

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. О. Фирсин, Р. А. Вдовин, Е. С. Гончаров, И. Д. Марканов

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева,
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

В данной статье поднимается тема модернизации существующих технологических процессов заготовительного производства в части исключения дорогостоящего и длительного этапа проектирования и изготовления металлических пресс-форм и внедрения технологий 3D-печати. В статье представлена информация о технологии 3D-печати, основанной на методе экструзии. Приводится информация об основных этапах проектирования технологической оснастки для детали «Вставка» с учетом особенностей и ограничений, связанных с печатью на 3D-принтерах. В рамках исследования был проведен анализ шероховатости и усадки тестовых образцов, которые были изготовлены на 3D-принтере из различных композитных материалов.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, композитный материал, детали двигателестроения, усадка, FDM-печать, шероховатость.

Введение

В настоящее время для серийного производства деталей двигателей используется базовая технология, ключевой особенностью которой является проектирование и изготовление металлических пресс-форм. В текущих условиях технологического суверенитета, импортозамещения и импортоопережения развитие отечественного двигателестроения, основанного на использовании отечественных ресурсосберегающих технологий, отечественного оборудования и программного обеспечения является крайне важной актуальной задачей. В этой связи длительность этапов проектирования, создания и ввода в эксплуатацию новых конструкций двигателей должна быть минимальна. Проведенный анализ традиционного технологического процесса показал, что трудоемкость проектирования и изготовления металлических пресс-форм для изготовления отливок деталей составляет от 6 месяцев и более, при условии, что конструкция проектируемых пресс-форм должна учитывать огромное количество технологических параметров (усадку металла в отливках, припуски для последующих этапов механической обработки и пр.). Таким образом, в условиях производства новых конструкций двигателей, которые характеризуются многовариантностью и итерационностью, просчет и ошибки на стадии проектирования приводят в конечном итоге к значительным финансовым и временным затратам. В этой связи для изготовления формообразующей оснастки целесообразно использовать 3D-печать пластиком [1, 2].

Аддитивное производство (АП) — это технология, которая позволяет создавать трехмерные объекты путем послойного добавления материала [3]. АП стремительно развивается и находит применение в различных отраслях промышленности, включая ракетно-космическую и машиностроитель-

ную. Одним из перспективных методов 3D-печати пластика является технология FDM (Fused deposition modeling), которая основана на экструзии материала из сопла 3D-принтера (рис. 1). Сопло движется по заданной цифровой моделью траектории и печатает слой за слоем [4].

При 3D-печати методом FDM в качестве материала все большее применение находят композитные пластики, сочетающие в себе комбинацию двух или более материалов [5, 6].

На этапе проектирования заготовки определяются требования к поверхностям, их взаимному расположению и точности изготовления с учетом возможностей и ограничений 3D-принтеров. Послойное выращивание по FDM-технологии имеет особенности, которые необходимо учитывать для получения качественных поверхностей. При 3D-печати необходимо учитывать: температуру печати, так как некорректная температура может привести к деформации или недостаточной адгезии слоев; скорость печати; выбор подходящего материала, так как различные материалы имеют разные свойства, и применение некоторых из них могут позволить получить более гладкую поверхность; разрешение печати [7].

Параметры, влияющие на результат печати, представлены на рис. 2.

Проектирование и изготовление

В качестве примера, для отработки технологии, изготовления формообразующей оснастки из композитных материалов с помощью аддитивных технологий была выбрана деталь «Вставка», фрагмент которой представлен на рис. 3. Деталь «Вставка» входит в состав конструкции камеры сгорания двигателя НК-32-2 и предназначена для создания обратных токов, уменьшающих скорость пламени для более эффективной работы двигателя.

