

УДК 678.8

С.В. Кондрашов¹, А.А. Пыхтин¹, С.А. Ларионов¹, А.Е. Сорокин¹

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ FDM-ПЕЧАТИ И СОСТАВА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ FDM-МОДЕЛЕЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49

В работе проведен анализ научно-технической литературы в области влияния технологических режимов на физико-механические свойства образцов, полученных способом FDM-печати. Показано, что прочностные характеристики деталей, изготовленных с использованием оптимальных параметров печати, вплотную приближаются к свойствам изделий, полученных способом литья под давлением.

Выявлены принципиальные подходы для получения образцов с теплостойкостью более 200°C и прочностью более 100 МПа. Определен круг исследовательских задач, которые необходимо решить для перехода от прототипирования к изготовлению реальных деталей, конкретных устройств и конструкций.

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM-печать, физико-механические свойства, технологический режим, материалы для FDM-печати.

S.V. Kondrashov¹, A.A. Pykhtin¹, S.A. Larionov¹, A.E. Sorokin¹

INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL FDM-MODES OF THE PRESS AND STRUCTURE OF USED MATERIALS ON PHYSIC-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FDM-MODELS (review)

In work the analysis of scientific and technical literature in the field of influence of technological modes on physic-mechanical properties of the samples received in the way of the FDM press is carried out. It is shown that strength characteristics of the details made with use of optimum parameters of the press, closely come nearer to properties of the products received in the way of pressure casting.

Basic approaches for receiving samples with thermal stability more than 200°C and with the durability more than 100 MPa are revealed. The circle of research tasks which need to be solved for transition from prototyping to manufacturing of real details, specific devices and designs is defined.

Keywords: additive technologies, FDM-printing, physicomachanical properties, the technological mode, materials for FDM-printing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Полимерные материалы широко применяются в различных отраслях машиностроения, в том числе в авиационной, космической технике, автомобиле- и судостроении, атомной энергетике и медицине, благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных и технологических свойств [1–4], возможности придания им различных функциональных свойств [5–7].

В настоящее время при производстве новых изделий в авиастроении, машино- и приборостроении наряду с традиционными методами переработки термопластов, такими как литье под давлением и экструзия, быстрыми темпами развиваются аддитивные технологии (АТ) переработки, обеспечивающие сокращение продолжительности технологической подготовки производства [9–12].

Согласно аналитическим исследованиям, темпы роста полимерного рынка АТ за последние 25 лет составили в среднем 25% в год и ожидается, что к 2020 г. он достигнет объема в 9–10 млрд долл. США. С увеличением объема рынка значительно возросло количество охраняемых документов в полимерной области АТ. За 30 лет количество подаваемых заявок на изобретения увеличилось с 5–10 до 300–350 в год. Такое стремительное развитие АТ в области полимерных материалов свидетельствует об их актуальности и активном внедрении в современные промышленные процессы производства.

В основном полимерные материалы для АТ используются для изготовления прототипов, оснасток и демонстрационных моделей, ненагруженных и мало нагруженных изделий, в меньшей степени – для формования конечных изделий. В 2012 г. доля конечных изделий из пластмасс, произведенных с помощью АТ, составила 28%. Однако по прогнозам этот показатель к 2020 г. должен достигнуть 80%.

Наиболее интенсивно полимерные изделия, изготовленные методами АТ, внедряются в аэрокосмической промышленности, автомобиле- и судостроении. Причем для изделий этих высокотехнологичных отраслей промышленности используют в основном конструкционные, высокопрочные и теплостойкие фотополимеризуемые композиции, полимерные материалы типа полиэфирэфиркетона, полиэфиримида, а также материалы на основе ABS-пластика и полиамида ПА-12 в модифицированном и немодифицированном состояниях. Например, компании Boeing, Douglas Aircraft Company, Lockheed Martin, Airbus S.A.S. (EADS) и Northrop Grumman, Bell Helicopter, NASA, GE Aviation начали внедрять АТ с 1990-х гг. В настоящее время АТ активно применяются для изготовления деталей военных (F/A-18 Hornet) и пассажирских самолетов (Boeing 737 Scalemodel, Boeing 787 Dreamliner, Airbus A350), вертолетов (MV-22 Osprey, Bell Model 412), а также многих беспилотных летательных аппаратов (N+3, SULSA): воздуховодов, печатных плат, антенн, сенсоров, кабель-каналов, обтекателей ИК-камер, конструкций кресел и внутренней отделки пассажирских салонов, топливных баков, деталей турбовинтовых двигателей. Компании Mercedes-Benz, BMW, Audi AG, Lamborghini, Kingston University, Bentley Motors используют АТ для изготовления спойлеров, спойлеров, деталей освещения, приборных панелей, элементов внутренней отделки, манжет омывателей фар, деталей контура охлаждения тормозной системы, бензобаков, элементов двигателей внутреннего сгорания. NASA использовало АТ для создания деталей марсохода Rover и направляющих лопаток компрессора в прототипе полностью неметаллического ГТД. Немецкая компания Hense Yachts AG применяет аддитивные технологии для создания корпусов парусных яхт и лодок. Компании RAMLAB, DAMEN Shipyards Group, Autodesk, Promarin совместно разработали и изготовили из полимерных композиционных материалов (ПКМ) методом 3D-печати гребной винт Waampeller диаметром 1,3 м и массой 180 кг, установленный на портовом буксире в г. Роттердам. Аналогичные работы по созданию винтовых установок ведутся в российской компании «Пульсар».

Одним из наиболее распространенных методов аддитивной переработки термопластичных материалов является послойная укладка расплавленной полимерной нити (fused deposition modeling – FDM) [11–13]. Схема процесса FDM приведена на рис. 1.

