УДК 678: 67.017
МРНТИ 84.15.03

СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

БЕРГАЛИЕВА С.А.[1], БОЛЕГЕНОВА С.А.[1], САЛЕС Д.[2]

[1]Казахский Национальный университет им. аль-Фараби
[2]Университет Кадиса, Испания

Аннотация: *Аддитивное производство – это технология послойного изготовления деталей, которая за последние годы активно развивается в медицине и автомобилестроении. Основными преимуществами этой технологии является как экономия сырьевых и энергетических ресурсов, так и уменьшение выбросов CO_2. Стандарты в области аддитивного производства могут стать дополнительным импульсом для развития данной отрасли. Цель работы: 1) провести анализ нормативной базы в области аддитивного производства на сегодняшний день; 2) рассмотреть на сколько существующие методы испытания полимерных изделий, изготовленные традиционными методами, применимы для определения твердости и механических свойств при напряжении таких же изделий, изготовленных с помощью моделирования методом наплавления.*

Ключевые слова: *аддитивное производство, стандартизация, стандарт, моделирование методом наплавления, прочность при растяжении, твердость*

STANDARDIZATION IN ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract: *Additive manufacturing is a layer-by-layer manufacturing technology of parts that has been developed in medicine and automotive industry in the recent years. The main advantages of this technology are saving raw materials and energy resources, as well as reducing CO_2 emissions. Standards in Additive manufacturing can be an additional impulse for the development of this industry.*
The purpose of the work is 1) to analyze the regulatory framework in the field of Additive manufacturing; 2) to consider if the existing methods for testing polymer products made by traditional methods are applicable for determining the hardness and mechanical properties under strength of the same products made using Fused Deposition Modeling.

Key words: *Additive manufacturing, standardization, standard, Fused Deposition Modeling, tensile strength, hardness*

АДДИТИВТІ ӨНДІРУ САЛАСЫНДА СТАНДАРТТАНДЫРУ

Аңдатпа: *Аддитивті өндіріс – бұл соңғы жылдары медицина мен автомобиль өнеркәсібінде белсенді дамып келе жатқан бөлшектерді қабатты өндіру технологиясы. Бұл технологияның негізгі артықшылықтары шикізат пен энергия ресурстарын үнемдеу, сондай-ақ CO_2 шығарындыларын азайту болып табылады. Аддитивті өндіріс саласындағы стандарттар осы саланы дамыту үшін қосымша серпін бола алады. Жұмыстың мақсаттары: 1) бүгінгі күні аддитивті өндіріс саласындағы нормативтік базаға талдау жүргізу; 2) балқыту әдісімен модельдеу арқылы дайындалған бұйымдардың қаттылығы мен механикалық қасиеттерін анықтау үшін, дәстүрлі әдістермен өндірілген полимерлі бұйымдарды сынауда қолданыстағы әдістердің қаншалықты қолданылатындығын қарастыру.*

Түйінді сөздер: *аддитивті өндіріс, стандарттау, стандарт, тұндыруды модельдеу, созылу күші, қаттылық*

Введение

Согласно ISO/ASTM 52900:2015 [1] аддитивное производство (АП) – процесс соединения материалов для изготовления деталей или объектов из данных трехмерной модели, как правило, слой за слоем, в отличие от методов изготовления путем исключения материала и формования. Для названия данного процесса также используется определние 3Д принтинг.

В 2017 году размер рынка АП составил $7×109 с ежегодной тенденцией роста 15-25% [2]. Глобальное увеличение производства АП может быть объяснено следующими основными его преимуществами:

1) уменьшенное количество сырья, необходимого для производства;

2) снижение потребности в энергоемких и загрязняющих производственных процессах. Предполагаемая экономия первичной энергии по сценарию быстрого внедрения может достигнуть 70-174 ПДж в 2050 году с совокупной экономией 1,2-2,8 ЭДж [3];

3) более эффективный и гибкий дизайн продукта с лучшими функциональными и эксплуатационными характеристиками;

4) сокращение совокупных выбросов парниковых газов от транспортировки оценивается в 92,8-217,4 млн.т [3];

5) децентрализованное производство, приближенное к точке потребления, упрощение логистики, транспортировки, хранения.