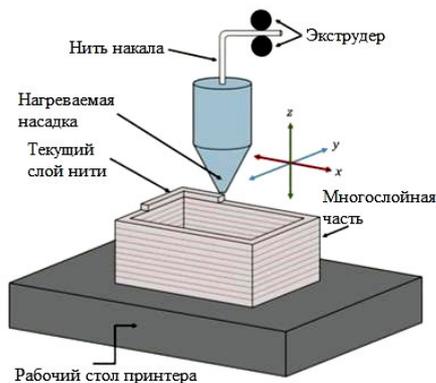


Рис. 1. Технология печати методом FDM
Fig. 1. FDM printing technology

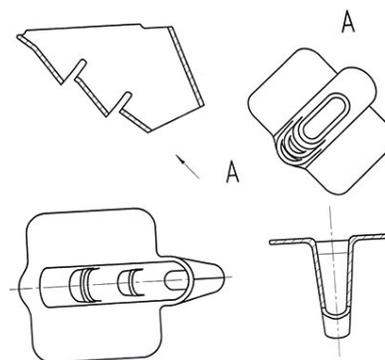


Рис. 3. Фрагмент детали «Вставка»
Fig. 3. Fragment of the «Insert» part

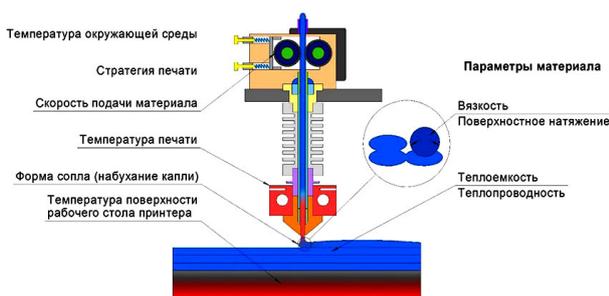


Рис. 2. Основные параметры, влияющие на качество печати
Fig. 2. The main parameters that affect print quality

Проектирование формообразующей оснастки детали «Вставка» начинается с построения трехмерных моделей в программе КОМПАС-3D.

Последовательность построения трехмерной модели детали «Опорная плита» представлена на рис. 4.

Последовательность построения трехмерной модели детали «Матрица» представлена на рис. 5.

Последовательность построения трехмерной модели детали «Пуансон» представлена на рис. 6.

Последовательность построения трехмерной модели детали «Верхняя плита» представлена на рис. 7.

3D-модель сборки технологической оснастки детали «Вставка» представлена на рис. 8.

В качестве оборудования для изготовления оснастки детали «Вставка» выбираем 3D-принтер PICASO Designer X S2. Это принтер с одним экструдером. Данная модель отличается высокой точностью и скоростью работы — производительность до 100 см³/час позволяет быстро воспроизводить любые модели. Точная механика и аппаратная платформа X позволяют добиться толщины печатного слоя всего 10 мкм. Принтер позволяет печатать

разными видами материалов. Область построения принтера 200×200×210.

Для воспроизведения модели технологической оснастки детали «Вставка» на 3D-принтере, необходимо перевести ее в g-код (инструкцию, понятную для 3D-принтера). Поэтому 3D-модель, созданную в программе КОМПАС-3D, необходимо сохранить в формате STL для последующей подготовки файла к печати. Слайсинг модели был выполнен в программе PrusaSlicer, согласно рекомендациям, которые были изложены ранее.

Расположение модели технологической оснастки детали «Вставка» на платформе построения, а также «нарезанные» слои 3D-модели представлены на рис. 9.

Напечатанная технологическая оснастка детали «Вставка» представлена на рис. 10.

Чтобы изготовить то или иное изделие или деталь из композитного материала с наилучшими свойствами, необходимо подобрать наиболее оптимальный материал и режимы печати [8]. Чтобы выявить наиболее подходящий материал и оптимальный режим печати, были изготовлены тестовые образцы. Впоследствии по напечатанным образцам была определена шероховатость и линейная усадка.

Были проведены эксперименты, в ходе которых выращены образцы из разных видов композитных материалов, при различных значениях температуры экструзии. Внизу приведена табл. 1, где указаны использованные материалы и соответствующие значения температуры экструзии для выращивания образцов.

Следующие параметры были постоянными при выращивании образцов:

- плотность заполнения материала (30 %);
- размер сопла (0,5 мм);
- обдув (0 %);
- скорость печати (45 мм/с).

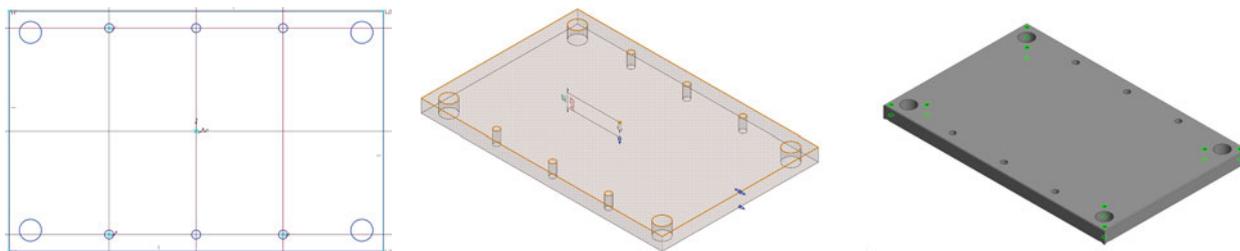


Рис. 4. Последовательность построения трехмерной модели детали «Опорная плита»
Fig. 4. The sequence of building a three-dimensional model of the «Base plate» part

