

Устройство для исследования на прочность изделий, изготовленных по аддитивным технологиям

А.С. Ковчур^а, Е.И. Марушко, А.О. Щербатый, Т.В. Михнов
Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь
E-mail: ^аaskovch@tut.by

Аннотация. В данной статье рассмотрена проблематика исследования изделий, полученных методами аддитивного синтеза. Описан процесс проектирования и топологической оптимизации конструкции лабораторной установки для проведения испытаний на разрыв образцов, полученных методом аддитивного синтеза (FDM технология) с помощью современного комплексного облачного CAD/CAE/CAM инструмента Autodesk Fusion 360. Представлены технологическое оборудование, материалы для производства набора заготовок для проведения испытаний на растяжение, а также материалы для изготовления лабораторного стенда. Проанализированы и выбраны технологические параметры изготовленных заготовок. Представлена методика проведения экспериментов испытаний на разрыв с использованием уже изготовленного лабораторного стенда. Приведены и проанализированы результаты испытаний образцов. По результатам экспериментальных исследований сделаны выводы и даны рекомендации по проведению дальнейших исследований в данном направлении.

Ключевые слова: испытания на растяжение, аддитивные технологии, лабораторный стенд, прочность, материалы аддитивного синтеза.

Device for Studying the Strength of Products Manufactured by Additive Technologies

A. Kauchur^а, Y. Marushka, A. Shcherbatyi, T. Mihnov
Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus
E-mail: ^аaskovch@tut.by

Annotation. This article discusses the problems of conducting research on products obtained by additive synthesis methods. The process of designing and topological optimization of the design of a laboratory setup for tensile testing of samples obtained by additive synthesis (FDM technology) using the modern integrated cloud-based CAD/CAE/CAM tool Autodesk Fusion 360 is described. Technological equipment, materials for the production of a set of blanks for tensile testing, as well as materials for the manufacture of a laboratory stand are presented. The technological parameters of the manufactured blanks are analyzed and selected. A technique for conducting tensile test experiments using the created laboratory bench is presented. The results of testing samples are presented and analyzed. Based on the results of experimental studies, conclusions are drawn and recommendations for further research are proposed.

Keywords: tensile testing, additive technologies, laboratory bench, strength, additive synthesis materials.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития производства постепенно отпадает необходимость в большом количестве деталей одного типа. Сокращаются объемы партий, увеличивается их разнообразие, меняется геометрия, размеры, материалы. Традиционные методы производства не выдерживают столь высоких темпов смены номенклатуры изделий. Решить возникшие проблемы можно использованием технологий аддитивного производства.

В условиях рыночной экономики с большим количеством малых предприятий с разнообразным парком

оборудования часто возникает проблема мелкосрочного ремонта деталей с изготовлением деталей по аддитивным технологиям. Поэтому проведение на недорогом оборудовании испытаний механических свойств материалов из изделий, полученных по аддитивным технологиям является актуальной задачей. При этом применяются программные средства ЭВМ для моделирования основных технологических процессов аддитивных технологий, осуществляется их оптимизация по результатам моделирования.

Несмотря, на большие имитационно-моделирующие возможности современных цифровых методик

обучения при изучении дисциплин материаловедческого характера, направление личностного визуально-тактильного участия обучающихся при выполнении лабораторных и практических работ играет значительную роль в корректном восприятии учебного материала, особенно в таких фундаментальных дисциплинах, как «Материалы аддитивного синтеза» и «Механика материалов аддитивного синтеза». Это реальное осуществление практикоориентированных методик в системе образования, с учетом современного подхода в изучении материалов, применяемых в аддитивных технологиях, их компонентов, технологии получения, структуре и свойствах, в рамках принятой в материаловедении и смежных дисциплинах последовательности: состав – структура – свойства – области применения.

На данный момент широко используются различные технологии аддитивного производства.

Пожалуй, одной из наиболее доступных аддитивных технологий является технология FDM – Fused Deposition Modeling (моделирование методом послойного наплавления). Следует отметить, что термин Fused Deposition Modeling (FDM) и собственно технология являются запатентованными компанией Stratasys. В настоящее время для обхода юридических ограничений разработан аналогичный термин Fused Filament Fabrication (FFF) (производство наплавлением нитей). Соответственно, термины FDM и FFF равнозначны по смыслу и назначению.

