

УДК 678+62-4+66-97

***ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРИСПОСОБЛЕНИЯ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***

Шемякин Н.Д.

Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,

Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Слюнько Т.В.

Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,

Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Клековкин Г.Д.

Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,

Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Аннотация: проектирование и изготовление технологического приспособления методом 3D-печати для проведения теплового контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. В результате исследования были рассмотрены технологии аддитивного производства, материалы, применяемые при аддитивном производстве, было спроектировано и произведено приспособление для технического фена, применяемое при методе активного теплового контроля изделий из полимерных композиционных материалов. Областью применения аддитивных технологий является машиностроительная промышленность, медицинская промышленность, авиакосмическая промышленность.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D печать, термопласты, 3D принтер, метод теплового контроля.

***DESIGN AND MANUFACTURE OF TECHNOLOGICAL DEVICES BY 3D
PRINTING FOR THERMAL CONTROL OF STRUCTURES MADE OF
POLYMER COMPOSITE MATERIALS***

Shemyakin N.D.

4th year student, Aerospace Faculty,

Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Slyunko T.V.

4th year student, Aerospace Faculty,

Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Klekovkin G.D.

4th year student, Aerospace Faculty,

Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Annotation: design and manufacture of technological devices by 3D printing for thermal control of structures made of polymer composite materials. As a result of the study, additive manufacturing technologies, materials used in additive manufacturing were considered, a device for a technical hair dryer used in the method of active thermal control of products made of polymer composite materials was designed and manufactured. The field of application of additive technologies is the machine-building industry, the medical industry, the aerospace industry.

Keywords: additive technologies, 3D printing, thermoplastics, 3D printer, thermal control method.

Введение

Аддитивные технологии производства позволяют послойно изготавливать изделия на основе компьютерной 3D-модели. Такой процесс изготовления также называют “выращиванием”, вследствие технологического процесса производства изделия, который заключается в последовательном наращивании слоёв материала. При традиционном производстве изготовление происходит путем отсекаания лишнего от заготовки, либо ее деформированием, в случае аддитивных технологий

изделие “выращивают” из расплавленного материала, который после охлаждения твердеет, принимая необходимую форму.

В настоящее время технологии аддитивного производства применяются в строительстве, архитектуре, авиакосмической отрасли, медицине, машиностроении и других сферах деятельности. Так в машиностроении аддитивные технологии позволяют получать качественные прототипы моделей, помогающие изучить геометрические характеристики будущего изделия, например, оценить эффективность аэродинамического профиля будущего изделия[3].

На сегодняшний день можно выделить следующие технологии аддитивного производства:

- FDM (Fused deposition modelling) – послойное построение изделия из расплавленной полимерной нити. Это самый распространенный способ 3D-печати в мире, на основе технологии FDM работают как промышленные, так и бытовые 3D-принтеры. FDM-принтеры работают с различными типами пластиков, самыми популярными и доступными из которых являются ABS и PLA. Изделия из пластика отличаются высокой прочностью, гибкостью, прекрасно подходят для прототипирования, а также для изготовления мелкосерийных изделий;
- SLM (Selective laser melting) – селективное лазерное спекание металлических порошков. Самый распространенный метод 3D-печати металлом. С помощью технологии SLM можно быстро изготавливать геометрически сложные изделия, которые по своим свойствам превосходят литейное и прокатное производство;
- SLS (Selective laser sintering) – селективное лазерное спекание полимерных порошков. С помощью технологии SLS можно получать большие изделия с различными физическими свойствами (повышенная гибкость, прочность, термостойкость и др.);