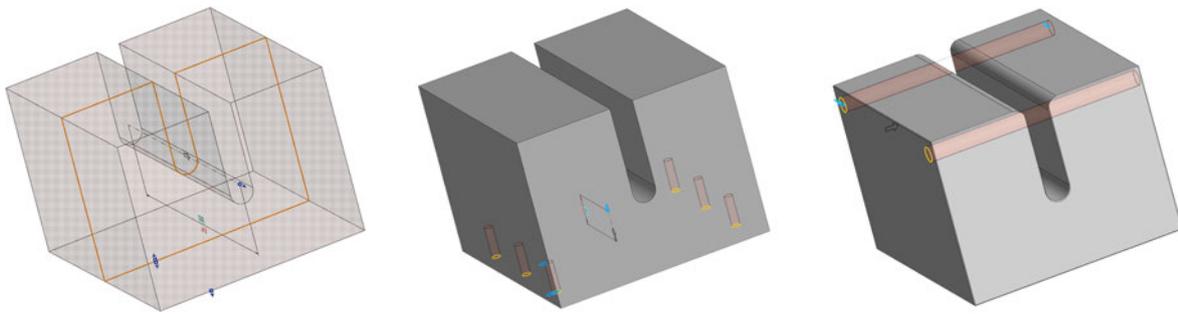


Рис. 5. Последовательность построения трехмерной модели детали «Матрица»
 Fig. 5. The sequence of building a three-dimensional model of the «Matrix» part

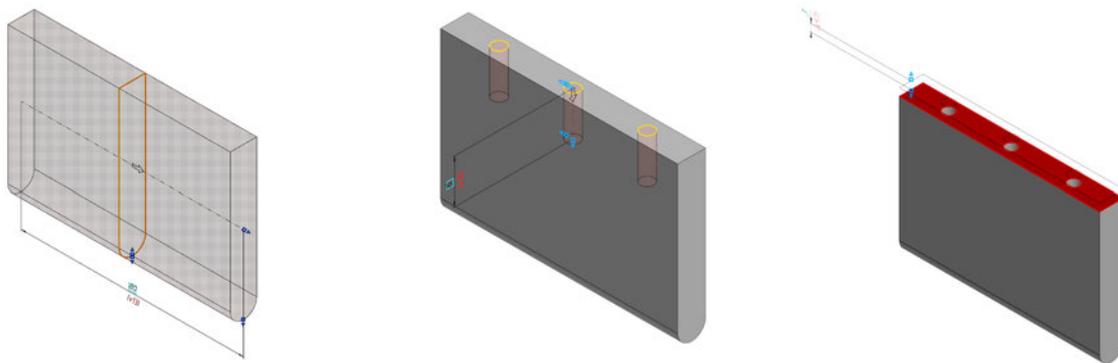


Рис. 6. Последовательность построения трехмерной модели детали «Пуансон»
 Fig. 6. The sequence of building a three-dimensional model of the «Punch» part

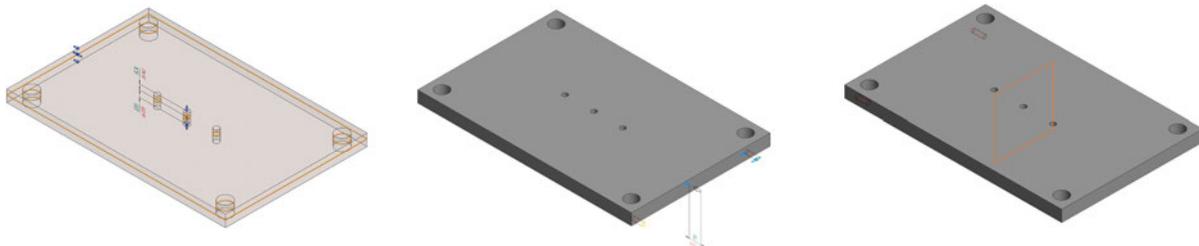


Рис. 7. Последовательность построения трехмерной модели детали «Верхняя плита»
 Fig. 7. The sequence of building a three-dimensional model of the «Upper plate» part

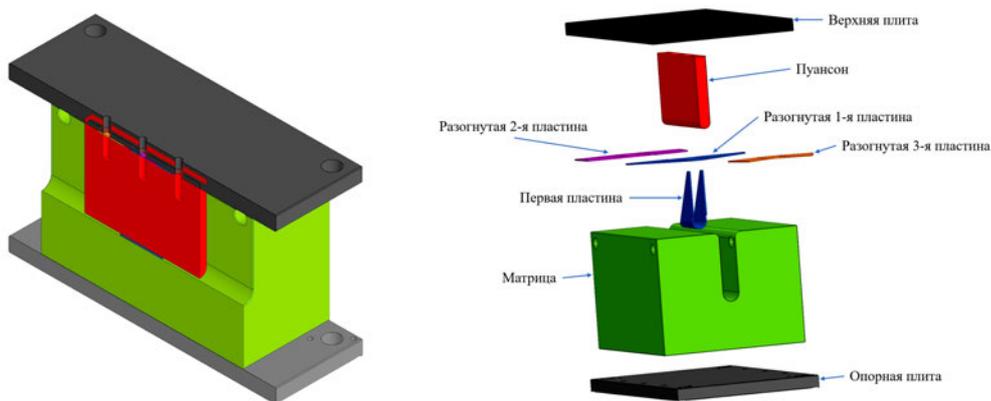


Рис. 8. Трехмерная модель технологической оснастки детали «Вставка»
 Fig. 8. Three-dimensional model of the technological equipment of the «Insert» part