Технология моделирования послойным наплавлением (FDM) относится к группе аддитивных технологий на базе экструзионных систем. Сущность изготовления изделий технологией FDM (Fused Deposition Modeling, моделирование методом послойного наплавления) [1] заключается в том, что подающийся материал в виде полимерной нити расплавляется в разогретом сопле-экструдере, движениями которого непосредственно управляет программное обеспечение автома-

тической системы управления устройством. Изделие формируется последовательным нанесением слоев материала, соответствующих форме сечений будущего изделия (рис. 1 а). Поскольку материал нагревается до температуры лишь на 1°C превышающей температуру плавления, он становится твердым практически сразу после экструзии, соединяясь с предыдущими слоями (рис. 1 б).

Для изготовления изделий сложной формы для нависающих частей изделий с углом наклона больше критического создаются специальные поддерживающие структуры (поддержки). При этом в зависимости от конструкции установок поддержки могут формироваться из основного материала изделия (системы с одним экструдером) или из другого материала, как правило, легче отделяемого от изделия (системы с двумя экструдерами или системы со смешивающим экструдером).

В качестве материала при изготовлении объектов методом послойного наплавления чаще всего используются акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и его разновидности, полифенилсульфон (PPSF), полилактид (PLA), нейлон, полиэтилен, различные flex-материалы и композиты.

Основными преимуществами FDM является большой выбор материалов и хорошие физико-механические свойства конечных изделий, изготовленных с использованием этой технологии. Применимость этого процесса ограничивается более низкими механическими свойствами и худшим качеством поверхности конечного продукта по сравнению с деталями, изготовленными традиционными способами. [1].

Существенным отличием изделий, изготовленных технологией послойного наплавления, является то, что они имеют явно выраженную слоистую структуру, в большинстве случаев для ускорения процесса изготовления и экономии материала, имеют внутренние

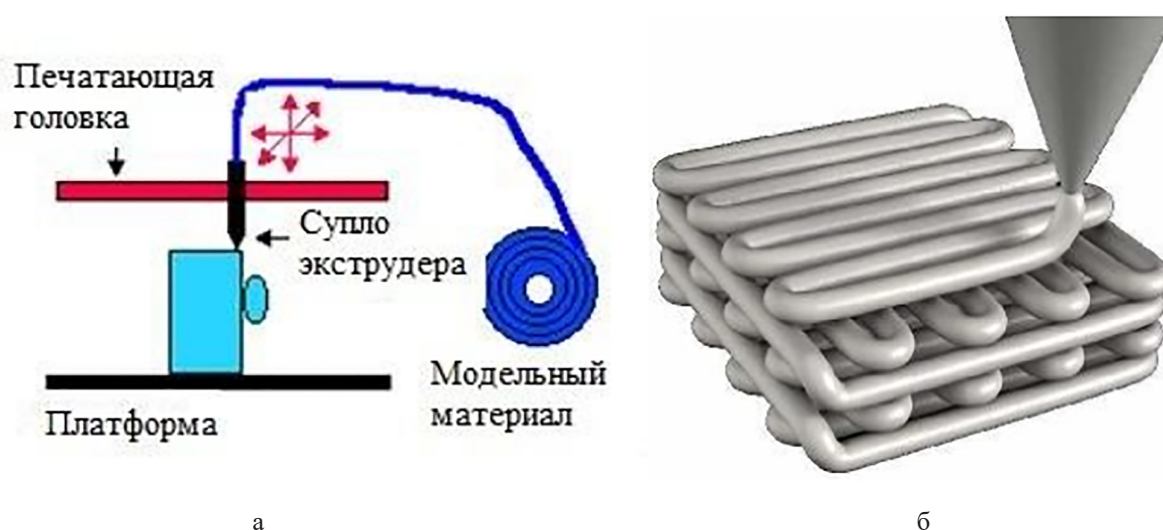


Рисунок 1 – Сущность изготовления объектов моделированием методом послойного наплавления: а – принципиальная схема установки; б – схема формирования слоев изделия

пустоты и отличаются анизотропностью физико-механических свойств. Такие изделия сильно отличаются по свойствам от монолитных изделий, полученных с помощью традиционных субтрактивных технологий.