- SLA (Stereolithography) – лазерная стереолитография, отверждение жидкого полимерного материала под действием лазера. С помощью технологии SLA получают высокоточные детализированные изделия с различными свойствами. Изделия, полученные по данной технологии, используют для визуальной оценки, тестирования или в качестве мастер-моделей для создания литейных форм;
- DLP (Digital light processing stereolithography) и LCD (Liquid crystal display stereolithography) – проекторная и жидкокристаллическая стереолитография, отверждение жидкого полимерного материала лампой проектора и подсветкой жидкокристаллического дисплея соответственно. Данные технологии отличаются между собой источником засветки полимера. В отличие от SLA в DLP и LCD стереолитографии происходит полимеризация сразу всего слоя целиком, что позволяет уменьшить время производства детали. С помощью технологий DLP и LCD получают высокоточные детализированные изделия с различными свойствами. Изделия, полученные по данной технологии, используют для визуальной оценки, тестирования или в качестве мастер-моделей для создания литейных форм;
- MJM (Multi-jet modelling) – многоструйное моделирование с помощью фотополимерного или воскового материала. С помощью технологии MJM получают выжигаемые и выплавляемые мастер-модели для литья, а также различные прототипы изделий;
- PolyJet – отверждение жидкого фотополимера под ультрафиолетовым излучением. С помощью технологии PolyJet получают прототипы и мастер-модели с гладкими поверхностями;

- CJP (Color jet printing) – послойное распределение клеящего вещества по порошковому гипсовому материалу. На сегодняшний день – это единственная технология полноцветной 3D-печати. С помощью технологии CJP изготавливают прототипы продукции для тестирования и презентаций, сувенирную продукцию, а также архитектурные макеты;
- DMD (Direct metal deposition) – непосредственное осаждение металла в точку куда подводится энергия и где в данный момент происходит построение модели. С помощью технологии DMD возможно создание крупных изделий сразу из нескольких видов сплавов, а также производство ремонта изделий.

Применение аддитивных технологий позволяет производствам решать такие задачи, как: модернизация и автоматизация действующих производств, проектирование эффективных машиностроительных производств различного назначения, средств и систем их оснащения[6].

Целью данной работы является изготовление приспособления для технического фена. Выполнение данной работы требует решения следующих задач:

1. Изучение литературы, посвященной технологиям аддитивного производства и используемым в них материалам.
2. Разработка геометрической модели приспособления.
3. Выбор технологии изготовления.
4. Выбор материала для изготовления приспособления.
5. Подбор режима печати приспособления.
6. Печать приспособления.
7. Испытание приспособления.

Основная часть

FDM 3D-принтером называется устройство для создания трехмерных объектов путем послойного нанесения расплавленного пластика на рабочую поверхность.

Принцип работы FDM принтера заключается в перемещении печатающей головки в 3-осевой системе координат, во время которого происходит укладка слоев по 3D-модели. Выдавливание пластика происходит благодаря экструдеру, установленному в печатающей головке. Экструдер состоит из механизма подачи нити, нагревательного блока в котором происходит плавление материала и сопла, задающего диаметр выходного прутка. Температура нагревательного блока выбирается исходя из свойств применяемого материала. Следует отметить, что в зависимости от типа, используемого филамента может потребоваться дополнительное охлаждение материала за счет вентиляторов, прикрепленных к экструдеру.

На сегодняшний день представлено большое количество материалов, используемых для FDM 3D-печати. Условно материалы делят на обычные, инженерные и специальные. К обычным относят материалы, которые не предъявляют особых требований к печати и имеют большое распространение в бытовых сферах, к ним относят PLA, ABS, PVA, PET-G, TPU, PC, ABS/PC [6]. К инженерным пластикам относят материалы, применяемые на производствах имеющие улучшенные или более сбалансированные свойства, к ним относят Carbon, HIPS, WAX, ASA, PP, Nylon и другие. В таблице 1 представлены характеристики некоторых обычных и инженерных пластиков. Специальные пластики обладают уникальными свойствами, от внешнего вида похожего на натуральное дерево, до токопроводности и магнетизма, к ним относят Wood (имитирует внешний вид дерева), Metal (имитирует внешний вид и свойства металлов), Biodegradable (биоразлагаемый), Conductive (проводит электрический

ток), Glow-in-the-dark (светится в темноте), Magnetic (ферромагнитный), Color-changing (меняет цвет при нагревании)[5].

