силы Р

личием этих типов является то, что при испытаниях на разрывной машине у образцов с продольной заливкой все нити расположены параллельно прикладываемой нагрузке. Для образцов с поперечной заливкой нагрузка прикладывается перпендикулярно слоям, т. е. действует в направлении их разрыва. Нити укладываются друг на друга во всех слоях без поворота на 90°, как показано на рис. 1.

Для печати образцов создается компьютерный прототип. Все образцы в компьютерной модели имеют размеры 120х9х3 мм³. В каждой серии продольной и поперечной печати их получают в интервале температур от 200 до 240 °С с шагом 2...5 °С. Линейные размеры и массу распечатанных образцов измеряют до испытаний, которые проводят на разрывной машине. После испытаний и разрушения образцы повторно измеряют, а также исследуют поверхность разрыва.

Создание управляющей программы

Для получения образца была создана управляющая программа, по которой печатающий станок изготавливал образец для испытания. Процесс моделирования начинался с разработки трехмерной модели в CAD-программе.

Модель образца имеет очень простую геометрию и может быть создана в любом редакторе, позволяющем экспортировать STL-формат. Из бесплатных программ хорошо зарекомендовала себя программа трехмерного твердотельного моделирования OpenSCAD [3]. Кроме того, существует программа сложного трехмерного твердотельного моделирования SolidWorks [4], с помощью которой помимо разработки модели

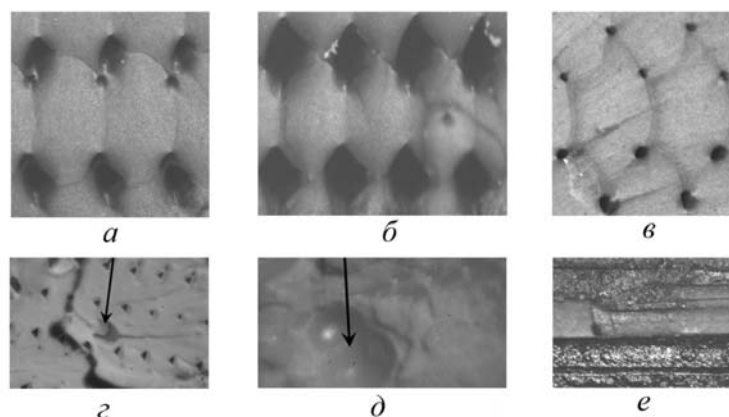


Рис. 3. Микроструктура поверхности разрыва при продольной (а, б, в, г) и поперечной (д, е) заливке:
стрелками на фото г, д показаны пузырьки воздуха

можно определять прочность материала, а также проектировать сложные произвольные сборки. Программа обладает реалистичным рендерингом и многими другими возможностями, применять которые имеет смысл только на сложных объектах.

Вследствие того что процесс печатания образца на принтере происходит из нитей, использование стандартных галтелевидных форм образцов для испытаний малооправдано. Поэтому были выбраны образцы в виде параллелепипеда длиной 120 мм, шириной 10 мм и толщиной 3 мм, рабочая часть составляла 60 мм. Данный параллелепипед создавался и экспортировался в STL-формат, который является практически единственным стандартом в случае описания геометрии для трехмерных печатающих принтеров.

Созданный трехмерный объект в STL-формате преобразовывался в команды станка в форме G-кодов (в управляющую программу). Данное преобразование для печатающих принтеров производится при помощи программы, называемой слайсером (slicer).

В настоящее время имеется несколько бесплатных и множество платных программных слайсеров. Практически каждый производитель принтеров стремится выпустить собственный слайсер, наиболее полно использующий потенциал данного станка, но, к сожалению, часто не обладающий достаточными возможностями настроек слайсинга (процесса преобразования). Из бесплатных программ можно выделить: Slic3r [5], Skeiforge [6] и Kisslicer [7]. Эти свободно распространяемые продукты имеют широкие возможности. Следует уточнить, что Kisslicer существует в двух версиях – бесплат-

ной и платной, а Skeiforge содержит исходные коды в свободном доступе. Для редактирования созданной STL-геометрии использовалась программа Netfabb Professional [8], которая является мощным программным продуктом редактирования триангуляционной геометрии. Однако ее применение целесообразно только для сложных объектов.