Ведущие производители автомобилей в настоящее время изготавливают компоненты двигателей, которые можно использовать в реальных условиях посредством АП; Управление по контролю за продуктами и лекарствами США утвердило легитимность устройств, изготовленных с помощью АП, для использования человеком; Международная космическая станция имеет машину АП для производства деталей и компонентов в космосе [4].

Хотя АП предлагает много важных преимуществ, существует несколько проблем, включая медленные темпы сборки, высокие производственные затраты на масштабирование, требования к постобработке, ограниченные объемы сборки и ассортимент материалов, плохие механические свойства и отсутствие отраслевых стандартов для испытаний и оценки [5].

Процессы АП существенно отличаются от традиционных способов изготовления продуктов, что приводит к тому, что детали имеют разные механические свойства по сравнению с твердыми деталями, и что традиционные процедуры испытаний не всегда адекватны для определения их механического поведения [6].

Для разработки стандартов в области АП в 2009 году был создан Комитет F42 по технологиям АП Американского общества по испытаниям и материалам (ASTM). Затем в 2011 году Международная организация по стандартизации ИСО (ISO) основала технический комитет ISO TC 261. Позже было разработано соглашение о партнерстве ASTM/ISO.

Одним из самых распространенных методов АП является Моделирование методом наплавления (ММН), в котором используется термопластичная полимерная нить, которая при нагревании до полужидкого состояния экструдируется на платформу или поверх ранее напечатанных слоев [7].

В данной работе представлены анализ нормативной базы в области АП и результаты испытаний некоторых механических показателей качества полимерных изделий, полученных посредством ММН.

Анализ нормативной базы в области аддитивного производства

Стандарты технологии АП определяют терминологию, измеряют производительность различных производственных процессов, обеспечивают качество конечных продуктов и определяют процедуры калибровки машин для АП [7]. Несколько основных стандартов, которые были созданы совсем недавно, приведены в таблице 1.

Полужирным шрифтом в таблице 1 выделены стандарты, в которых приведены ре-

комендации по определению механических свойств изделий АП.

ISO/ASTM 52900:2015 дает определения следующим терминам: аддитивное производство, аддитивная система, 3Д принтер и другие.

В ISO 17296-3:2014 излагаются основные требования, предъявляемые к испытаниям деталей, изготовленных в процессе АП.

Данный стандарт выделяет 3 вида деталей, в зависимости от требуемого уровня эксплуатационной безопасности, изготовленных с помощью АП, к которым прописаны обязательные и рекомендуемые группы испытаний. Основными характеристиками для испытания являются:

– требования к поверхности: внешний вид, текстура и цвет поверхности;
– геометрические требования: размер, длина и размерность углов, допуски на размеры и геометрические допуски (отклонения формы и положения);
– механические требования: твердость, прочность на растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, ударопрочность, сопротивление усталости, ползучесть, старение, коэффициент трения и распространение трещин;
– требования к производственным материалам: плотность и физические и физико-химические свойства [14].

Таблица 1 – Действующие нормативные документы в области АП

Код стандарта	Название стандарта	Краткое содержание
ISO 17296-2:2015	Аддитивное производство - Общие принципы - Часть 2: Обзор категорий процессов и сырья	описывает основы процесса АП; дает обзор существующих категорий процессов, которые не являются и не могут быть исчерпывающими; объясняет, как разные категории процессов используют разные типы материалов для формирования геометрии изделия; описывает, какой тип материала используется в различных категориях процесса [8]
ISO 17296-3:2014	**Аддитивное производство - Общие принципы - Часть 3: Основные характеристики и соответствующие методы испытаний**	**описывает основные требования, предъявляемые к испытаниям деталей, изготовленных в процессе АП; определяет основные качественные характеристики деталей и соответствующие процедуры испытаний; приводятся рекомендации по объему и содержанию соглашений об испытаниях и поставках** [9]
ISO 17296-4:2014	Аддитивное производство - Общие принципы - Часть 4: Обзор обработки данных	описывается формат файла, подходящий для обмена данными в АП [10]
ISO/ASTM 52900:2015	Аддитивное производство - Общие принципы - Терминология	устанавливает и определяет термины, используемые в технологии АП [11]
ISO/ASTM 52915:2016	Спецификация для формата файла аддитивного производства (AMF)	предоставляет спецификацию для формата файлов АП [12]
ISO/ASTM 52921:2013	**Стандартная терминология для аддитивного производства - Системы координат и методики испытаний**	**включает термины, определения терминов, описания терминов, номенклатуры и аббревиатур, связанных с системами координат и методологиями тестирования для технологий АП, в целях стандартизации терминологии, используемой пользователями АП** [13]