Также необходимо отметить, что до настоящего времени на территории Республики Беларусь и Российской Федерации отсутствуют стандарты на материалы, методы испытаний и изделия, полученные методами аддитивного производства. Результаты таких исследований зачастую не имеют общей базы, часто являются закрытыми или представлены в виде работ энтузиастов.

Физико-механические характеристики изделий зависят не только от применяемых материалов и применяемой технологии, но и от параметров построения модели: плотности заполнения, структуры заполнения, высоты слоя и других.

Испытание на растяжение является самым распространенным испытанием в дисциплинах материаловедческого характера, которое также требует специальных разрывных стенов (машин). Однако данные установки имеют высокую стоимость и требуют изготовления специальных образцов. В связи с этим возникла необходимость в более доступной по стоимости установке, которая позволяет выполнять те же задачи.

Изделия, полученные по аддитивным технологиям, имеют неоднородную структуру и анизотропные свойства, а следовательно, методы исследований, предназначенные для исследования образцов, полученных традиционными способами (литье, прессование, экструзия), к ним неприменимы.

Целью данной работы является проектирование и оптимизация конструкции лабораторного стенда отличающегося простотой и оригинальностью конструкции, локальной мобильностью с последующим изготовлением из недорогих и доступных материалов для выполнения на лабораторных и практических занятиях исследований по растяжению не литых изделий, а именно полученных методами аддитивных технологий.

Основные задачи, которые приходится решать в ходе разработки такой установки: простота сборки, сохранение достаточных прочностных характеристик при невысокой стоимости, простота в эксплуатации и возможность проведения исследований ориентируясь на существующие ГОСТы.

С целью решения всех вышеперечисленных задач было принято решение, с использованием современных CAD, CAE спроектировать и рассчитать элементы стенда; для оптимизации конструкции изготовить большинство элементов установки при помощи аддитивных технологий, применительно к изделиям, полученным по этим технологиям. В виду того, что отсутствуют стандартизированные методики проведения испытаний, изделий, полученных методами аддитивного синтеза, будут применяться адаптированные существующие стандартизированные методики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проектирования лабораторного стенда использовались методы автоматизированного проектирования и средства топологической оптимизации.

В качестве универсального программного обеспечения была выбрана система Autodesk Fusion 360.

Autodesk Fusion 360 – это комплексный облачный CAD-/CAE-/CAM-инструмент, где объединены все процессы разработки проекта в рамки одного программного продукта. В данном программном продукте можно создавать дизайн своей идеи, проводить расчеты конструкции, готовить модели проекта к производству и при взаимодействии с коллегами в пределах одной платформы.

Система Autodesk Fusion 360 обладает целым рядом возможностей и достоинств. Одной из интересных особенностей программы Fusion 360 является достаточная простота твердотельного моделирования, а добавление временной шкалы придает гибкости в работе над проектами. Использование параметрических размеров при определении эскизов, позволяет связать геометрические характеристики элементов с определенной функцией. Ошибки и слабые места будущего проекта выявляются и исправляются еще на стадии проектирования с помощью инструментов инженерного анализа. Сборка деталей в узле может производиться непосредственно в среде моделирования. Непосредственно в программе можно провести необходимую подготовку модели для аддитивного производства, а на выходе создать всю конструкторскую документацию.

Идея по созданию стенда для разрыва заготовок из пластика полученных аддитивными технологиями появилась в связи с необходимостью исследования прочностных характеристик материалов аддитивного синтеза. Так как приобретение промышленного исследовательского стенда вызывает большие экономические издержки, была поставлена задача для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий», разработать конструкцию лабораторной установки с теми же функциями, но с меньшими экономическими затратами.

Из материалов, применяемых в FDM-технологии в нашей стране, наиболее распространены полимерные материалы. В виду невысокой стоимости, простоты в печати был выбран материал полилактид или PLA-пластик, который обладает достаточными прочностными свойствами. Первоначальный проект лабораторного стенда представлен на рисунке 2.