Таблица 1 – Характеристики пластиков для 3D-печати

Название	Расшифровка	Плотность, г/см ³	Предел прочности на разрыв, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа	Модуль упругости при изгибе, МПа	Температура плавления, °С	Температура размягчения, °С	Температура эксплуатации, °С	Усадка, %
ABS	Акрилонитрил бутадиен стирол	1,1	22	41	2100	175-210	100	-40 +80	0,8
PLA	Полилактид	1,2 5	57	55	2300	175-180	50	-20 +40	0,4- 0,7
PET-G	Полиэтилентерефталат	1,2 6	55	50-83	2060	222-225	80	-40 +70	0
ASA	Акрилонитрилстиролакрилат	1,0 8	37	76	1350	215-220	100	-40 +90	1
Carbon	Нейлон с углеволокном	1,2 4	85	122	5160	240-260	120	-40 +150	0,4
Nylon	Полиамид	1,1 3	66-83	70	2600	215-220	120	-30 +120	1-2
ABS/PC	ABS/Поликарбонат	1,1 1	55	80	2300	230-240	135	-30 +120	0,7
HIPS	Ударопрочный полистирол	1,0 5	17	38	1350	175-210	96	-40 +70	0,4
SBS	Стиролбутадиен сополимер	1,0 1	34	36	1500	190-210	76	-80 +65	0,2
PP	Полипропилен	0,9	75	37	1310	205	103	-20 +80	1-3
TPU	Термопластичный полиуретан	1,1 5	27,96	6,5	68	200-210	95	-35 +90	0,4- 0,7
Flex	Термоэластопласт	1,1	17,5	5,3	73	200-210	110	-100 +100	0,35- 0,8

Gumm у	Синтетический каучук	1,0 5	15	4,3	55	170	65	-15 +50	0,35- 0,8
-----------	-------------------------	----------	----	-----	----	-----	----	------------	--------------

Выбор материала и проектирование 3D модели

Исходя из условий эксплуатации и сферы применения изготавливаемого приспособления были сформулированы цель и задачи, согласно которым производится выбор оптимального материала для изготовления приспособления.

Цель: спроектировать и изготовить технологическое приспособление для улучшения качества теплового контроля конструкций из ПКМ методом 3D-печати. Приспособление не будет подвергаться механическим нагрузкам, в процессе работы приспособление будет нагреваться до 80-100 °С. Габаритные размеры представлены на эскизе (рис. 4).

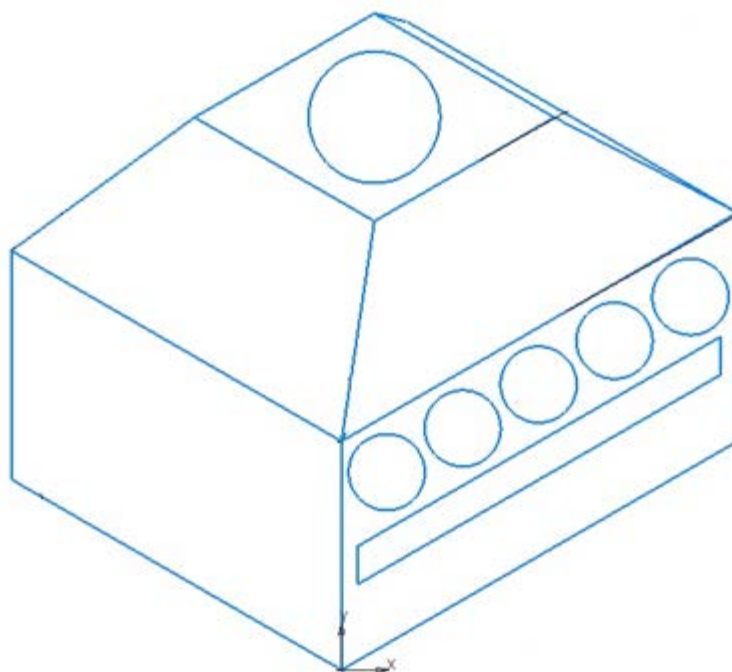


Рис. 4 – эскиз детали

Авторская разработка

Выбор пластика для приспособления, осуществляется с учётом следующих физико-механических и физико-химических характеристик: температура размягчения, коэффициент усадки, предел прочности на разрыв. Данные