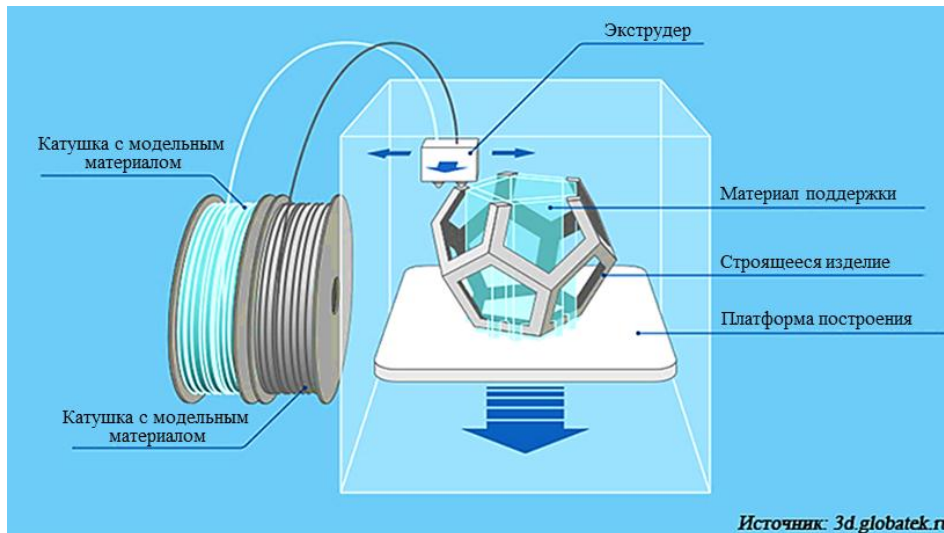


Рис. 1. Схема процесса послойной укладки расплавленной полимерной нити (FDM)

Этот метод основан на том, что термопластичная полимерная нить (филамент (filament)) подается в экструзионную головку 3D-принтера, в которой нагревается до вязкотекучего состояния и выдавливается через сопло диаметром 0,1–0,3 мм по заданной траектории на неподвижное основание. Последующие слои укладываются на предыдущие и затвердевают по мере охлаждения. При этом послойную ориентацию укладки расплавленной полимерной нити (нить расплава (raster)) можно изменять в соответствии с выбранным алгоритмом, регулируя анизотропию свойств в конечном изделии или прототипе.

Благодаря низкой стоимости и высокому уровню функциональных возможностей FDM-принтеры и расходные материалы для них в настоящее время являются наиболее востребованными на рынке аддитивных технологий.

На рис. 2 приведена динамика публикационной активности (учтены работы, индексируемые в базах данных Web of Science и Scopus) в области исследований, связанных с развитием FDM-технологий.

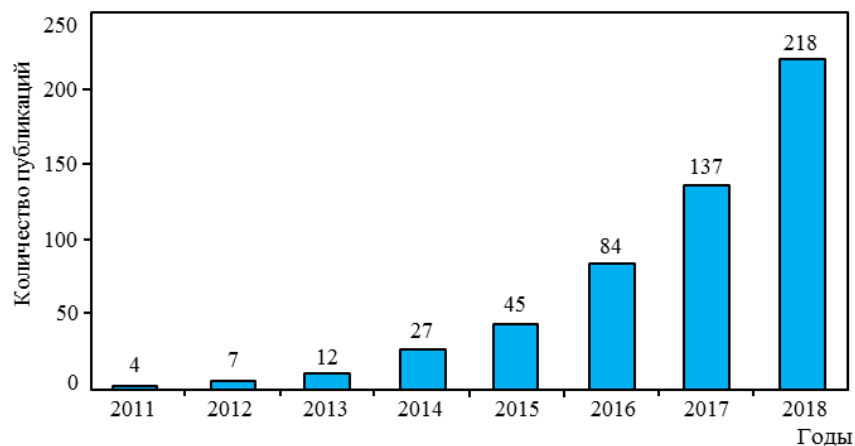


Рис. 2. Публикационная активность в области развития FDM-технологий

Резкое увеличение количества публикаций в 2015–2016 гг., вероятно, связано с осознанием того факта, что уникальные возможности FDM-технологии позволяют решать широкий круг задач – от изготовления реальных деталей с высоким уровнем

физико-механических и термомеханических свойств до получения адаптивных материалов, изменяющих свои характеристики при управляющем воздействии естественного или искусственного происхождения.

Целью данной работы является обзор исследований, посвященных влиянию технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики напечатанных прототипов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов

на физико-механические характеристики напечатанных прототипов

Вероятно, первой работой, в которой был поставлен вопрос о влиянии технологических параметров FDM-печати на физико-механические характеристики образцов, является работа [14], авторы которой исследовали влияние ориентации нитей расплава и расстояния между ними на прочность образцов при растяжении.

В табл. 1 приведены данные ряда авторов о влиянии ориентации нити расплава на прочность образцов при растяжении, полученных способом FDM-печати, из АБС-пластика различных модификаций.

Таблица 1

Влияние ориентации нити расплава на прочность образцов из АБС-пластика

Материал	Настройки принтера	Прочность при растяжении/модуль упругости, МПа, при ориентации				Литературный источник
		[0]	[45]	[90]	[±45]	
АБС-пластик, минеральное масло, воск	Заводские	25,5/987	15,6/741	14,35/738	18,9/768	[15]
АБС-пластик марки Р 400	-<<	24,18/1486	9,4/1042	8,55/1041	15,3/1282	[16]
	-<<	20,6	7,1	9,3	13,7	[17, 18]
	Параметр <i>air gap</i> 0	21,5	–	12,7	16,5	[19]
	Параметр <i>air gap</i> -0,05 мм	19,2	–	2,5	13,4	[19]

Видно, что максимальная прочность достигается при совпадении направлений оси нити расплава и действующего напряжения. В этом случае для образцов, изготовленных из АБС-пластика марки Р400, величина прочности составляет 20–24 МПа, что на 22–32% меньше, чем прочность единичной нити расплава (31,2 МПа) [20]. Использование ориентаций нити расплава [45] и [90] приводит к снижению прочности на 40–60%. Более выгодно использовать ориентации [+45/-45] или [0/90], в этом случае уменьшение прочности составляет 15–25%. Кроме того, такие ориентации более выгодны с точки зрения достижения более высокой ударной вязкости [21].

Обращает также на себя внимание то, что для образцов из АБС-пластика с пластифицирующими добавками [15] ориентационный эффект оказывает на прочность более слабое влияние, чем для АБС-пластика марки Р400 [16], который обладает более высоким модулем упругости.

Описанные результаты легко объяснить тем, что при ориентациях, отличающихся от [0], существенный вклад в прочностные характеристики вносит связь между нитями расплава [22]. В работе [23] показано, что формирование контакта между дорожками происходит в ходе остывания расплава, а сила связи между ними определяется

диффузией макромолекул при остывании «горячей» зоны (рис. 3). Это приводит в частности к тому, что температура в рабочей камере влияет на прочностные характеристики детали существенно больше, чем степень нагрева печатающей головки.