В таблице 2 приведен список рекомендуемых стандартов ISO 17296-3:2014 [14] для испытаний пластиковых материалов, которые предполагается определять для всех 3 видов деталей.

Таблица 2 – Рекомендуемые стандарты для определения некоторых механических свойств пластиковых материалов

Код стандарта	Название стандарта	Аналог межгосударственного стандарта	Степень соот-я
Прочность при растяжении			
ISO 527-1:2019	Пластмассы - Определение свойств при растяжении - Часть 1: Общие принципы	ГОСТ 34370-2017 (ISO 527-1:2012) Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1. Общие принципы (с Поправкой)	MOD
ISO 527-2:2012	Пластмассы - Определение свойств при растяжении - Часть 2: Условия испытаний для формования и экструзии пластмасс	ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение	MOD
ISO 527-3:2018	Пластмассы - Определение свойств при растяжении - Часть 3: Условия испытания пленок и листов	-	
ISO 527-4:1997	Пластмассы - Определение свойств при растяжении - Часть 4: Условия испытаний для изотропных и ортотропных пластиковых композитов, армированных волокном	ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение (с Поправками)	MOD
ISO 527-5:2009	Пластмассы - Определение свойств при растяжении - Часть 5: Условия испытания однонаправленных пластиковых композитов, армированных волокном	ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение (с Поправками)	MOD
Твердость			
ISO 868:2003	Пластмассы и эбонит - Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору)	ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003) Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору)	MOD
ISO 2039-2:1987	Пластмассы - Определение твердости - Часть 2: Твердость по Роквеллу	ГОСТ 24622-91 (ИСО 2039/2-87) Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу	IDT
Дополнительные стандарты			
ISO 291:2008	Пластмассы - Стандартные атмосферы для кондиционирования и испытаний	ГОСТ 12423-2013 (ISO 291:2008) Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)	MOD
ISO 2602:1980	Статистическая интерпретация результатов испытаний - Оценка среднего значения. Доверительный интервал	ГОСТ 14359-69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования (с Изменением N 1)	NEQ
ISO 16012:2015	Пластмассы - Определение линейных размеров образцов для испытаний	-	
ISO 20753:2018	Пластмассы - Образцы для испытаний	ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008) Пластмассы. Образцы для испытания	MOD
ISO 23529:2016	Резина - Общие процедуры приготовления и кондиционирования образцов для физических испытаний	ГОСТ ISO 23529-2013 Резина. Общие методы приготовления и кондиционирования образцов для определения физических свойств	IDT

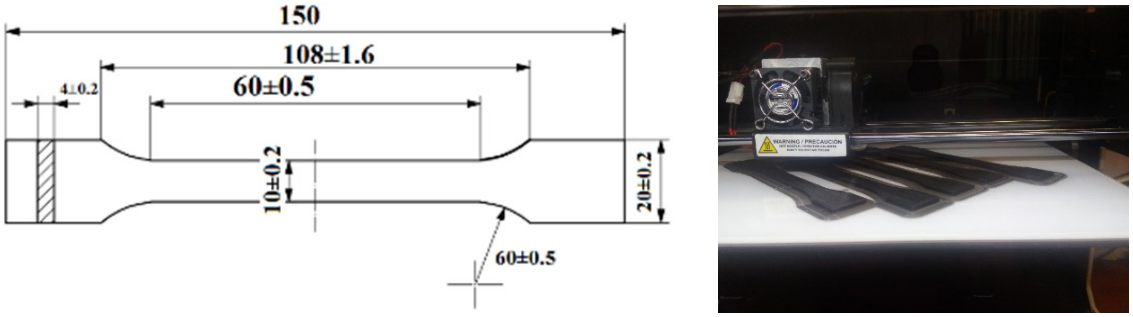

Рис. 1 – Чертеж и печать образцов

Согласно опросу, описанному в [15], в котором 22 центра и компаний, ответили на вопросы относительно различных аспектов АП, почти 50% опрошенных считают, что доступные в настоящее время стандарты не применимы, в то время как примерно 37% заявляют об удовлетворительности в определенной степени. Только 12% заявили, что существующие стандарты достаточны и надежны для АП.