характеристики приведены в таблице 1. Произведем первичный выбор подходящих пластиков по температуре размягчения исходя из поставленных задач $T_{\text{разм.}} \geq 100^{\circ}\text{C}$. По данному условию подходят: ABS, ASA, Nylon, Carbon, ABS/PC, PP, Flex. Исходя из рентабельности производства, наиболее целесообразным будет изготовление из ABS или Nylon. Nylon обладает превосходящими ABS физическими свойствами, но согласно поставленным задачам прочностные характеристики не являются приоритетными при выборе материала, так же Nylon имеет большую усадку, что вызывает дополнительные сложности при подборе параметров, кроме того Nylon дороже ABS на 80-100%. Исходя из перечисленных особенностей для изготовления был выбран ABS пластик.

Одной из особенностей разработки 3D модели для FDM печати является необходимость учета диаметра установленного на принтер сопла, поскольку для правильной укладки линий размеры модели лучше всего делать кратными диаметру сопла.

Таким образом, с учетом всех вышеперечисленных особенностей и требований, построена 3D-модель изделия (рис. 5).

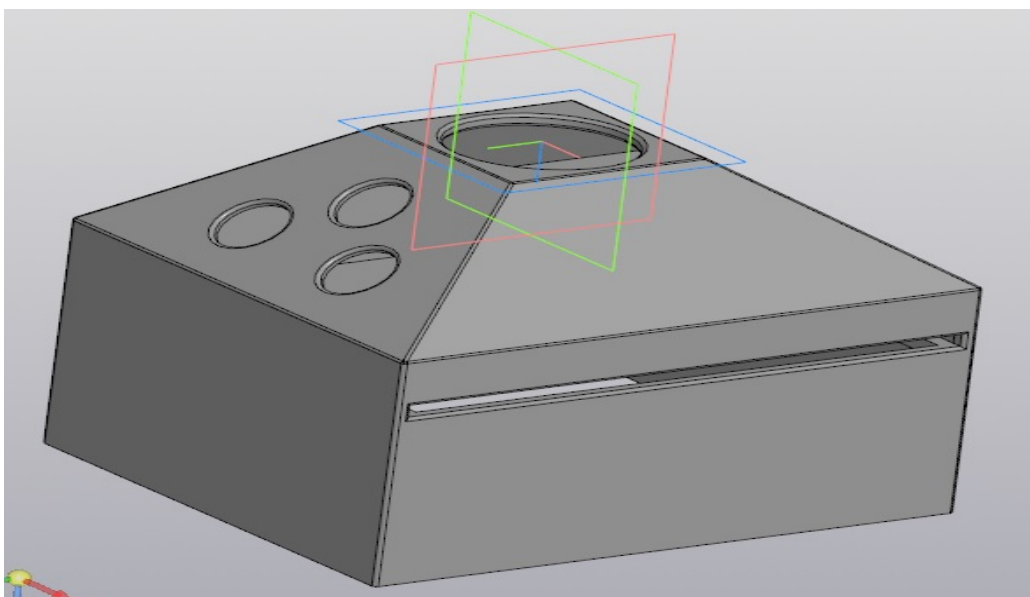


Рис. 5 – 3D модель изделия

Авторская разработка

Подготовка 3D модели и печать изделия

После создания модели следует произвести преобразование модели в G-code (т.е. «нарезать» модель на слои). G-code - условный язык программирования устройств с ЧПУ (числовым программным управлением), файл с G-code содержит в себе команды понимаемые программным обеспечением 3D принтера. Данная операция производится при помощи специализированного программного обеспечения (слайсера). На этом этапе задаются параметры печати модели и выбирается шаблон заполнения модели, согласно которому будет происходить перемещение печатающей головки принтера. Нарезка модели производилась в ПО Ultimaker CURA 4.0 (рис. 6).