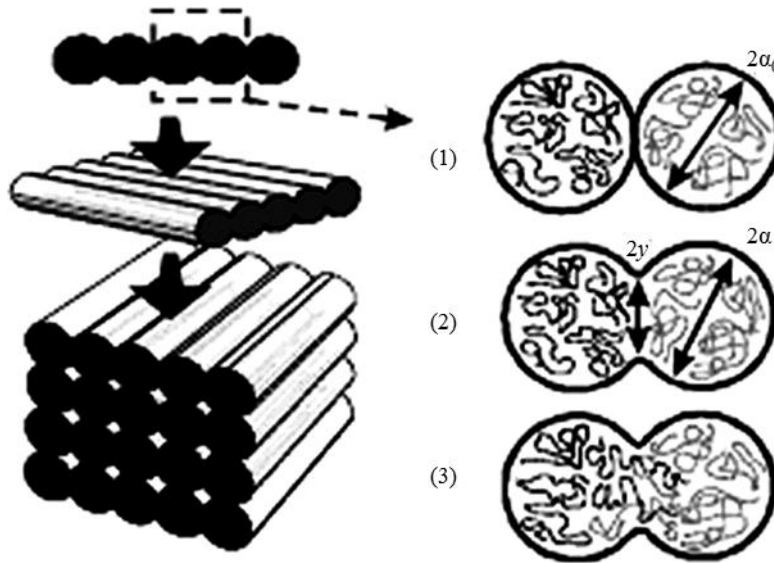


Рис. 3. Формирование контакта между филаментами, по данным авторов работы [19]

На связь между нитями расплава влияет также расстояние между ними. В работе [19] показано, что минимальная площадь контакта между нитями расплава при настройке FDM-принтера с параметром *air gap* 0, которая практически не оказывает влияния на прочностные характеристики при ориентации [0], приводит к уменьшению прочности до 8,55 МПа при ориентации [90]. Данный эффект может быть существенно снижен при настройке параметра *air gap* 0, которая обеспечивает частичное перекрывание нитей расплава (табл. 1).

Существенное влияние данного параметра на прочность образца подчеркивали также авторы работы [24]. Как видно из данных, приведенных в этой работе (табл. 2, рис. 4), частичное перекрывание нитей расплава, которому соответствует знак «-» в настройке параметра *air gap*, приводит почти к пятикратному возрастанию прочности по сравнению со случаем, когда нити расплава разделены в пространстве. При этом увеличение ширины нити приводит к тому, что соотношение между прочностями образцов, полученных при разной ширине щели, уменьшается.

Таблица 2

Влияние настроек принтера на прочность при растяжении АБС-пластика

Ширина нити, мм	Настройка параметра <i>air gap</i> , мм	Прочность при растяжении, МПа
0,2032	-0,00254	32,56
0,2032	0,5588	6,52
0,5588	-0,00254	24,81
0,5588	0,5588	10,44

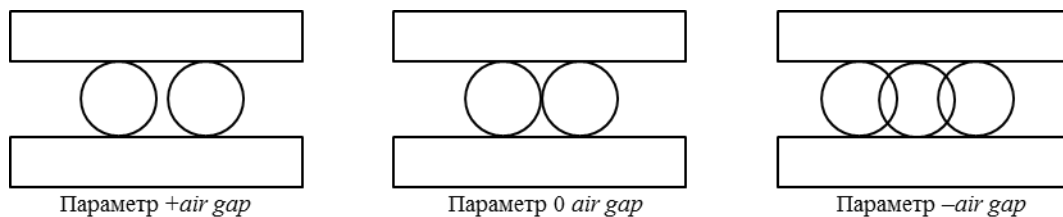


Рис. 4. Расположение нитей расплава при различной настройке параметра *air gap* [24]

На величину расстояния между нитями расплава оказывает влияние толщина слоя печати. В работе [25] установлено, что увеличение толщины слоя печати с 0,2 до 0,4 мм приводит к уменьшению прочности при растяжении на 16–20%. Наблюдаемый эффект авторы работы [25] связали с увеличением объема не заполненного полимерной матрицей пространства с 0,3 до 5,26% (рис. 5).

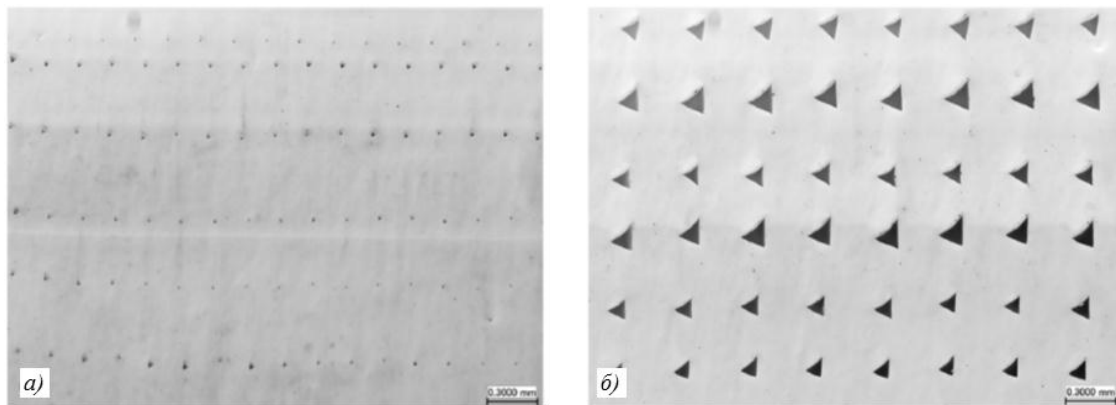


Рис. 5. Поперечное сечение образцов с высотой слоя печати 0,2 (а) и 0,4 мм (б)

Авторы работы [26] предложили для уменьшения расстояния между нитями расплава использовать микросферы, расширяющиеся в ходе последующей тепловой обработки, что приводит к увеличению прочности при сжатии напечатанной детали более чем на 50%.

Одна из возможностей уменьшения эффекта влияния ориентации на физико-механические характеристики детали заключается в изменении схемы печати. В работе [27] показано, что прочность и деформационные характеристики образца, изготовленного способом FDM-печати, зависят от толщины контура, проложенного по периметру детали (рис. 6). Видно, что изменение количества филаментов в контуре с 1 до 10 приводит к увеличению прочности с 23,3 до 29,8 МПа (24,3%), модуля упругости – с 1812 до 2117 МПа (16,8%). Относительное удлинение с ростом толщины вначале увеличивается и достигает 8,7%, а при дальнейшем увеличении уменьшается до 2,3%. Причиной наблюдаемого эффекта, по мнению авторов работы [27], является возникновение сжимающих термоупругих напряжений при остывании частично ориентированного расплава. Отсутствие контура, по данным авторов работы [28], приводит к уменьшению прочности при прочих равных условиях на 20%.