Как можно заметить все детали стенда излишне массивные, что вызывает множество издержек при изготовлении стенда с применением аддитивных технологий, а именно затраты материала и увеличение времени печати. В виду этого была проведена оптимизация конструкции элементов установки. Оптимизация заключается в коррекции геометрии модели, а точнее в удалении слоев материала в ненагруженных элементах с последующим изготовлением в материале.

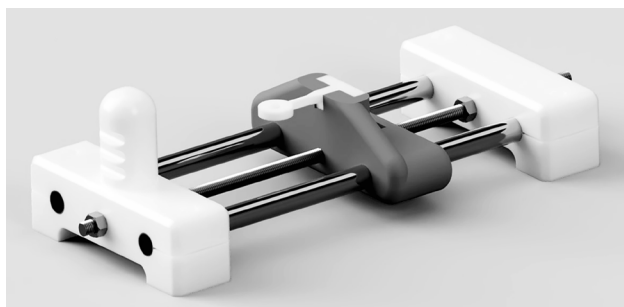


Рисунок 2 – Фотореалистичное изображение 3D-модели станда

Топологическая оптимизация – это комплексный метод оптимизации конструкции, позволяющий рассчитать наилучшее распределение материала в заданной области для заданных нагрузок и граничных условий. Применение топологической оптимизации на этапе проектирования помогает найти вариант

дизайна конструкции с наиболее рациональным распределением материала и пустот в объёме, таким образом заметно снизить его массу. [2] Алгоритм топологической оптимизации производит наилучшее распределение материала в пределах заданной цели и системы ограничений. Он берёт цельный объём материала произвольной формы и постепенно удаляет его часть, при этом минимизируя или максимизируя такие целевые параметры, как масса, податливость или перемещение, и обеспечивая одновременное соответствие заданным требованиям качества и удовлетворения системы ограничений на максимальные допускаемые напряжения или перемещения. При использовании такого подхода и будет решиться задача по снижению массы испытательного станда и, соответственно, времени печати с условием того, чтобы конструкция не заходила в опасный диапазон по собственным частотам.

С целью корректной оптимизации был проведен анализ наиболее нагруженных элементов станда (рис. 3–4).

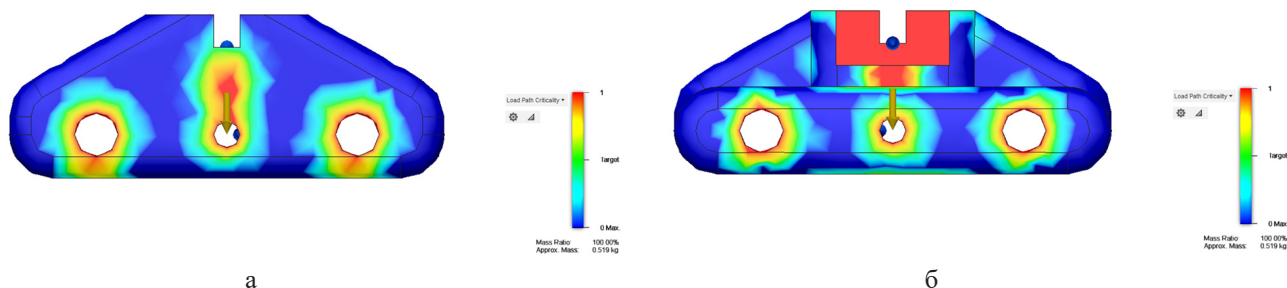


Рисунок 3 – Пример анализа детали каретки: а – вид спереди, стрелкой указана область контакта каретки с осью; б – вид сзади, стрелкой указана область контакта каретки с осью; точкой указана плоскость, к которой прикладывается усилие