ABS-PA GF-8 состоит из смеси акрилонитрилбу-
 тадиенстирола (ABS) и полиамида (РА6) с добавле-
 нием 8 % стекловолокна. Этот материал идеально
 подходит для печати конечных изделий, которым
 требуется высокая ударпрочность и стойкость

к ультрафиолету. Он также инертен к большинству
 химических растворителей.

РА 66 GF-30 является композитным материалом
 из полиамида 66, смешанного с армированием сте-
 кловолокном на 30 %.

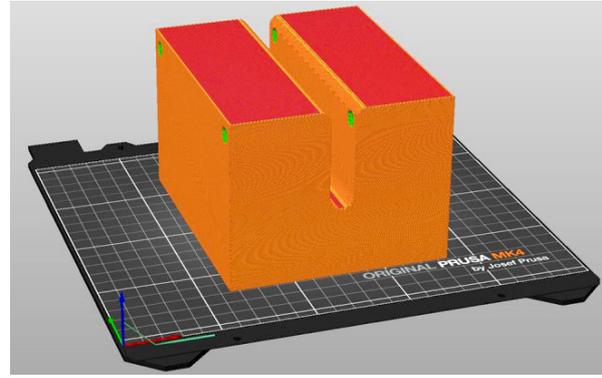
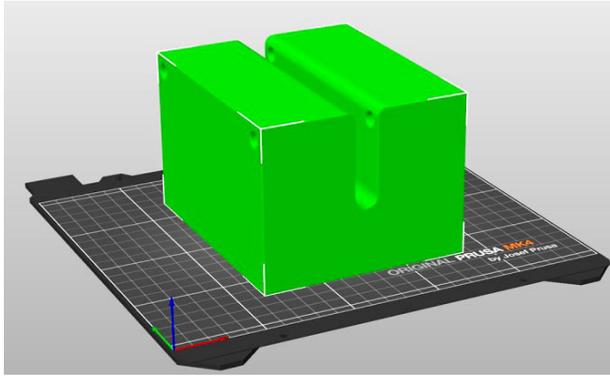


Рис. 9. Расположение и нарезка слоев 3D-модели технологической оснастки детали «Вставка»
Fig. 9. Arrangement and cutting of layers of the 3D model of the technological equipment of the «Insert» part

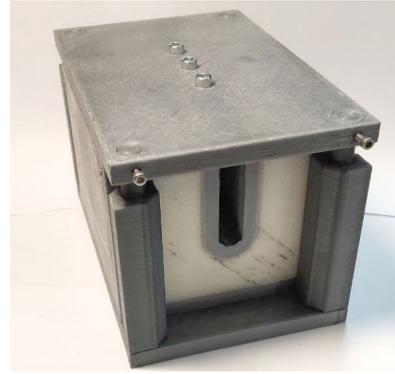
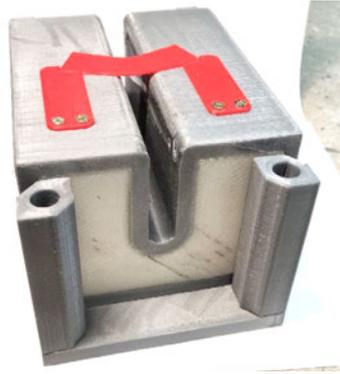


Рис. 10. Технологическая оснастка детали «Вставка»
Fig. 10. Technological equipment of the «Insert» part

ForMAX — это инженерный термопластик, который сочетает в себе прочность и высокую температурную стабильность за счет добавления углеволокон в основной материал ABS. Этот материал идеально подходит для создания деталей, которые выдерживают большие нагрузки и экстремальные условия. Наличие углеволоконного наполнителя (до 15 %) в ForMAX значительно повышает прочность и жесткость филамента.

Исследование шероховатости поверхности

Шероховатость поверхности является важным аспектом при создании моделей, и она может быть контролируема через методы выращивания и толщину слоя. Однако иногда поверхность выращенных моделей имеет недостаточное качество, что проявляется в высокой шероховатости. Это может привести к необходимости продолжительной ручной отделки, особенно в случае сложнопрофильных поверхностей. Рис. 11 иллюстрирует процесс измерения шероховатости, где каждый образец подвергается измерению в двух направлениях. Это позволяет получить полное представление о характеристиках поверхности и определить наличие дефектов [9].