Методы

На принтере Witbox2(BQ) было напечатано 65 из полилактидной нити (PLA) и 33 из полиэтиленгликольтерефталата (PETG) стандартных образцов (тип A2) (рисунок 1) в соответствии со стандартом ISO 20753 [16] с заполнением 100% и высотой слоя 0,2 мм. Ширина нити составляет 1,75 мм. Программное обеспечение Ultimaker Cura 4.1.0. (Ultimaker B.V.) использовалось для нарезки файлов в .STL формат в машиночитаемый g-код.

После печати образцы кондинсировались не менее 88 часов при температуре (23±2)°C и влажности (50±10)% для измерения размеров каждого образца в соответствии с ISO 16012 [17] (три раза для каждого измерения с использованием микрометра). Затем образцы были испытаны на твердость по Шору в соответствии со стандартом ISO 868 [18] и на прочность при растяжении в соответствии с серией стандартов ISO 527.

Испытания на прочность при растяжении проводились на универсальной испытательной машине серии Shimadzu AG-X с постоянной скоростью 2 мм/мин в стандартной атмосфере. Использовался экстензометр с номинальной длиной 50 мм.

Для испытания на твердость было отобрано по одному образцу из PLA с ориентацией рисунка 0/90 (PLA0/90) и 45/45 (PLA45/45). 1 образец из PETG с ориентацией рисунка 0 был также испытан на твердость по Шору. Измерения твердости были выполнены 5 раз в разных положениях на испытательном образце с помощью твердометра Hildebrand OS-2 типа D по Шору.

Результаты и обсуждения

Испытание на растяжение основано на растяжении образца вдоль его основной продольной оси до разрушения. Во время этой процедуры измеряется нагрузка, выдерживаемая образцами, и удлинение. В соответствии с ИСО 527-1 [19] системами измерения относительного удлинения могут являться экстензометры и/или тензодатчики. В данном испытании использовался экстензометр, который должен был обеспечивать измерение изменения расчетной длины образца в любой момент испытания [19]. Однако в ходе испытания образцы разрушались как в пределах экстензометра, так и за его пределами (рисунок 2). Этот факт сделал невозможным использование данных экстензометра для расчета предела прочности.

В таблице 3 приведено процентное соотношение случаев разрушения в экстензометре и за его пределами. Общее количество испытанных образцов PLA – 65 штук, PETG образцов - 33.

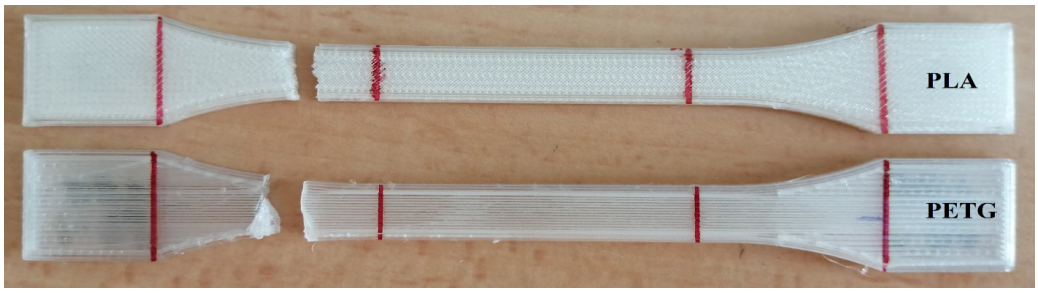

Рис. 2 – Образцы PLA и PETG после испытания на растяжение

Таблица 3 – Характер разрушения PLA и PETG образцов

PLA		PETG	
внутри экстензометра	за пределами экстензометра	внутри экстензометра	за пределами экстензометра
35%	65%	65%	35%

Анализ данных показывает, что образцы из PLA и PETG имеют разную статистику разрушения. Таже определение удлинений (относительных удлинений) экстензометрами для PETG образов становится бессмысленным из-за образования "шейки" после предела текучести. Следовательно, данный способ измерения относительного удлинения не всегда может быть применим для образцов, изготовленных ММН. В работе [20] отмечено, что это происходит из-за концентрации напряжений в радиусных углах, потому что слои ММН заканчиваются на таких переходах при печати для аппроксимации больших радиусов.