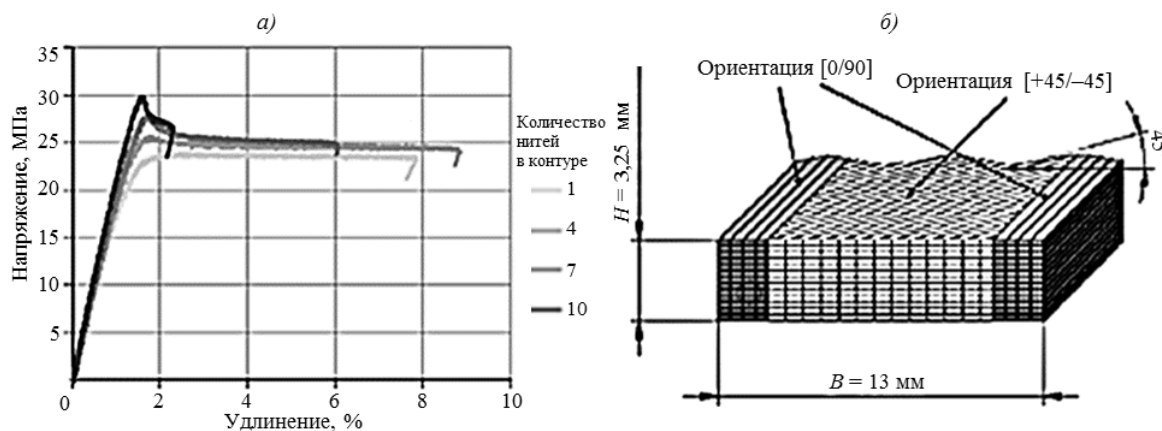


Рис. 6. Влияние толщины контура на физико-механические характеристики образца (а) и сечение образца (б)

Помимо ориентации нити расплава относительно оси приложения нагрузки существенное влияние на физико-механические характеристики деталей, изготовленных способом FDM-печати, оказывает ориентация плоскости построения детали относительно геометрических осей образца (рис. 7).

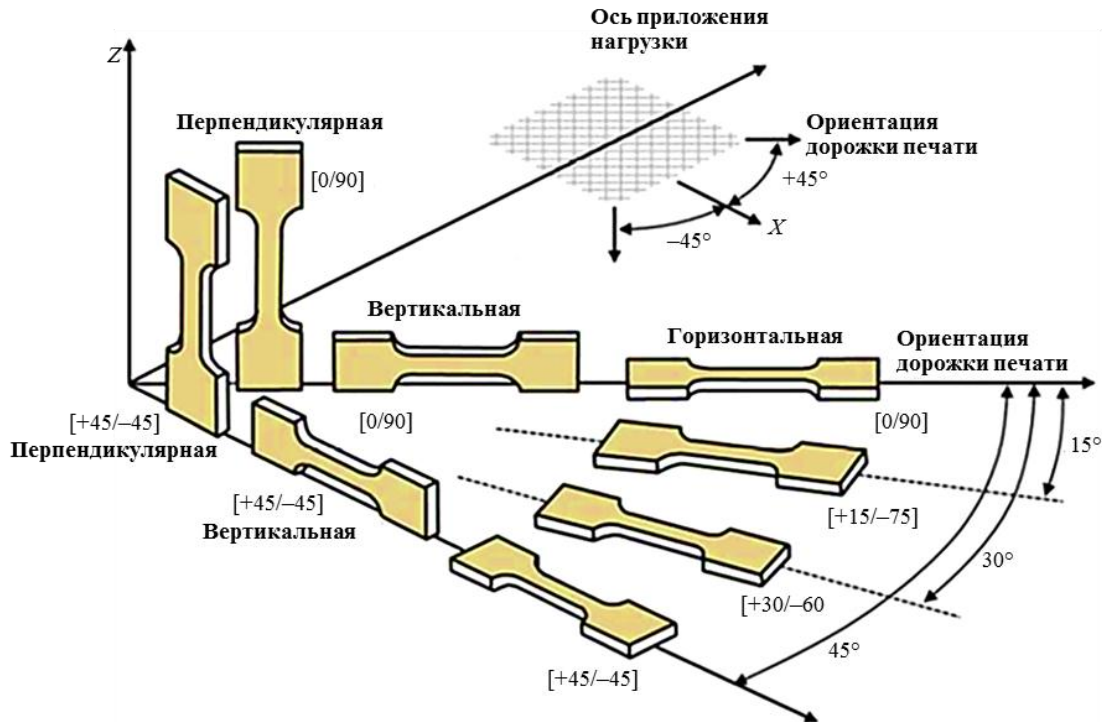


Рис. 7. Ориентация плоскости построения образца и направления укладки нити расплава [29]

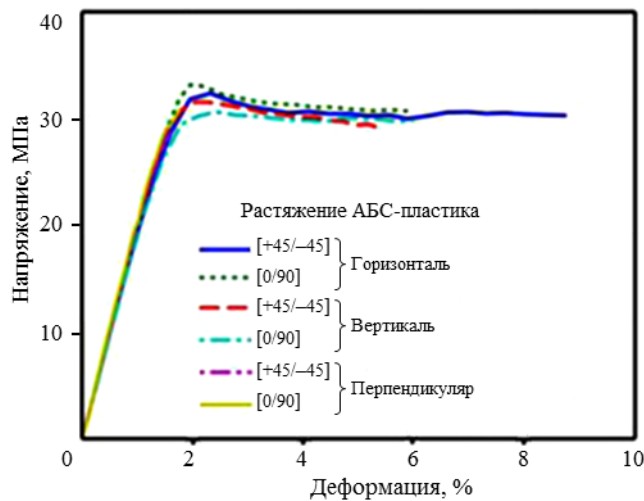


Рис. 8. Влияние ориентации плоскости построения на диаграммы «напряжение–деформация» для образцов АБС-пластика

В работе [29] исследовано влияние на прочность при растяжении ориентации плоскости построения детали относительно геометрических осей образца (рис. 8). Видно, что величины пределов прочности при разрыве для образцов АБС-пластика, указанных ориентаций, практически совпадают, однако разрывная деформация образцов существенно различается. Так, максимальная величина относительной деформации (ϵ)

для АБС-пластика достигается при ориентации [горизонталь, +45/-45] и составляет 8,5%. Изменение ориентации на [перпендикуляр, +45/-45] приводит к уменьшению величины ϵ до 1,7%. Аналогичная зависимость наблюдается и для поликарбоната. По мнению авторов цитируемой работы, уменьшение деформационной способности образцов связано с наличием внутренних напряжений, различающихся по направлению действия и локализации.