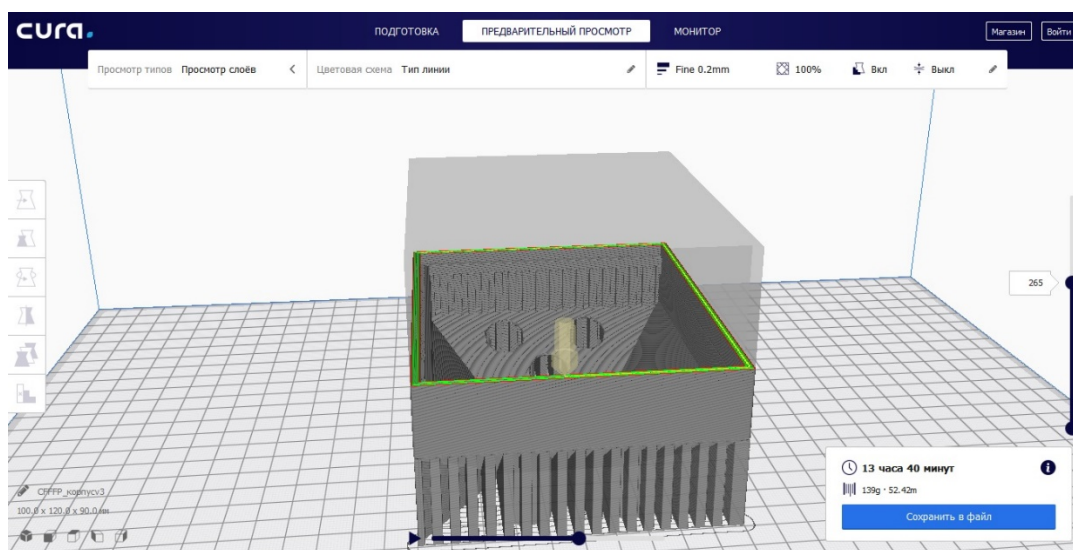


Рис. 6 – визуализация печати

Авторская разработка

Параметры печати задаются исходя из свойств материала, технического задания и характеристик принтера[1,2]. Основными параметрами печати являются:

- Высота слоя – напрямую влияет на качество поверхности и детализацию модели;
- Высота первого слоя – влияет на адгезию модели к столу, более высокая высота первого слоя может положительно сказаться на адгезии модели к столу;

- Ширина линии – устанавливается исходя из диаметра применяемого сопла, чем меньше диаметр сопла, тем более детализированная печать, однако малый диаметр сопла негативно сказывается на скорости печати.
- Толщина стенки – влияет на прочность модели, чем толще стенка, тем прочнее модель;
- Плотность заполнения – определяет количество пластика внутри стенок, а также влияет на прочность детали, так же влияет на качество модели, так как при отсутствии заполнения может произойти нарушение геометрии в процессе печати;
- Температура сопла – подбирается исходя из температуры плавления филамента и скорости печати, при высокой скорости печати может потребоваться увеличение температуры, для повышения производительности экструдера;
- Температура стола – влияет на адгезию пластика к рабочей поверхности;
- Поток – определяет количество экстрадированного пластика, стандартное значение 100%, но может потребоваться увеличение данного значения при высоких скоростях печати;
- Величина и скорость отката – данные параметры нужны для возвращения филамента в экструдер при смене контуров и слоев во время печати, так как при плавлении пластик начинает самопроизвольно вытекать, что может вызвать дефекты при печати;
- Скорость печати - низкая скорость положительно сказывается на точности получаемых изделий, слишком высокая скорость может негативно сказаться на качестве изделия, ввиду высокой инерции печатающей головки, не позволяющей добиться точного позиционирования сопла;

- Поддержки – необходимы для печати деталей сложной формы, части которых нависают над первым слоем;
- Тип прилипания к столу – отвечает за генерацию дополнительных элементов для увеличения площади первого слоя, что позволяет добиться лучшей адгезии материала к столу.

После преобразования модели в G-code, файл с ним загружается в принтер и начинается создание детали, по окончании процесса печати следует дать остыть столу для облегчения снятия модели со стола.