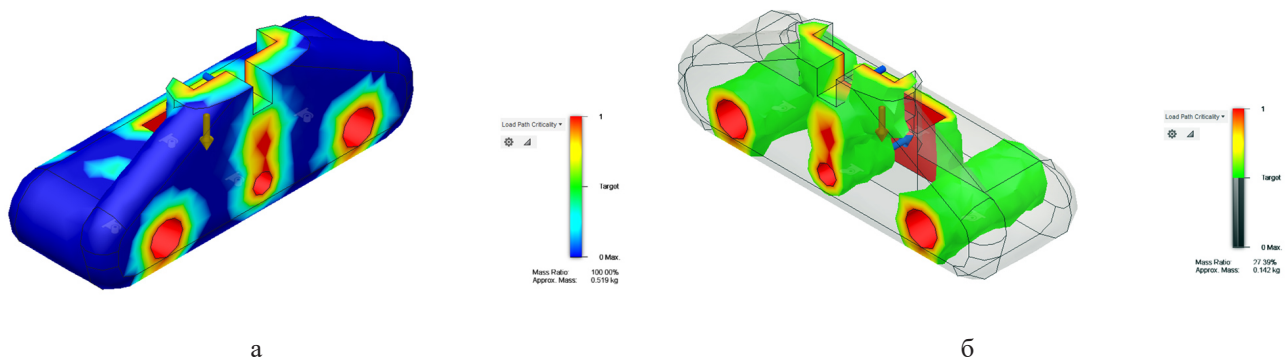
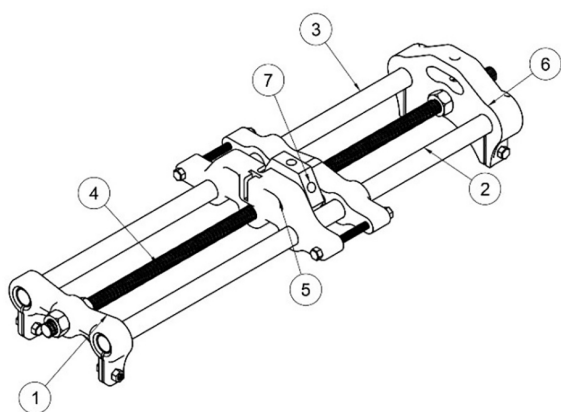


Рисунок 4 – Пример анализа детали «каретка»: а – изометрия с представлением нагруженных элементов; б – изометрия скрытой части, которая не подвергается нагрузкам

После завершения анализа каретки наглядно можно увидеть, какие области нуждаются в удалении лишнего материала (темный цвет – области без нагрузки), при условии, что конструкция не теряет параметров прочности.

В результате проведенной топологической оптимизации конструкции станда, получен оптимизированный вариант, конструкция которого представлена на рисунке 5.



1 – стойка; 2, 3 – направляющие; 4 – шпилька;
5 – каретка; 6 – стойка с креплением под измерительный прибор; 7 – колесо с вставленной гайкой

Рисунок 5 – Конструкция стэнда после топологической оптимизации деталей

Рассмотрим устройство и принцип работы лабораторного стэнда. В качестве измерительного прибора применяются электронные весы, так как они наиболее недорогой и доступный измерительный прибор. Шпилька 4 выполнена из конструкционной стали. В качестве направляющих 2, 3 применяются трубы из конструкционной стали.

Принцип работы стэнда заключается в следующем – исследуемая заготовка, спроектированная для испытаний в соответствии с требованиями ГОСТа 11262 [3], закрепляется одним концом в подвижной каретке 5, а вторым концом – с помощью отверстия к измерительному прибору, который в свою очередь крепится к стойке 6. Путем вращения колеса 7 каретка 5 перемещается, тем самым растягивая заготовку, вплоть до её разрыва. Условия проведения испытаний – согласно ГОСТу 11262, а именно скорость перемещения (п. 5.1.1) соблюдается за счет непрерывного поворота колеса.

Образец по форме и размерам соответствует образцу типа 1 по ГОСТу 11262 с некоторыми дополнениями. Дополнениями являются отверстие и площадка для крепления образца в каретку установки. Эскиз образца приведен на рисунке 6.

После изготовления установки были проведены испытания на растяжение заготовок, изготовленных методами аддитивного производства.

Суть постановочного эксперимента заключается в следующем: методом FDM-печати были изготовлены образцы, в количестве 8 штук, из PLA-пластика. При выставлении технологических параметров заготовки был изменен параметр высоты слоя печати, остальные параметры были постоянными или незначительно изменялись (такие как высота первого слоя и скорости перемещения с целью сохранения качества печати). Далее на лабораторной установке с заготовленными образцами были проведены испытания на разрыв.