Изменение эпюры термоупругих напряжений при изменении ориентации «горизонталь–вертикаль–перпендикуляр», по данным авторов работ [30, 31], приводит к уменьшению ударной вязкости образцов АБС-пластика в ряду 28,8–17,7–0,6 кДж/м² соответственно. При этом при переходе «горизонталь–перпендикуляр» изменяется механизм разрушения – от вязкоупругого к хрупкому. В работе [32] установлено, что изменение ориентации приводит не только к изменению физико-механических характеристик, но и к изменению величины коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР). При изменении ориентации «горизонталь–перпендикуляр», величина КЛТР увеличивается с $4,7 \cdot 10^{-5}$ до $7,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Как видно из приведенных данных, прочностные характеристики образцов, изготовленных способом FDM-печати, зависят от ориентации нитей расплава и расстояния между ними в объеме образца. В свою очередь, расстояние между нитями расплава определяется соотношением между высотой слоя печати, шириной нити и диаметром сопла. Это обстоятельство определило интерес исследователей к оптимизации технологических параметров печати [24, 33–35]. При этом объектами для этого являлись не только физико-механические характеристики образцов, но и функциональные свойства изделий. Например, авторы работы [35] установили, что величина вклада параметров печати в упругие свойства катапульты (профилированная пластина из АБС-пластика) при прочих равных условиях составляет: ширина щели 34,52%, ориентация 31,7%, ширина дорожки 5,2%, толщина слоя печати 27,14%.

Оптимизировав схему и параметры печати, авторы работ [33, 34], используя материал АБС-пластик марки P430, получили образцы с прочностью 32–35 МПа с модулем упругости 2–2,25 ГПа вне зависимости от ориентации оси дорожки печати относительно направления приложения нагрузки при растяжении. Следует отметить, что полученные характеристики вплотную приближаются к свойствам материала, полученного способом литья под давлением [36].

Принтеры для FDM-печати позволяют изменять не только параметры печати, данные о которых приведены ранее, но и тип заполнения внутриконтурного пространства. Так, авторы работы [37] установили, что использование внутриконтурного заполнения в виде шестиугольных сот позволяет получить 15%-ный выигрыш по прочности (по сравнению с прямоугольными или ромбовидными сотами) при плотности заполнения 50%. Однако при плотности заполнения 100% разница в прочности для различных типов заполнения нивелируется. В работах [37, 38] отмечен нелинейный характер уменьшения прочности при уменьшении степени заполнения внутриконтурного пространства, что позволяет существенно снизить стоимость материалов и продолжительность изготовления образцов.

Не смотря на то что в настоящее время коммерчески доступна широкая линейка материалов для FDM-принтеров (АБС-пластик, поликарбонат, полиамид, полистирол (Hips), полиэтилентерефталат (T-Glass)) [39–42], ассортимент таких материалов постоянно расширяется. С целью увеличения физико-механических характеристик и теплоустойчивости используют: полиэфиримид [43–45], полифениленсульфид [46], полифениленсульфон [47, 48], полиэфирэфиркетон [49, 50], жидкокристаллический ароматический полиэфир [51].

Полиэфиримид обладает высоким уровнем прочностных и термомеханических свойств, не поддерживает горения. В работе [44] показано, что использование FDM-технологий позволяет получить материал с прочностью при растяжении 107 МПа, что лишь на 7% меньше, чем у образцов, которые получены литьевым способом. При этом величина модуля упругости составляет 2492 МПа, а температура стеклования 217°C. Меньшие значения механической прочности получены авторами работы [45], которые использовали в качестве исходного материала ULTEM 9085 (прочность при растяжении 89 МПа, разрывная деформация 1,5%).

В работе [46] установлено, что степень кристалличности полифениленсульфида зависит от технологических параметров процесса FDM-печати и может быть управляемым способом изменена с 20 до 48%.

Выбор оптимальных параметров технологического процесса позволил авторам работ [47, 48] получить образцы полифениленсульфона, характеристики которых (прочность при растяжении 64,5 МПа, модуль упругости 1725 МПа) практически совпадают с характеристиками материала, полученного способом литья под давлением.

Образцы полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), полученные в работе [49], имеют разрывное напряжение 98,9 МПа, модуль упругости 3980 МПа, температуру стеклования 144°C, что практически не отличается от характеристик литьевого ПЭЭК [52]. Отмечено также, что структура ПЭЭК, полученная при переработке методом аддитивных технологий, отличается от структуры литьевого полиэфирэфиркетона.

Использование FDM-технологий позволило авторам работы [51] получить уникальный материал на основе полимерных жидких кристаллов. Филамент представляет собой структуру «ядро–оболочка», где наружные слои – это высокоориентированный полимерный жидкий кристалл. Внутри этой оболочки степень ориентации уменьшается. После отжига, который обеспечивает образование сетки поперечных химических связей, предел прочности и модуль упругости составляют соответственно 350 и 18000 МПа.

Естественно, что для переработки терmostойких полимеров необходимо использовать более технологичное оборудование, которое обеспечивает высокую температуру нагрева сопла, рабочего стола и зоны печати. Снижение требований к характеристикам оборудования может быть достигнуто путем использования для FDM-печати материалов, содержащих термореактивные полимерные матрицы – например, эпоксидную смолу [53]. С использованием термообработки при температуре 100°C после печати (температура сопла 50°C) в работе получены образцы с модулем упругости при изгибе 4 ГПа и пределом прочности на изгиб 142 МПа.

Интенсивно ведутся исследования по введению в матрицу микро- и наночастиц для придания изделиям, полученным способом FDM-печати, функциональных свойств. Введение в матрицу сажи [54] или углеродных нанотрубок [55] позволяет придать материалам электропроводность, что может быть использовано для изготовления резистивных датчиков нагрузки и деформации. Введение в матрицу нитрида бора [56] позволяет регулировать теплопроводность АБС-пластика. Добавки наноглины оказывают влияние на качество поверхности и физико-механические свойства напечатанных деталей [57, 58]. Использование двуматричных периодических структур, содержащих углеродные нанотрубки и наночастицы керамики [59], а также образцов с внутренней полостью [60] позволяет управляемым образом регулировать действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости. Добавки оксида графена [61] и микрочастиц оксида циркония [62] позволяют в достаточно широких пределах регулировать свойства материала. Перлитовое волокно, введенное в полипропилен, снижает усадку и коробление деталей [63].

Наиболее естественный способ увеличить прочностные характеристики материала – армирование дискретными или непрерывными волокнами. В табл. 3 приведены результаты ряда работ, авторы которых проводили армирование с использованием дискретных углеродных волокон, введенных в матрицу на этапе изготовления филамента.