Измерение шероховатости проводилось с помощью профилометра ИШП-210, который использует контактный щуповой метод измерения (рис. 12).

В представленной в табл. 2 информации отражены результаты измерений шероховатостей образцов по параметру Ra.

Анализ данных из табл. 2 показал, что различные материалы имеют разную шероховатость. Наименьшую шероховатость по параметру Ra имеет

Таблица 1. Используемые материалы и соответствующие значения температуры экструзии для выращивания образцов

Table 1. The materials used and the corresponding extrusion temperature values for growing samples

Материал	Температура сопла, °C	Температура стола, °C
ABS-PA GF-8	280	120
	290	
	300	
PA 66 GF-30	305	140
	310	
	320	
ForMAX	270	105
	280	
	290	

образец из композитного материала ForMAX при температуре сопла 270 °C.

Исследование влияния линейной усадки на размерную точность

Усадка материала является важным фактором при проектировании и изготовлении деталей с использованием технологии 3D-печати по методу FDM [10]. В процессе печати материал расплавляется и затвердевает, что приводит к изменению размеров и появлению внутренних напряжений

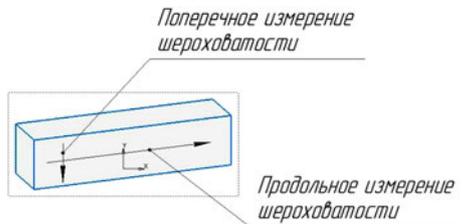


Рис. 11. Схема измерения шероховатости
Fig. 11. Roughness measurement scheme



Рис. 12. Измерение шероховатости образца
профилометром ИПП-210
Fig. 12. Measuring the roughness of a sample with
an ИПП-210 profilometer

в изделии. Поэтому понимание и учет усадки являются ключевыми аспектами для достижения точности и качества при печати. Усадка материала может быть выражена в линейных или объемных единицах измерения. Линейная усадка характеризует изменение линейных размеров. В случае 3D-печати линейная усадка определяется разницей между размерами модели в программе CAD и фактическими размерами изделия, полученного на 3D-принтере. Одной из основных причин линейной усадки является термическое сжатие материала при охлаждении до комнатной температуры. Этот процесс начинается, когда достигается температура начала линейной усадки, то есть температура, при которой начинается образование твердой фазы материала. После этого происходит дальнейшее сокращение размеров изделия, определяемое температурным коэффициентом линейного расширения материала. Важно отметить, что повышение линейной усадки может привести к возникновению термических напряжений в изделии. Поэтому при разработке технологических процессов 3D-печати необходимо учитывать эти факторы и принимать меры для минимизации и контроля усадки. Это может включать оптимизацию параметров печати, выбор подходящего материала с низкой усадкой [11].

Для оценки усадки и стабильности геометрических размеров образцов, были проведены измерения по линейным размерам. В процессе измерений использовался гладкий микрометр МК-200, с точностью измерения до 0,01 мм. Каждый образец был измерен по двум линейным размерам a и b , соответствующие значениям 15 и 60 мм, как показано на 3D-модели (рис. 13).

В представленной в табл. 3 информации отражены результаты измерений образцов и значения свободной линейной усадки. Расчет значений свободной линейной усадки был выполнен согласно формуле (1):

$$\alpha_1 = \frac{l_0 - l}{l_0} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

Таблица 2. Значения шероховатости образцов, измеренных в продольном и поперечном направлениях
Table 2. Roughness values of samples measured in the longitudinal and transverse directions

T, °C	Продольное направление		Поперечное направление	
	Ra, мкм	Среднее значение	Ra, мкм	Среднее значение
ABS-PA GF-8				
280	8,573	7,828	18,636	17,556
	7,352		16,959	
	7,558		17,073	
290	8,237	8,484	17,356	18,364
	9,134		19,428	
	8,080		18,309	
300	9,568	9,862	18,476	18,913
	10,334		19,283	
	9,685		18,981	
PA 66 GF-30				
305	8,501	9,125	19,147	18,935
	9,555		17,945	
	9,318		19,713	
310	10,595	10,374	19,370	19,261
	9,462		19,551	
	11,064		18,862	
320	9,821	9,916	17,900	17,581
	11,134		17,832	
	8,794		17,011	
ForMAX				
270	5,281	5,322	17,760	17,113
	5,370		17,008	
	5,314		16,570	
280	6,749	6,773	18,682	18,130
	6,831		18,043	
	6,739		17,664	
290	5,786	5,363	17,378	17,177
	4,916		16,643	
	5,387		17,511	

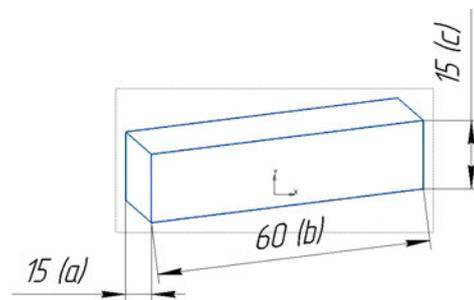


Рис. 13. Измеряемые параметры у образцов
Fig. 13. Measured parameters of the samples

где l_0 — размер модели в программе CAD, мм;
 l — фактический размер изделия, полученный на 3D-принтере.