Также следует учитывать тот факт, что испытания, проведенные на образцах разных размеров или на образцах, изготовленных при разных условиях, могут давать несопоставимые результаты. Скорость испытания и условия кондиционирования образцов также могут повлиять на результаты. [19] Таким образом, условия должны быть прописаны в нормативных документах на вышеперечисленные материалы, которые испытывают. Однако, отсутствие международных стандартов на материалы, применяемые в ММН, приводит к тому, что каждый испытатель использует разные условия испытания, что нарушает принцип воспроизводимости и сопостовимости результатов.

Во время испытания твердости по Шору индентор вдавливается в испытываемый материал и измеряется глубина проникновения. Твердость вдавливания обратно пропорциональна проникновению и зависит от модуля упругости и вязкоупругих свойств материала. [18] Согласно примечанию к п.5.2 ISO 868:2003 число образцов и их толщину указывают в нормативном документе или технической документации на материал. Следовательно, из-за отсутствия нормативных документов на материалы ММН, принятых на международном уровне, экспериментатор выбирает эти параметры на основе личного опыта.

Так как в стандарте отсутствует информация о том, на какой поверхности проводить измерения после начального проникновения и через 15±1с, измерения проводились с двух сторон и результаты показаны в таблице 4.

По результатам измерения твердости по Шору, можно сделать вывод, что твердость по стороны экструзии для PLA и PETG образцов является ниже. Таким образом, указание в нормативном документе с какой стороны испытывать образцы, изготовленные с помощью ММН, является необходимостью для обеспечения сопоставимых и воспроизводимых результатов измерения.

Таблица 4 – Результаты испытания твердости по Шору

	PLA0/90				PLA45/45				PETG			
	Сторона печатного стола		Сторона экструзии		Сторона печатного стола		Сторона экструзии		Сторона печатного стола		Сторона экструзии	
Время	1''	15''	1''	15''	1''	15''	1''	15''	1''	15''	1''	15''
Твердость по Шору	83	78,3	75	68,4	84.8	75.3	79.5	71.7	79.7	73.3	75.7	69.3

Вывод

Несмотря на стремительный рост АП за последние 20 лет, одним из факторов, тормозящих более быстрое его развитие и повсеместное использование является недостаток нормативной базы, которая бы гарантировала участникам бизнес сообщества и производителям безопасность и надежность процессов, материалов и технологий АП [21].

Рынок функциональных деталей, изготовленных в АМ, достиг впечатляющих 29%, а инструментальных компонентов – 5.6%, с функциональными частями, которые присутствуют от аэрокосмической отрасли до стоматологии и медицины. Поскольку эти продукты часто выполняют критически важную функцию, существует растущая потребность в стандартах для удовлетворения требований во всех этих областях [21].

В настоящее время не существует стандартных и общепринятых методов определения прочности деталей ММН. Этот факт позволяет исследователям пользоваться определенной свободой в выборе геометрии исследуемого образца и способа приложения к нему нагрузки [22].