Таблица 3

**Физико-механические характеристики АБС-пластиков,
армированных дискретными углеродными волокнами**

Состав	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, МПа	Удлинение, %	Ориентация	Литературный источник
АБС-пластик+углеволокно (13% (по массе))+ пластификатор (9% (по массе))+ компатибилизатор (0,9% (по массе))	52,4	–	–	[0]	[64]
	8,81			[90]	
АБС-пластик+пластификатор (9% (по массе))	25,4	–	–	[0]	
	12,25			[90]	
АБС-пластик+УНВ* (10% (по массе))	37,4	790	–	–	[65]
АБС-пластик	26,9	500	–	–	
АБС-пластик +7,5% УВ*	42	2600	4	–	[66]
АБС-пластик P-430	34,2	2000	3	–	

* УНВ – углеродное нановолокно, УВ – углеродное волокно.

Как видно из данных, полученных автором работы [64], использованный прием позволяет в 2 раза увеличить прочность в продольном направлении, однако при ориентации [90] прочность незначительно уменьшается по сравнению с исходной матрицей, что, вероятно, связано с влиянием армирующих добавок на формирование контакта между дорожками печати. Вероятно, отсутствие компатибилизатора, который обеспечивает равномерное распределение волокон по объему матрицы, приводит к увеличению прочности лишь на 30% [66]. К аналогичному по величине приросту прочности приводит замена дискретных волокон на нановолокна [65].

Необходимо отметить, что рост значений прочности и модуля упругости наполненных углеродным волокном матриц приводит к существенному снижению деформации при разрыве – с 80 до 33%, по данным работ [65, 66]. Показано также, что увеличение длины волокна приводит к еще большему уменьшению удлинения без существенного увеличения прочности. Однако несмотря на это, устойчивость наполненных образцов к распространению трещины возрастает. Так, по данным авторов работы [67], коэффициент трещиностойкости при наполнении полилактида 5% (по массе) углеродных волокон увеличивается на 38–42%, что связано с изменением направления распространения трещины при ее взаимодействии с волокном, ориентированным в процессе FDM-печати [68]. Еще большее увеличение коэффициента трещиностойкости (120%) наблюдали авторы работы [69] для полиамида, наполненного 15% (по массе) рубленного углеродного волокна.

В работах [66, 70, 71] показано, что влияние технологических параметров (ориентация и толщина дорожек печати, температура сопла) режима FDM-печати пластиков, армированных рубленным волокном, на их физико-механические свойства коррелирует с зависимостями, которые наблюдали для ненаполненных матриц. Пористость образца по мере роста концентрации армирующего наполнителя вначале уменьшается (уменьшаются пустоты между дорожками печати), а затем увеличивается за счет образования пор на границе раздела фаз «волокно–матрица» [68].

Одним из наиболее перспективных направлений исследований в области FDM-печати является разработка технологии получения термопластичных материалов, армированных непрерывным волокном [72–74].

Ряд результатов, полученных в настоящее время, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические характеристики пластиков, армированных непрерывными углеродными волокнами

Состав	Прочность	Модуль упругости	Удлинение	Концентрация	Литературный источник
	МПа		% (объемн.)		
Полилактид+арамидное волокно	203 (растяжение)	9340	3,3	9,5	[75]
Полиамид+арамидное волокно	82 (растяжение)	9001	1	10,1	[76]
Полилактид+углеволокно	335 (изгиб)	30000 (изгиб)	–	27,5	[77]
Полилактид+углеволокно в исходном состоянии	80 (растяжение), 59 (изгиб)	–	–	–	[78]
в обработанном состоянии	91 (растяжение), 156 (изгиб)	–	–	34	

Как видно из приведенных данных, армирование непрерывным жгутом из нитей многократно повышает прочность полимерной матрицы, в сравнении с неармированными образцами и образцами, армированными дискретными волокнами. Крайне полезным оказывается предварительное аппретирование жгута для увеличения его взаимодействия с матрицей. По данным авторов работы [77], обработка волокна в растворе полилактида увеличивает пределы прочности при растяжении и изгибе на 12 и 164% соответственно.

Обращает на себя внимание существенное (более чем в два раза) различие в значениях прочности армированного углеволокном полилактида, полученное авторами работ [77] и [78]. Вероятной причиной этого различия, по мнению авторов работы [79], является разница в выбранной схеме введения волокна в печатающую головку.

Одним из принтеров, которые в настоящее время широко используют для изготовления пластиков, армированных непрерывной нитью, является принтер фирмы MarkOne. В табл. 5 приведены физико-механические характеристики образцов нейлона и полилактида, армированных кевларом и углеродным волокном [80].

Таблица 5

Сравнительные характеристики исходных и армированных образцов, полученных способом FDM-печати, и алюминиевых сплавов

Материал	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Доля волокна, % (объемн.)	Плотность, г/см ³
Армированный нейлон+ углеволокно [0]	254±8	21,72	14,1	1,279
Армированный полилактид+кевлар [0]	150±2	8,5	16,4	1,241
Нейлон	22,85±1,1	0,9	–	0,79
Полилактид	48±2,1	2,189	–	1,235
Алюминий марки 6061-T6	276	68,9	–	2,7
Алюминий марки 6063-T6	214	68,9	–	2,7

Как видно из приведенных данных, армированные пластики, полученные с использованием FDM-технологий, по своим прочностным характеристикам вплотную приблизились к алюминиевым сплавам при практически в 2 раза меньшей плотности. Анализ этих данных демонстрирует большой потенциал использования FDM-печати для изготовления конструкций, в том числе для авиакосмической техники.

Заключения

На основании представленных материалов можно сделать следующие выводы.

Подробно исследовано влияние технологических режимов на физико-механические свойства образцов, полученных способом FDM-печати. Прочностные характеристики деталей, изготовленных с использованием оптимальных параметров печати, вплотную приближаются к свойствам изделий, полученных способом литья под давлением.

Показан принципиальный подход для получения образцов на основе частично кристаллических полимеров с теплостойкостью $>200^{\circ}\text{C}$ и прочностью ~ 100 МПа.

Технология FDM-печати дает уникальную возможность получить детали сложной формы из полимерных матриц, армированных непрерывным волокном. Разработанные современные промышленные принтеры для печати изделий по данной технологии позволяют изготавливать образцы с прочностными характеристиками, близкими к характеристикам алюминиевых сплавов, при этом их весовые характеристики оказываются в 2 раза меньше.

Проведенные исследования позволяют перейти от прототипирования, которое являлось основной целью разработки FDM-принтеров, к изготовлению реальных деталей, конкретных устройств и конструкций.