Анализ данных из табл. 3 показал, что различные материалы имеют разные уровни усадки. Наи-

Таблица 3. Результаты измерения образцов и величины линейной усадки
Table 3. The results of the measurement of samples and the magnitude of linear shrinkage

T, °C	Ширина образца (a), мм		α_1 (a), %	Длина образца (b), мм		α_1 (b), %
	Измерение	Ср. зн.		Измерение	Ср. зн.	
ABS-PA GF-8						
280	15,09	15,09	-0,6	60,34	60,34	-0,6
	15,06			60,33		
	15,11			60,34		
290	15,15	15,16	-1,1	59,77	59,77	+0,4
	15,17			59,78		
	15,16			59,77		
300	15,19	15,18	-1,2	59,92	59,92	+0,13
	15,17			59,92		
	15,18			59,92		
PA 66 GF-30						
305	15,09	15,11	-0,73	60,16	60,16	-0,27
	15,12			60,17		
	15,12			60,15		
310	15,09	15,16	-1,07	60,32	60,33	-0,55
	15,18			60,33		
	15,21			60,33		
320	15,31	15,29	-1,93	60,39	60,39	-0,65
	15,31			60,39		
	15,25			60,39		
ForMAX						
270	14,96	14,98	+0,13	59,91	59,92	+0,13
	14,98			59,93		
	15,00			59,92		
280	14,91	14,90	+0,67	59,87	59,87	+0,22
	14,85			59,88		
	14,93			59,87		
290	14,90	14,85	+1,00	59,83	59,84	+0,27
	14,82			59,85		
	14,85			59,84		

меньшую усадку демонстрируют образцы, изготовленные из материала ForMAX, в то время как наибольшая усадка наблюдается у образцов из PA 66 GF-30. Это указывает на то, что выбор материала играет важную роль при печати деталей, особенно если точность размеров является критическим фактором. Кроме материала, температура расплавления также оказывает влияние на усадку. Чем выше температура расплавления, тем больше время остывания материала, что приводит к увеличению усадки. Это важно учитывать при выборе оптимальной температуры для печати, особенно если требуется минимизировать усадку.

Для компенсации усадки и достижения требуемых размеров деталей при проектировании можно использовать коэффициент усадки. Этот коэффициент позволяет масштабировать модель перед

печатью, учитывая предполагаемую усадку материала.

Заключение

В первом разделе данной статьи был поднят вопрос о возможной замене металлических пресс-форм, изготовление которых имеет значительные финансовые и временные затраты на технологическую оснастку, полученную с помощью 3D-печати из композитных материалов. Дано общее понятие термину аддитивное производство, а также рассмотрена технология FDM-печати.

Во втором разделе описан процесс проектирования технологической оснастки для детали «Вставка» с учетом возможностей и ограничений печати на 3D-принтерах. Также для выбора наиболее оптимального материала был проведен анализ шероховатости и усадки. Для этого были выращены тестовые образцы из трех различных композитных материалов — ABS-PA GF-8, PA 66 GF-30, ForMAX. Исследования показали, что наименьшую шероховатость по параметру Ra имеет образец из композитного материала ForMAX при температуре сопла 270 °C. Наименьшую усадку демонстрируют также образцы, изготовленные из материала ForMAX, в то время как наибольшая усадка наблюдается у образцов из PA 66 GF-30. Это указывает на то, что выбор материала играет важную роль при печати деталей, особенно если качество и точность размеров является критическим фактором.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации программы развития Самарского университета на 2021–2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области.