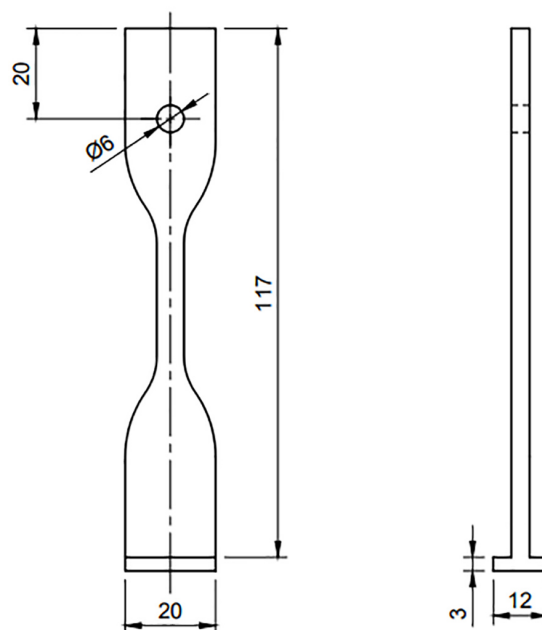


Рисунок 6 – Эскиз образца

По результатам этих испытаний были проведены расчеты и разработан материал для системы Solid Works.

PLA-пластик (полилактид химическая формула $(C_3H_4O_2)_n$) – термопластичный, алифатический, биосовместимый, полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Отличительной особенностью является способность к биоразложению. Изготавливается из возобновляемых ресурсов, таких как сахарный тростник и кукуруза. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов (обычно данный материал проходит специальную медицинскую сертификацию). Лактид и молочная кислота, проявляют оптическую активность, существуя в виде двух L- и D-стереоизомеров, являющихся зеркальным отображением друг друга. При варьировании относительного содержания этих форм в полилактиде, можно задавать свойства получаемого полимера, а также получать различные классы полилактидных материалов. Полилактид из 100% L-лактида (L-ПЛА) имеет высокую степень стереорегулярности, что придает ему кристалличность. Температура стеклования L-ПЛА – 54–58 °С, температура плавления – 170–180 °С, скачок теплоёмкости 100 % аморфного ПЛА – 0,54 Дж/(г·К). Используя при полимеризации смесь D- и L-форм лактида, получают аморфный полилактид (L, D-ПЛА), температура стеклования которого составляет 50–53 °С, плавление отсутствует, ввиду кристаллической фазы. Самая высокая температура плавления у стереокомплекса, состоящего из чистого D-ПЛА и чистого L-ПЛА. Две цепочки сплетаются, и образующиеся дополнительные взаимодействия между ними ведут к повышению температуры плавления (до 220 °С). [2]

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Печать образцов выполнялась на 3D-принтере Flashforge Finder, материалом PLA-пластиком, диаметр филамента 1,75 мм, фирма-производитель – Bestfilament (артикул f002-коричневый). Так как исследуются заготовки, полученные методом аддитивного синтеза, то необходимо выбрать подходящие режимы печати и параметр для исследования.

Помимо высоты слоя изменялись также параметры высоты первого слоя, скорость печати и скорость перемещения. Это было необходимо для сохранения качества печати и снижения вероятности наличия дефектов печати. Нами разработан и проведен постановочный эксперимент с целью проверки гипотезы

зависимости прочностных характеристик изделий, полученных методами аддитивных технологий от параметров печати с изготовлением минимального количества образцов. Согласно нашим предположениям, при FDM-печати, чем больше высота слоя, тем меньше адгезия между слоями. Для проверки этой гипотезы были изготовлены заготовки с определенными технологическими параметрами, и для каждого параметра высоты слоя печати, скорости перемещения было изготовлено два образца. Разработанная установка позволяет использовать непосредственно конкретные изделия для проведения испытаний

Технологические параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технологические параметры изготовленных образцов

№ заготовки	Высота слоя, мм	Высота первого слоя, мм	Количество сплошных слоев сверху модели	Количество сплошных слоев снизу модели	Количество стенок	Степень заполнения, %	Структура заполнения	Скорость печати, мм/с	Скорость перемещения, мм/с	Температура экструдера, °С	Расход материала, м
1	0,18	0,27	2	2	2	15	шестиугольник	60	80	220	0,75
2	0,12	0,2	2	2	2	15	шестиугольник	50	70	220	0,75
3	0,3	0,3	2	2	2	15	шестиугольник	80	100	220	0,67
4	0,08	0,2	2	2	2	15	шестиугольник	50	70	220	0,78

Помимо исследуемых параметров имеет наибольшее значение ориентация образца при печати.