Однако для достижения этой цели необходимо решить ряд исследовательских задач:

- исследование влияния состава полимерной матрицы и технологических режимов FDM-печати на усадку, коробление деталей и качество их поверхности;
- выбор алгоритма построения каждой конкретной детали должен быть основан на экспериментальных и теоретических исследованиях зависимостей внутренних напряжений от технологических параметров процесса;
- разработка и исследование способов уменьшения пористости армированных полимерных матриц и увеличения силы взаимодействия между нитями расплава;
- совершенствование конструкции FDM-принтеров, позволяющих армировать полимерную матрицу непрерывным волокном;
- исследования в области регулирования функциональных свойств (электропроводность, теплопроводность, старение и т. д.) деталей, полученных способом FDM-печати.

Работа поддержана грантом РФФИ №18-29-03253.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н. и др. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице// Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. №10. С. 61–71.
3. Каблов Е.Н., Яковлев Н.О., Харитонов Г.М., Мекалина И.В. Особенности релаксационного поведения полимерных стекол на основе полиметилметакрилата и их учет при прочностном расчете авиационного остекления // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №9. С. 2–9.

4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информац. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Платонов М.М., Перфилова Д.Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
7. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
8. Бузник В.М. Сверхгидрофобные материалы на основе фторполимеров // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 29–34.
9. Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67. P. 1191–1203. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5.
10. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: a critical review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 83. P. 389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
11. Платонов М.М., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Барботько С.Л. Оптимизация состава полимерной композиции с пониженной пожарной опасностью на основе поликарбоната для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // *Известия вузов. Сер.: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. №1. С. 87–94.
12. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Сорокин А.Е., Сапего Ю.А. Современные способы переработки термопластов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2017. №11 (59). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-7-7.
13. Hill N., Haghgi M. Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate // *Rapid Prototyping Journal*. 2014. Vol. 20 (3). P. 221–227. DOI: 10.1108/RPJ-04-2013-0039.
14. Fodran E., Koch M., Menon U. Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles // *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 1996. P. 419–442.
15. Ziemian C., Sharma M., Ziemian S. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling // *Mechanical engineering*. InTechOpen, 2012. P. 159–180.
16. Ziemian S., Okwara M., Ziemian C. Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene // *Rapid Prototyping Journal*. 2015. Vol. 21. No. 3. P. 270–278.
17. Es-Said O.S., Foyos J., Noorani R. et al. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples // *Materials and Manufacturing Processes*. 2000. Vol. 15. No. 1. P. 107–122.
18. Hernandez R., Slaughter D., Whaley D. et al. Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling // *27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2016. Vol. 10. P. 939–950.
19. Ahn S.H., Montero M., Odell D. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // *Rapid prototyping journal*. 2002. Vol. 8. No. 4. P. 248–257.
20. Rodríguez J.F., Thomas J.P., Renaud J.E. Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation // *Rapid Prototyping Journal*. 2001. Vol. 7. No. 3. P. 148–158.
21. Fatimatuzahraa A.W., Farahaina B., Yusoff W.A.Y. The effect of employing different raster orientations on the mechanical properties and microstructure of Fused Deposition Modeling parts // *2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA)*. 2011. P. 22–27.

22. Raney K., Lani E., Kalla D.K. Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process // *Materials Today: proceedings*. 2017. Vol. 4. No. 8. P. 7956–7961.
23. Sun Q., Rizvi G.M., Bellehumeur C.T., Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // *Rapid Prototyping Journal*. 2008. Vol. 14. No. 2. P. 72–80.
24. Onwubolu G.C., Rayegani F. Characterization and optimization of mechanical properties of ABS parts manufactured by the fused deposition modelling process // *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 1–14.
25. Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F. et al. Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2016. Vol. 16. No. 3. P. 467–481.
26. Wang J., Xie H., Weng Z. et al. A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling // *Materials & Design*. 2016. Vol. 105. P. 152–159.
27. Crocchio D., De Agostinis M., Olmi G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30 // *Computational Materials Science*. 2013. Vol. 79. P. 506–518.
28. Torrado A.R., Roberson D.A. Failure analysis and anisotropy evaluation of 3D-printed tensile test specimens of different geometries and print raster patterns // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2016. Vol. 16. No. 1. P. 154–164.
29. Cantrell J.T., Rohde S., Damiani D. et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2017. Vol. 23. No. 4. P. 811–824.
30. Górski F., Wichniarek R., Kuczko W. et al. Experimental determination of critical orientation of ABS parts manufactured using fused deposition modelling technology // *Journal of Machine Engineering*. 2015. Vol. 15. No. 4. P. 121–132.
31. Górski F., Kuczko W., Wichniarek R. Impact strength of ABS parts manufactured using Fused Deposition Modeling technology // *Archives of Mechanical Technology and Automation*. 2014. Vol. 31. No. 1. P. 3–12.
32. Bertoldi M., Yardimci M.A., Pistor C.M. et al. Mechanical characterization of parts processed via fused deposition // *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 1998. P. 557–566.
33. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts // *Materials & Design*. 2010. Vol. 31. No. 1. P. 287–295.
34. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement // *Journal of Advanced Research*. 2012. Vol. 3. No. 1. P. 81–90.
35. Lee B.H., Abdullah J., Khan Z.A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object // *Journal of materials processing technology*. 2005. Vol. 169. No. 1. P. 54–61.
36. Барвинский И.А., Барвинская И.Е. Справочник по литьевым термопластичным материалам [Электронный ресурс]. URL: <http://www.barvinsky.ru> (дата обращения: 16.08.2019).
37. Fernandez-Vicente M., Calle W., Ferrandiz et al. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing // *3D printing and additive manufacturing*. 2016. Vol. 3. No. 3. P. 183–192.
38. Baich L., Manogharan G., Marie H. Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts // *International Journal of Rapid Manufacturing*. 2015. Vol. 5. No. 3–4. P. 308–319.
39. Mahmood S., Qureshi A.J., Goh K.L. et al. Tensile strength of partially filled FFF printed parts: experimental results // *Rapid Prototyping Journal*. 2017. Vol. 23. No. 1. P. 122–128.
40. Tanikella N.G., Wittbrodt B., Pearce J.M. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing // *Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 15. P. 40–47.
41. Ligon S.C., Liska R., Stampfl J. et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing // *Chemical Reviews*. 2017. Vol. 117. No. 15. P. 10212–10290.
42. Петрова Г.Н., Платонов М.М., Большаков В.А. и др. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM-технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства // *Пластические массы*. 2016. №5–6. С. 53–58.