Список источников

- Вдовин Р. А., Балякин А. В., Гончаров Е. С. Современные технологии при производстве крупногабаритных отливок деталей ГТД: моногр. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2022. 112 с. ISBN 978-5-7883-1853-0.
- Вдовин Р. А. Разработка и внедрение в производство цифровой гибридной технологии изготовления лопаток ГТД на основе методов быстрого прототипирования // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. 2019. № 4 (51). С. 47–52. EDN: QDLSDO.
- Яблочников Е. И., Грибовский А. А., Пирогов А. В. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литейных форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов // Металлообработка. 2013. № 5–6. С. 74–80.
- Bayu K. R., Ariawan I. F., Dody U. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters // Open Engineering. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 639–649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063.
- Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B. [et al.]. Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review // Virtual and Physical Prototyping. 2013. Vol. 8 (1). P. 19–50. DOI: 10.1080/17452759.2013.778175.
- Лопатин А. Н., Зверков И. Д. Изготовление формообразующей оснастки аддитивными методами для композитных деталей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 53–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59. EDN: ZIIYWT.
- Балякин А. В., Гончаров Е. С., Злобин Е. П. Анализ технологических возможностей и ограничений 3d принтеров для изготовления прототипов ГТУ // Всероссийский научно-тех-

нический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н. Д. Кузнецова, посвященный 110-летию ПАО «ОДК-КУЗНЕЦОВ». Самара: Изд-во Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева, 2022. С. 20–22. EDN: NTBVMQY.

8. Doshi M., Mahale A., Singh S. K. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. // *Materials Today: Proceedings* // 2022. Vol. 50 (5). P. 2269–2275.

9. Pérez M., Medina-Sánchez G., García-Collado A. [et al.]. Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters // *Materials*. 2018. Vol. 1 (8). DOI: 10.3390/ma11081382.

10. Wang T.-M., Xi J.-T., Jin Y. A model research for prototype warp deformation in the FDM process // *Journal of Additive Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 33 (11). P. 1087–1096. DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9.

11. Huang Q., Marshall G. S., Epstein D. J. An Analytical Foundation for Optimal Compensation of Three-Dimensional Shape Deformation in Additive Manufacturing // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2016. Vol. 138. P. 061010-1. DOI: 10.1115/1.4032220.

ФИРСИН Андрей Олегович, лаборант-исследователь Инжинирингового центра ИЦ-206 Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева (Самарский университет), г. Самара.

Адрес для переписки: firsin1709@yandex.ru

ВДОВИН Роман Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры технологий производства двигателей, доцент передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского

университета, г. Самара.

SPIN-код: 6003-6910

AuthorID (РИНЦ): 745142

AuthorID (SCOPUS): 56472716800

Адрес для переписки: vdovin.ra@ssau.ru

ГОНЧАРОВ Евгений Станиславович, инженер кафедры технологий производства двигателей, инженер Инжинирингового центра ИЦ-206, ассистент передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского университета, г. Самара.

SPIN-код: 7397-2590

AuthorID (РИНЦ): 1018716

AuthorID (SCOPUS): 57217107476

Адрес для переписки: goncharov.es@ssau.ru

МАРКАНОВ Илья Денисович, лаборант-исследователь Инжинирингового центра ИЦ-206 Самарского университета, г. Самара.

SPIN-код: 9645-1120

AuthorID (РИНЦ): 1218561

Адрес для переписки: ilyamarkanoff355@gmail.com

Для цитирования

Фирсин А. О., Вдовин Р. А., Гончаров Е. С., Марканов И. Д. Проектирование и изготовление деталей и узлов аэрокосмических конструкций из композитных материалов в условиях аддитивного производства // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2024. Т. 8, № 1. С. 86–94. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-86-94.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023 г.

© А. О. Фирсин, Р. А. Вдовин, Е. С. Гончаров,

И. Д. Марканов

DESIGN AND MANUFACTURE OF PARTS AND ASSEMBLIES OF AEROSPACE STRUCTURES MADE OF COMPOSITE MATERIALS IN CONDITIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING

A. O. Firsin, R. A. Vdovin, E. S. Goncharov, I. D. Markanov

Samara National Research University,
Russia, Samara, Moskovskoye Shosse Road, 34, 443086

This article raises the topic of modernization of existing technological processes of procurement production in terms of eliminating the expensive and lengthy stage of designing and manufacturing metal molds and the introduction of 3D printing technologies. The article provides information about 3D printing technology based on the extrusion method. Information is provided on the main stages of designing the tooling for the «Insert» part, taking into account the features and limitations associated with printing on 3D printers. As part of the study, the roughness and shrinkage of test samples are analyzed, which are made on a 3D printer from various composite materials.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, composite material, engine parts, shrinkage, FDM printing, roughness.

Acknowledgements

The work is carried out within the framework of implementation of the programme of development of Samara University for 2021–2030 years under the programme «Priority–2030» with the support of the Government of Samara region.