Ввиду свободного распространения и кроссплатформенности был выбран слайсер Skeiforge 50. Данная программа обладает очень большим количеством настраиваемых параметров. Расчет созданной модели производился с параметрами, подобранными так, чтобы каждая нить располагалась с небольшим прижимом к соседней нити. Такое расположение позволяет уменьшить появляющиеся пустоты при равномерной укладке эллипсовидных нитей друг к другу. Более подробно это показано на рис. 3.

Основные параметры печати следующие: толщина слоя – 0,25 мм; ширина слоя – 0,41 мм; плотность укладки – 1,54 от толщины слоя, заполнение – 100 %, тип заполнения – линейный (нить к нити).

Проведение испытаний²

Изготовленные образцы испытывались на разрывной машине Zwick Z100 в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Образец устанавливался и зажимался в клиновидных захватах разрывной машины (рис. 4). Базовая длина

² Авторы выражают благодарность Ю.П. Зезину и А.М. Локщенко за полезные советы и помощь в проведении экспериментов, а также сотрудникам лаборатории магнетической петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова за использование микроскопов, приобретенных за счет средств программы развития университета.



Рис. 4. Разрывная машина с образцом, установленным в клиновидных захватах

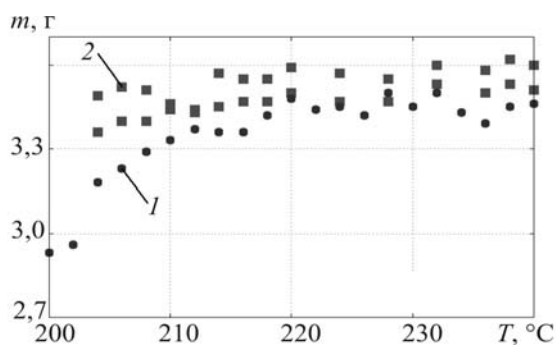


Рис. 5. Зависимости массы m образца от температуры печати T

рабочей части образца составляла 60 мм, по 30 мм оставалось с каждой стороны в захватах машины.

С внешней стороны подключался контактный дифференциальный датчик деформаций с базовым расстоянием рабочей части 30 мм. Датчик был настроен так, что при достижении деформации 2,5 % он отключался во избежание поломки, и дальнейшее измерение производилось по смещениям захватов машины. Такой порядок измерений, с одной стороны, давал приемлемую точность кривой во всем диапазоне деформаций, а с другой – позволял экспериментально получить начальный упругий участок кривой без опасности повреждения датчика.

Производился запуск испытательной программы, по которой захваты машины растягивали образец до разрушения со скоростью 2 мм/мин.

Обсуждение полученных результатов

После распечатывания все образцы взвешивались и измерялись до испытаний на силовой машине. Масса каждого образца определялась на миллиграммовых весах с точностью 0,01 г.

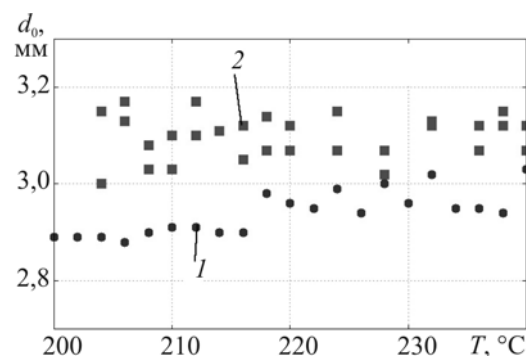


Рис. 6. Зависимости толщины d_0 образца от температуры печати T

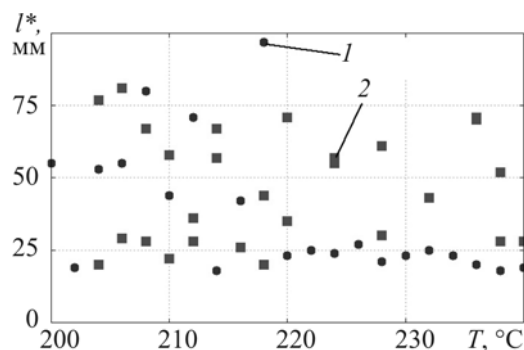


Рис. 7. Зависимости длины l^* от верхнего конца образца до места разрыва от температуры печати T

Затем измерялась их толщина. На рисунках представлены зависимости массы m образца до испытаний (рис. 5), толщины d_0 образца до испытаний (рис. 6) и длины l^* от верхнего конца образца до места разрыва (рис. 7) от температуры пластика при изготовлении образца. На каждом рисунке показаны две группы результатов измерений: 1 – образцов с продольной заливкой; 2 – образцов с поперечной заливкой.