Для изготовления приспособления были выбраны следующие параметры печати:

- Высота слоя – 0,2 мм;
- Высота первого слоя – 0,2 мм;
- Ширина линии – 0,4 мм;
- Толщина стенки – 1,6 мм;
- Плотность заполнения – 75%;
- Температура сопла – 245 °С;
- Температура стола – 90 °С;
- Поток – 105%;
- Величина и скорость отката – величина 6 мм, скорость 25 мм/с;
- Скорость печати – 60 мм/с;
- Поддержки – включены, генерация – везде, угол нависания 50°, плотность 15%;
- Тип прилипания к столу – юбка.

Данные параметры были подобраны экспериментально. Высота слоя была выбрана исходя из того, что к качеству поверхности стенок приспособления не предъявлялось высоких требований. Ширина линии выбрана согласно диаметру установленного сопла. Толщина стенки выбрана, так что бы между стенками

прямоугольной части модели отсутствовало заполнение, что положительно влияет на прочность изделия.

Печать изделия с данными параметрами заняла примерно 13 часов, однако из-за программного сбоя принтера модель напечаталась не полностью. Вторая половина корпуса была напечатана отдельно, а за тем приклеена к первой с помощью растворенного в ацетоне ABS пластика. После склеивания изделие было зашлифовано с целью устранения дефектов поверхности после склеивания. Готовое изделие продемонстрировано на рисунке 7.



Рис. 7 – фото готового приспособления
Авторская разработка

Метод активного неразрушающего теплового контроля

Тепловой метод – это метод неразрушающего контроля, основанный на фиксации инфракрасного излучения и его преобразования в видимый спектр. С помощью теплового метода выявляют неоднородность объектов. Тепловой метод разделяют на активный и пассивный контроль. При пассивном контроле используется исходное тепловое поле объекта, например, поиск утечек тепла в зданиях. Активный контроль предполагает предварительный нагрев образца внешним источником тепла.

Для контроля изделий из ПКМ применяется активный тепловой метод, данный метод позволяет быстро и с минимальными затратами ресурсов выявлять дефекты в образцах, однако данный метод затруднительно применять для образцов толщиной более 6 мм. При испытании образец нагревается при помощи технического фена, после нагревания образца до необходимой температуры, нагрев прекращается, а с образца снимают термограмму при помощи тепловизора. Так как площадь образца значительно превышает площадь сопла технического фена, то для равномерного прогревания образца фен вручную перемещают по площади образца, что негативно сказывается на времени проведения контроля, а также увеличивает погрешность при измерении.

Изготовленное приспособление является насадкой для технического фена. Приспособление позволяет равномерно прогревать установленный образец, для последующего снятия термограммы образца с помощью тепловизора.

Последовательность испытания методом активного теплового контроля:

- Установка приспособления на технический фен;



Рис. 8 – образец, зафиксированный в тисках с установленным приспособлением

Авторская разработка

- Фиксация образца в приспособлении (рис. 8);
- Нагревание образца до необходимой температуры;
- Прекращение нагрева образца при помощи установки заслонки, предусмотренной в приспособлении;
- Снятие термограммы образца при помощи тепловизора (рис. 9);