Согласно полученным результатам, были построены следующие графики зависимости:

– график зависимости максимальной нагрузки

ки, которую выдержал образец, от параметра высоты слоя (рис. 7);

– график зависимости удлинения заготовки от параметра высоты слоя (рис. 8).

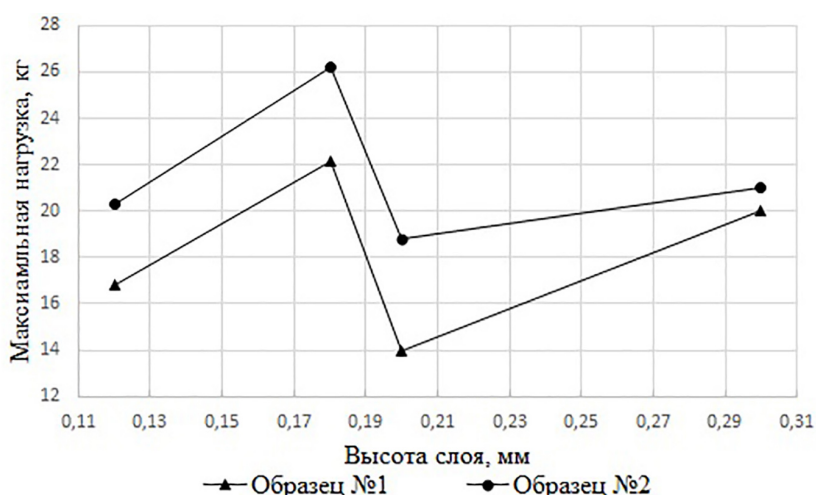


Рисунок 7 – Эскиз образца

После проведенных экспериментов было принято решение спроектировать материал, для САЕ-модуля CAD-системы SolidWorks. Для проектирования были использованы параметры, указанные ранее. Также был рассчитан модуль сдвига, по формуле

$$G = Fl / A\Delta x,$$

где F – действующая сила, применим среднюю $F = 198,7$ Н; A – площадь, на которую действует сила, $A = 30,66$ мм²; l – начальная длина, $l = 3$; Δx – смещение, применим среднее $\Delta x = 7,3375$.

Тогда:

$$G = \frac{198,7 \cdot 3}{30,66 \cdot 7,3375} = 2,65 \text{ Н/мм}^2.$$

Все параметры материала приведены в таблице 2.

Так как изделия, полученные методами аддитивного синтеза, имеют слоистую структуру с ячеистым заполнением на их физико-механические характеристики будут влиять такие свойства, как высота слоя печати; плотность и структура заполнения; температура экструдера, скорости его перемещения и другие.

ВЫВОДЫ

Целью данного исследования является проектирование, оптимизация конструкции лабораторного стенда для проведения испытаний на растяжение изделий, полученных методом аддитивных технологий.

Разработанный лабораторный стенд (установка) имеет возможность применения в испытаниях при учебной деятельности, с целью наглядной демонстрации принципов проведения испытаний. Конструкция изделия требует доработки:

- добавление механического привода, с целью соблюдения постоянной скорости проведения испытаний;
- добавление электрической части, для более точной регистрации момента и усилия разрыва;
- дальнейшая оптимизация конструкции.