На рисунке 5 наблюдается интенсивное увеличение массы до температуры 218 °С. Далее масса незначительно изменяется вблизи значения 3,4 г для продольной заливки (1) и 3,5 г – для поперечной (2). Необходимо обратить внимание, что способ заливки существенно влияет на массу образца. Так, диапазон масс при поперечном способе составляет 3,35...3,61 г, а при продольном – 2,9...3,5 г. Следовательно, объем пустот в образцах с поперечной заливкой (2) существенно меньше, чем с продольной (1). Исходя из представленных данных (см. рис. 5) можно сделать вывод о возможности существенного регулирования массы образца, а значит, прочности материала путем изменения температуры выплавки.

На рисунке 6 показаны результаты измере-

ний толщины образцов до испытаний. Видно, что для образцов с продольной заливкой (1) до температуры 218 °С толщина остается постоянной, далее наблюдаются колебания значений, причем заметна тенденция к увеличению толщины. Зависимость толщины образцов с поперечной заливкой (2) от температуры не установлена. Однако следует обратить внимание на диапазон толщин 3...3,2 мм, в который полностью попадают все значения толщин образцов с поперечной заливкой. Это показывает, что температура печати таких образцов не оказывает столь же сильного влияния, как в случае печати образцов, полученных при продольной заливке.

Зависимость нахождения места разрыва от температуры (см. рис. 7) для образцов с поперечной заливкой (2) не установлена. Но испытания образцов с продольной заливкой (1) показали, что для такого типа образцов, выплавленных при температуре более 220 °С, критическим является место контакта с зажимающими захватами разрывной машины, приходящееся обычно на 24–25-й мм от верхнего конца образца. Данный переход образует концентратор напряжений, вследствие чего разрушение происходит именно в этом месте. Образцы, полученные при температуре меньше 220 °С, не разрушаются около захватов. Это объясняется, скорее всего, тем, что имеется большое число пор и пустот, которые образуют дополнительные концентраторы напряжений, приводящие к снижению напряжений в основном концентраторе от зажимающих захватов машины, что установлено по массе образца и исследованию на микроскопе.

Следует отметить, что длина образцов измерялась как до испытаний, так и после. По окончании изготовления длина образцов, полученных как при поперечной, так и при продольной заливке, вне зависимости от температуры печати составляла 119...120 мм. В процессе эксперимента образцы удлинялись. Однако со временем происходило восстановление их длины до начальной.

Поверхности разрыва образцов были изучены под микроскопом и сфотографированы. На рис. 3 представлены микрофотографии поверхностей разрыва образцов, полученных при продольной (рис. 3, а, б, в, г) и поперечной (рис. 3, д, е) заливке. Во всех образцах, как с продольной, так и с поперечной заливкой, име-

ются пустоты. При испытании на разрыв эти пустоты служат источниками возникновения и роста трещин, приводящих к развитию магистральной трещины и разрушению образца. На рисунке 3, а, б, в, г видно, что поры идут ровными рядами вдоль нитей, размеры их в ряду приблизительно одинаковые.

Следует обратить внимание, что внутри самих нитей на поверхностях разрыва образцов, полученных при продольной заливке, отсутствуют какие-либо повреждения. Это дает возможность полагать, что основным фактором разрушения является увеличение пустот между нитями, что можно наблюдать, сравнив рис. 3, а и рис. 3, б. Следовательно, одной из мер по упрочнению материала образца должно быть увеличение его сплошности.

Для образцов с продольной заливкой геометрическая форма сечения нитей должна представлять собой круг или эллипс. Но в реальности поверхность разрыва может выглядеть как сплюснутые круги (см. рис. 3, а) или иметь более сложные формы, напоминающие шестиугольники (см. рис. 3, в).

При изучении образцов с поперечной заливкой наблюдается большое количество включений в виде пузырьков воздуха, хотя в образцах с продольной заливкой они также встречаются. На микрофотографиях отчетливо просматриваются продольные пустоты (см. рис. 3, г, д). Эти пустоты всегда идут параллельно нитям заливки и служат в дальнейшем идеальными источниками локализации разрушений.

По результатам испытаний на разрывной машине был определен средний модуль продольной упругости по ГОСТ 9550-81. На рисунке 8 показаны зависимости между напряжением σ и деформацией ϵ образцов, полученных при продольной и поперечной заливках. Хорошо видно, что для каждого типа заливки весь пучок кривых расходится несильно. Это говорит о том, что на итоговые упругие свойства напечатанного материала рассмотренный диапазон температур экструзии влияет мало, при этом предельная деформация существенно зависит от температуры.