Однако, результаты испытаний показали, что использование стандартов на методы испытания, применяемые для традиционных методов изготовления деталей, не во всех аспектах удовлетворяют качеству результатов измерений. Таким образом требуются стандартизированные методы испытаний в АП, позволяющие связать свойства материала, параметры изготовления и конструкцию детали. А также сделать АП контролируемым и конкурентноспособным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т.К. 261 Аддитивное производство. ИСО/АСТМ 52900:2015 [АСТМ Ф2792] Аддитивное производство – Общие принципы – Терминология. – 1-я версия. - ИСО, 2015. – 19 с.
2. Ассоциация Вохлерс. 3Д Принтинг и Аддитивное производство. Состояние промышленности // Вохлерс Репорт, 2019.
3. Пенг Т., Келленс К., Танг Р., Чен Ц., Чен Г. Устойчивость аддитивного производства: обзор его потребности в энергии и воздействия на окружающую среду // Аддитивное производство. – 2018. – Т. 21. – № Апрель. – С. 694-704.
4. Тофаил С.А.М., Коумоулос Е.П., Бандёпадхяы А., Босе С., О'Доногхуе Л., Чаритидис Ц. Аддитивное производство: научные и технологические проблемы, освоение рынка и возможности // Материалы сегодня. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 22-37.
5. Зандер Н.Е., Гиллан М., Ламбетх Р.Х. Повторно используемый полиэтилентерефталат в качестве нового исходного материала ММН // Аддитивное производство. – 2018. – Т. 21. – № Март. – С. 174-182.
6. Родрíгуез-Панес А., Цлавер Й., Цамачо А.М., Себастиáн М.Á. Нормативный анализ и геометрическая оценка образцов для механического определения характеристик дета-

лей, полученных аддитивным производством с использованием ММН // Материалы XXII Национального конгресса машиностроителей. – 2018. – № Сентябрь. – С 1-11.
7. Гардан Й. Технологии аддитивного производства: состояние и тенденции // Справочник по аддитивному производству: разработка продукции для оборонной промышленности. – 2017. – Т. 7543.- № Ноябрь. – С. 149-168.
8. Т.К. 261 Аддитивное производство. ИСО 17296-2:2015 Аддитивное производство – Общие принципы – Часть 2: Обзор категорий процессов и сырья. – 1-я версия. - ИСО, 2015. – 8 с.
9. Т.К. 261 Аддитивное производство. ИСО 17296-3:2014 Аддитивное производство – Общие принципы – Часть 3: Основные характеристики и соответствующие методы испытаний. – 1-я версия. - ИСО, 2014. – 14 с.
10. Т.К. 261 Аддитивное производство. ИСО 17296-4:2014 Аддитивное производство – Общие принципы – Часть 4: Обзор обработки данных. – 1-я версия. - ИСО, 2014. – 7 с.
11. https://www.iso.org/standard/69669.html.
12. Т.К. 261 Аддитивное производство. ИСО/АСТМ 52915:2016 Спецификация для формата файлов аддитивного производства. – 2-я версия. - ИСО, 2016. – 26с.
13. https://www.iso.org/standard/62794.html.
14. https://www.iso.org/search.html?q=17296-3:2014
15. Монзóн М.Д., Ортега З., Мартíнез А., и Ортега Ф. Стандартизация в аддитивном производстве: деятельность международных организаций и проектов // Международный журнал передовых технологий производства. – 2014. – Т. 76. – № 5-8. – С. 1111-1121.
16. Т.К. ИСО/ТЦ 61/СЦ 2 Механическое поведение. ИСО 20753:2008 Пластмассы – Образцы для испытаний. – 1-я версия. - ИСО, 2008. – 15 с.
17. Т.К. ИСО/ТЦ 61/СЦ 2 Механическое поведение. ИСО 16012:2015 Пластмассы - Определение линейных размеров образцов для испытаний. – 2-я версия. - ИСО, 2015. – 9 с.
18. Т.К. ИСО/ТЦ 61/СЦ 2 Механическое поведение. ИСО 868:2003 Пластмассы и эбонит - Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору). – 3-я версия. - ИСО, 2003. – 5 с.
19. Т.К. ИСО/ТЦ 61/СЦ 2 Механическое поведение. ИСО 527-1:2019 Пластмассы - Определение свойств при растяжении - Часть 1: Общие принципы. – ИСО, 2019. – 26 с.
20. Ахн С.Х., Монтеро М., Оделл Д., Роунды С., и Щригхт П. К. Анизотропные свойства материала плавленого осаждения с моделированием АБС // Журнал быстрого прототипирования. – 2002. – Т. 8. – № 4. – С. 248-257.
21. https://www.iso.org/news/2015/05/Ref1956.html
22. Кузнетцов В.Е., Солонин А.Н., Тавитов А., Уржумцев О., и Вакулик А. Повышение прочности МНН трехмерных печатных деталей за счет влияния на температурные параметры процесса // Журнал быстрого прототипирования. – 2020. – Т. 26. – № 1. – С. 107–121.