43. Gebisa A., Lemu H. Investigating effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment // *Materials*. 2018. Vol. 11. No. 4. P. 500.
44. Jiang S., Liao G., Xu D. et al. Mechanical properties analysis of polyetherimide parts fabricated by fused deposition modeling // *High Performance Polymers*. 2019. Vol. 31. No. 1. P. 97–106.
45. Gebisa A.W., Lemu H.G. Mechanical properties of ULTEM 9085 material processed by fused deposition modeling // *Polymer Testing*. 2018. Vol. 72. P. 335–347.
46. Fitzharris E.R., Watt I., Rosen D.W. et al. Interlayer bonding improvement of material extrusion parts with polyphenylene sulfide using the Taguchi method // *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 24. P. 287–297.
47. Slonov A.L., Khashirov A.A., Zhansitov A.A. et al. The influence of the 3D-printing technology on the physical and mechanical properties of polyphenylenesulfone // *Rapid Prototyping Journal*. 2018. Vol. 24. No. 7. P. 1124–1130.
48. Slonov A.L., Khashirov A.A., Zhansitov A.A. et al. Mechanical Properties of Samples of PolyphenyleneSulfone Obtained by the 3D-Printing Method // *Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications*. 2018. Vol. 935. P. 21–26.
49. Rinaldi M., Ghidini T., Cecchini F. et al. Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 145. P. 162–172.
50. Zhao F., Li D., Jin Z. Preliminary investigation of poly-ether-ether-ketone based on fused deposition modeling for medical applications // *Materials*. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 288.
51. Gantenbein S., Masania K., Woigk W. et al. Three-dimensional printing of hierarchical liquid-crystal-polymer structures // *Nature*. 2018. Vol. 561. No. 7722. P. 226.
52. Fink J.K. *Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics*. 2010. Vol. 1. DOI: 10.1002/9780470881712.
53. Hmeidat N.S., Kemp J.W., Compton B.G. High-strength epoxy nanocomposites for 3D printing // *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 160. P. 9–20.
54. Dawoud M., Taha I., Ebeid S.J. Strain sensing behaviour of 3D printed carbon black filled ABS // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 35. P. 337–342.
55. Hohimer C.J., Petrossian G., Ameli A. et al. Electrical conductivity and piezoresistive response of 3D printed thermoplastic polyurethane/multiwalled carbon nanotube composites // *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII*. 2018. Vol. 10596. P. 105960J.
56. Quill T.J., Smith M.K., Zhou T. et al. Thermal and mechanical properties of 3D printed boron nitride–ABS composites // *Applied Composite Materials*. 2018. Vol. 25. No. 5. P. 1205–1217.
57. Francis V., Jain P.K. Investigation on the effect of surface modification of 3D printed parts by nanoclay and dimethyl ketone // *Materials and Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 33. No. 10. P. 1080–1092.
58. Paspali A., Bao Y., Gawne D.T. et al. The influence of nanostructure on the mechanical properties of 3D printed polylactide/nanoclay composites // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 152. P. 160–168.
59. Сорокин А.Е., Ларионов С.А., Краев И.Д. и др. Функционализированные термопластичные филаменты для двуматричных ПКМ, изготовленных методом 3D-печати // V Междунар. конф. «Аддитивные технологии настоящее и будущее» (Москва, 22 марта 2019). М.: ВИАМ, 2019. С. 361–376.
60. Aslanzadeh S., Saghlatoon H., Honari M.M. et al. Investigation on electrical and mechanical properties of 3D printed nylon 6 for RF/microwave electronics // *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 21. P. 69–75.
61. Çanti E., Aydin M. Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2018. Vol. 24. No. 1. P. 171–176.
62. Yamamoto B.E., Trimble A.Z., Minei B. et al. Development of multifunctional nanocomposites with 3D printing additive manufacturing and low graphene loading // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2019. Vol. 32. No. 3. P. 383–408.

63. Spoerk M., Sapkota J., Weingrill G. et al. Shrinkage and Warpage Optimization of Expanded Perlite Filled Polypropylene Composites in Extrusion Based Additive Manufacturing // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2017. Vol. 302. P. 1700143.
64. Zhong W., Li F., Zhang Z. et al. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. Vol. 301. No. 2. P. 125–130.
65. Shofner M.L., Lozano K., Rodríguez-Macías F.J. et al. Nanofiber reinforced polymers prepared by fused deposition modeling // *Journal of applied polymer science*. 2003. Vol. 89. No. 11. P. 3081–3090.
66. Ning F., Cong W., Qiu J. et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling // *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 80. P. 369–378.
67. Papon E.A., Haque A. Fracture toughness of additively manufactured carbon fiber reinforced composites // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 26. P. 41–52.
68. Tekinalp H.L., Kunc V., Velez-Garcia G.M. et al. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing // *Composites Science and Technology*. 2014. Vol. 105. P. 144–150.
69. Fonseca J., Ferreira I.A., de Moura M.F.S.F. et al. Study of the interlaminar fracture under mode I loading on FFF printed parts // *Composite Structures*. 2019. Vol. 214. P. 316–324.
70. Equbal A., Equbal M.A., Sood A.K. et al. A Review and Reflection on Part Quality Improvement of Fused Deposition Modelled Parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 455. P. 012072.
71. Wang X., Jiang M., Zhou Z. et al. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective // *Composites Part B*. 2017. Vol. 110. P. 442–458.
72. Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M. et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 23058.
73. Van Der Klift F., Koga Y., Todoroki A. et al. 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens // *Open Journal of Composite Material*. 2016. Vol. 6. No. 1. P. 18–27.
74. Mori K., Maeno T., Nakagawa Y. Dieless forming of carbon fibre reinforced plastic parts using 3D printer // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 1595–1600.
75. Bettini P., Alitta G., Sala G. et al. Fused deposition technique for continuous fiber reinforced thermoplastic // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017. Vol. 26. No. 2. P. 843–848.
76. Melenka G.W., Cheung B.K., Schofield J.S. et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures // *Composite Structures*. 2016. Vol. 153. P. 866–875.
77. Tian X., Liu T., Yang C. et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. Vol. 88. P. 198–205.
78. Li N., Li Y., Liu S. Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 238. P. 218–225.
79. Yang C., Tian X., Liu T. et al. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance // *Rapid Prototyping Journal*. 2017. Vol. 23. No. 1. P. 209–215.
80. Oztan C., Karkkainen R., Fittipaldi M. et al. Microstructure and mechanical properties of three dimensional-printed continuous fiber composites // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. No. 2. P. 271–280.