References

1. Vdovin R. A., Balyakin A. V., Goncharov E. S. *Sovremennyye tekhnologii pri proizvodstve krupnogabaritnykh otlivok detaley GTD [Modern technologies in the production of large-size castings of GTE parts]*. Samara, 2022. 112 p. ISBN 978-5-7883-1853-0. (In Russ.).
2. Vdovin R. A. *Razrabotka i vnedreniye v proizvodstvo tsifrovoy gibridnoy tekhnologii izgotovleniya lopatok GTD na osnove metodov bystrogo prototipirovaniya [Development and deployment of a digital hybrid gte blades manufacturing technique on the basis of fast prototyping methods]* // *Vestnik RGATU imeni P. A. Solov'yeva. Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*. 2019. No. 4 (51). P. 47–52. EDN: QDLSDO. (In Russ.).
3. Yablochnikov E. I., Gribovskiy A. A., Pirogov A. V. *Effektivnost' primeneniya additivnykh tekhnologiy dlya izgotovleniya lit'yevykh form i pri podgotovke proizvodstva izdeliy iz termoplastichnykh polimernykh materialov [Efficiency of using additive technologies for the manufacture of injection molds and in preparing the production of products from thermoplastic polymer materials]* // *Metalloobrabotka. Metalloobrabotka*. 2013. No. 5–6. P. 74–80. (In Russ.).
4. Bayu K. R., Ariawan I. F., Dody U. *A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters* // *Open Engineering*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 639–649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063. (In Engl.).
5. Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B. [et al.]. *Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review* // *Virtual and Physical Prototyping*. 2013. Vol. 8 (1). P. 19–50. DOI: 10.1080/17452759.2013.778175. (In Engl.).
6. Lopatin A. N., Zverkov I. D. *Izgotovleniye formoobrazuyushchey osnastki additivnymi metodami dlya*

kompozitnykh detaley [Shaping molding tools reduction for composite parts by means of additive technologies] // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii. Aviation Materials and Technologies*. 2019. No. 2 (55). P. 53–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59. EDN: ZHIYWT. (In Russ.).

7. Balyakin A. V., Goncharov E. S., Zlobin E. P. *Analiz tekhnologicheskikh vozmozhnostey i ogranicheniy 3d printerov dlya izgotovleniya prototipov GTU [Analysis of technological capabilities and limitations of 3D printers for GTU prototype production]* // *Vserossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy forum po dvigatelyam i energeticheskim ustanovkam imeni N. D. Kuznetsova, posvyashchennyy 110-letiyu PAO «ODK-KUZNETSOV»*. *All-Russian Scientific and Technical Forum for engines and Power Facilities named after N. D. Kuznetsov*. Samara, 2022. P. 20–22. EDN: NTBMYQ. (In Russ.).

8. Doshi M., Mahale A., Singh S. K. *Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects*. // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 50 (5). P. 2269–2275. (In Engl.).

9. Pérez M., Medina-Sánchez G., García-Collado A. [et al.]. *Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters* // *Materials*. 2018. Vol. 1 (8). DOI: 10.3390/ma11081382. (In Engl.).

10. Wang T.-M., Xi J.-T., Jin Y. *A model research for prototype warp deformation in the FDM process* // *Journal of Additive Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 33 (11). P. 1087–1096. DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9. (In Engl.).

11. Huang Q., Marshall G. S., Epstein D. J. *An Analytical Foundation for Optimal Compensation of Three-Dimensional Shape Deformation in Additive Manufacturing* // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2016. Vol. 138. P. 061010-1. DOI: 10.1115/1.4032220. (In Engl.).

FIRSIN Andrey Olegovich, Laboratory Researcher of Engineering Centre EC-206, Samara National Research University (Samara University), Samara.
Correspondence address: firsin1709@yandex.ru



VDOVIN Roman Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Engine Manufacturing Technologies Department, Associate Professor of Advanced Aerospace Engineering School, Samara University, Samara.

SPIN-code: 6003-6910

AuthorID (RSCI): 745142

AuthorID (SCOPUS): 56472716800

Correspondence address: vdovin.ra@ssau.ru

GONCHAROV Evgeny Stanislavovich, Engineer of Engine Manufacturing Technologies Department, Engineer of Engineering Centre EC-206, Assistant of Advanced Aerospace Engineering School, Samara University, Samara.

SPIN-code: 7397-2590

AuthorID (RSCI): 1018716

AuthorID (SCOPUS): 57217107476

Correspondence address: goncharov.es@ssau.ru

MARKANOV Ilya Denisovich, Laboratory Researcher of Engineering Centre EC-206, Samara University, Samara.

SPIN-code: 9645-1120

AuthorID (RSCI): 1218561

Correspondence address: ilyamarkanoff355@gmail.com

For citations

Firsin A. O., Vdovin R. A., Goncharov E. S., Markanov I. D. Design and manufacture of parts and assemblies of aerospace structures made of composite materials in conditions of additive manufacturing // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 1. P. 86–94. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-86-94.

Received November 27, 2023.

© A. O. Firsin, R. A. Vdovin, E. S. Goncharov, I. D. Markanov