На текущий момент исследование неполное, так как по текущим данным крайне сложно построить какую-либо математическую зависимость величины параметров высоты слоя от параметра максимальной нагрузки, удлинения или места разрыва. Это связано с явным недостаточным количеством экспериментов и не высокой точностью используемой установки. Однако уже на данном этапе можно сделать некоторые предположения:

- при высоте слоя 0,3 мм разброс параметра максимальной нагрузки минимальный;
- разброс параметра места разрыва минимальный при высоте слоя 0,12 мм;
- в целом, значения высоты слоя 0,12 мм имеет наиболее стабильные показатели;
- показатели, полученные при исследовании материала, заданного по значениям экспериментов, в Simulation блоке CAD-системы SolidWorks близки к экспериментальным данным.

Дальнейшее развитие видится в уточнении данных экспериментов и составлении математических зависимостей. Для этих целей необходимо провести значительно больше экспериментов в диапазоне параметра высоты слоя от 0,1 мм до 0,3 мм с шагом 0,01 мм. На каждый параметр провести не менее пяти экспериментов. Общее количество необходимых экспериментов – 100. Также такое же количество экспериментов, с такими же параметрами, необходимо провести на промышленной исследовательской установке.

Предпринята попытка провести исследование изделий, полученных методами аддитивного синтеза (испытывались традиционными методиками).

Доработанные данные можно будет применять при исследовании изделий, произведенных для легкой и текстильной промышленности в рамках мелкосрочного ремонта. Также перспективность дальнейших исследований заключается в разработке более совершенного оборудования, создании стандартизированных методик испытаний с последующей их сертификацией.

Таблица 2 – Параметры материала, спроектированного в САЕ-блоке CAD-системы SolidWorks

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	330	МН/м ²
Коэффициент Пуассона	0,3	Не применимо
Модуль сдвига	2,65	МН/м ²
Массовая плотность	1230	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	40	МН/м ²
Предел прочности при сжатии	77,4	МН/м ²
Предел текучести	60	МН/м ²
Коэффициент теплового расширения	960000	/К
Теплопроводность	8	W/(м·К)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибсон, Я. Технологии аддитивного производства / Д. Розен, Б. Стакер; пер. с англ. И. В. Шишковский. – Москва: Техносфера, 2018. – 648 с.
2. Ковчур, А. С. Топологическая оптимизация конструкций изделий для аддитивного производства / А. С. Ковчур, П. С. Ширяев // материалы докладов 53-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – Т. 2. – С. 334–337.
3. ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – Взамен ГОСТ 11262-80; введ. 1980-12-01 – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Изд-во стандартов, 2018. – 24 с.
4. Полилактид [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B4>. – Дата доступа: 22.03.2022.

REFERENCE

1. Gibson, Ja. Tehnologii additivnogo proizvodstva / D. Rozen, B. Staker; per. s ang. I.V.Shishkovskij. – Moskva: Tehnosfera, 2018. – 648 p.
2. Kauchur, A.S., Shirjaev, P.S., (2020), Topological optimization of product designs for additive manufacturing [Topologicheskaja optimizacija konstrukcij izdelij dlja additivnogo proizvodstva], Proceedings of the 53rd International Scientific and Technical conference Of Teachers and Students, Vitebsk, VSTU, 2020, in 2 volumes. Volume 2, – pp. 334–337.
3. GOST 11262-2017. Plastmassy. Metod ispytaniya na rastjazhenie. – Vzamen GOST 11262-80; vved. 1980-12-01 – Minsk: Mezghos. Sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; Moskva: Izd-vo standartov, 2018. – 24 s.
4. Polilaktid [Polylactide], (2022), available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B4>. – Accesed 22.03.2022.

SPISOK LITERATURY

1. Additive Manufacturing Technologies by Ian Gibson, David Rosen and Brent Stocker , tr. from eng. I. V. Shishkovsky. – Moscow: Technosphere, 2018. – 648 p.
2. Kauchur, A. S. Topological optimization of product designs for additive manufacturing / A. S. Kauchur, P. S. Shiryaev // Proceedings of the 53rd International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students: in 2 volumes / EI " VSUT. – Vitebsk, 2020. – Т. 2. – pp. 334–337.
3. GOST 11262-2017. Plastics. Tensile test method. – Replacement of GOST 11262-80; introduced. 1980-12-01 – Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification; Moscow: Publishing house of standards, 2018. – 24 p. (In Russian)
4. Polylactide [Electronic resource]. – Access mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B4>. – Access date: 22.03.2022.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022.