В таблице 1 приведены значения среднего модуля продольной упругости E для образцов, полученных продольной и поперечной заливкой, и диапазон его изменений. При этом максимальное значение предела пропорциональности для образцов, полученных продольной залив-

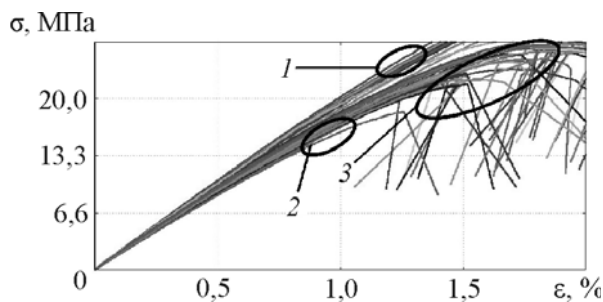


Рис. 8. Начальная кривая деформирования для образцов, полученных продольной (1) и поперечной (2) заливкой:

3 – зона разрушения образцов, полученных при поперечном заполнении

кой, соответствующее температуре экструзии 212 °С, составило $\sigma_{\text{пл max}} = 37$ МПа; минимальное значение предела пропорциональности – $\sigma_{\text{пл min}} = 31,5$ МПа наблюдалось при температуре 200 °С.

Итак, проведенный по результатам экспериментов сравнительный анализ показал, что образцы, полученные поперечной заливкой, прочнее, чем образцы с продольной заливкой. Кроме того, в них образуется меньшее количество пор и пустот. Исследования показали, что при изготовлении образцов оптимальной является температура печати, превышающая 220 °С, так как в этом случае наблюдается стабилизация их массы и геометрических параметров.

Заключение

Описаны эксперименты на растяжение различных образцов, изготовленных из черного ABS-пластика методом наплавления на трехмерном принтере. Они проводились с целью определения зависимостей механических характеристик материала от температуры изготовления. При исследованиях эти зависимости были установлены и выявлен диапазон соответствующих температур печати. В ходе экспериментов также обнаружены поры регулярно и нерегулярного характера.

В дальнейшем вызывает интерес изучение влияния принудительного охлаждения выдав-

Таблица 1

Средний модуль продольной упругости E и диапазон его изменения для образцов с продольной и поперечной заливкой

Образцы	Среднее значение E , МПа	Диапазон изменения E , МПа
продольные	2057	1850...2160
поперечные	1800	1700...1920

ливаемой расплавленной нити и воздействие такого изменения в технологическом процессе на упругие свойства материала. Принудительное охлаждение представляется актуальным для повышения точности печати и будет исследовано позднее.

Список литературы

1. Терауд В.В., Вергазов М.М. Механические характеристики пластика, получаемого методом трехмерной печати // Международная молодежная научная конференция «XXXIX Гагаринские чтения», секция № 3. М.: 2013, С.79–80.
2. 3D-принтер // Википедия: свободная электронная энциклопедия. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/3D-принтер/>
3. OpenSCAD - The Programmers Solid 3D CAD Modeller <http://www.openscad.org/> // Официальный сайт Openscad. Режим доступа: www.openscad.org/
4. Материалы официального сайта Solidworks Russia. Режим доступа: <http://www.solidworks.ru>
5. Материалы официального сайта Slic3r. Режим доступа: <http://slic3r.org/>
6. Demozendium : encyclopedia. Режим доступа: <http://fabmetheus.crsndoo.com/wiki/index.php/Skeinforge/>
7. Материалы официального сайта KISSlicer. Режим доступа: <http://kisslicer.com/>
8. Материалы официального сайта Netfabb. Режим доступа: <http://www.netfabb.com/professional.php/>

Материал поступил в редакцию 13.04.13.

ТЕРАУД

Валентин Викторович

E-mail: ldrnww@gmail.com

Тел.: (495) 939-45-61

Кандидат технических наук, научный сотрудник НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов – технологические процессы, осуществляемые в условиях высокотемпературной ползучести. Автор 35 научных работ.

ВЕРГАЗОВ

Марат Марсович

E-mail:

marat.vergazov@gmail.com

Тел.: (495) 939-24-28

Аспирант кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов – численное моделирование процессов разрушения в задачах механики.