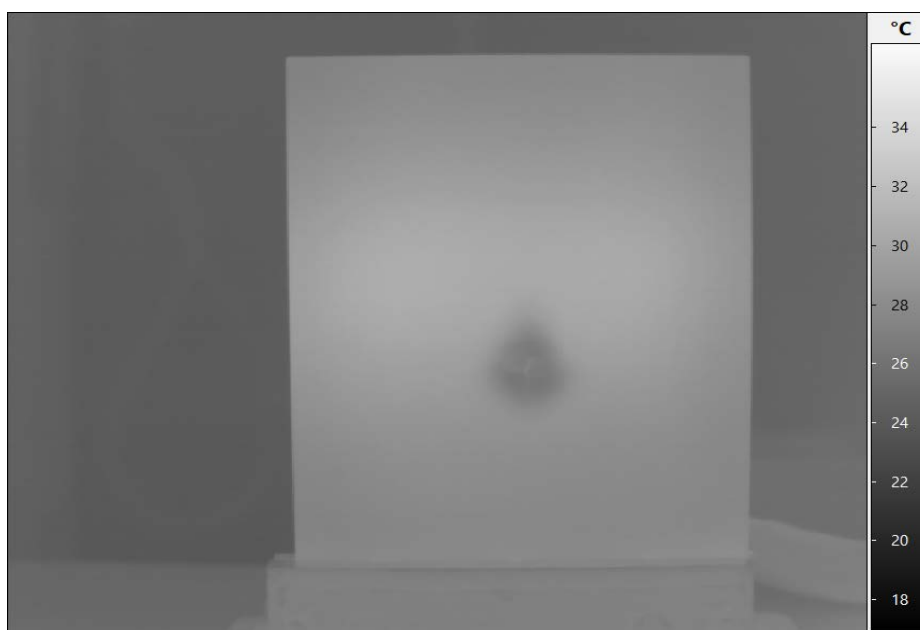


Рис. 9 – термограмма образца с дефектом (темная область в центре образца)

Авторская разработка

- Обработка полученных результатов.

Изготовленное приспособление было успешно протестировано, в ходе испытания образца. Данное приспособление распределяет потоки нагретого воздуха внутри камеры, сформированной корпусом приспособления, что позволяет получить равномерное прогревание по всей площади образца. Данный эффект позволяет упростить дальнейшую обработку результатов ввиду исключения человеческого фактора, уменьшая погрешность измерений в сравнении с ручным нагревом образца.

Заключение

В ходе проведения работы были изучены технологии 3D печати, характеристики и свойства термопластичных материалов, методика проведения неразрушающего теплового контроля. Получены навыки проектирования и изготовления методом 3D печати, изделий из термопластичных материалов. Были решены задачи, по проектированию 3D модели, выбору технологии изготовления и материала. Был экспериментально подобран режим печати ABS пластиком. Изготовлено приспособление для технического фена, применяемое при активном тепловом методе контроля. Работа была выполнена в рамках НИРС[7].

Библиографический список

1. Витренко В.А., Сыровой Г.В., Афошин А.А. Влияние скорости в 3-d печати на прочностные характеристики цилиндрических образцов по FDM-технологии // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – N 1. С. 25-29. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42518110> (дата обращения: 06.05.2022). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
2. Эттель В.А., Берг А.А., Иванов С.С. Исследование технологии производства деталей сложной конфигурации с помощью аддитивных технологий // Академическая наука - проблемы и достижения. – 2018. – С. 41-43. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35075248&pff=1> (дата обращения: 06.05.2018). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

3. Дубинкин Д.М., Красавин А.Д., Сорокин В.Ю. Современное состояние FDM-технологий // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. – 2019. – С. 171-173. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42353889> (дата обращения: 07.05.2022). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
4. Санников Д.Ю., Костыгова Л.А. Состояние и перспективы развития аддитивных технологий в производстве титановых изделий // Экономика промышленности. – 2016. – N 1. С. 8-11. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25926156> (дата обращения: 22.05.2022). - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
5. Rajeev Ranjan, Deepak Kumar, Manoj Kundu, Subhash Chandra Moi. A critical review on Classification of materials used in 3D printing process.– 2022. – N 1. С. 43-49. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322016492> (дата обращения 16.05.2022). - Режим доступа: Научная платформа ScienceDirect.
6. Soyeon Park, Wan Shou, Liane Makatura, Wojciech Matusik, Kun (Kelvin) Fu. 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. – 2022. – N 1. С. 43-76. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2590238521005178> (дата обращения 16.05.2022). - Режим доступа: Научная платформа ScienceDirect.
7. Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А. Методические указания по проведению научно-исследовательской работы для студентов бакалавриата по направлению «Материаловедение и технологии материалов». - Пермь: ПНИПУ, 2017 - С. 40

Оригинальность 82%