

УДК 621.7.07

А.Н. Лопатин¹, И.Д. Зверков¹**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ
АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ ДЛЯ КОМПОЗИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59

Описан метод изготовления формообразующей оснастки методами 3D-печати на примере легкого многоцелевого самолета. Описана конструкция матрицы нижней поверхности крыла, спроектированная для изготовления на 3D-принтере. Приводится описание технологий 3D-печати FDM и PolyJet. Сравниваются затраты на изготовление формообразующей оснастки методами фрезерования и 3D-печати. Рассмотрен экономический эффект от внедрения 3D-печати в изготовление формообразующей оснастки. Обозначены преимущества, проблемы и особенности технологий FDM и PolyJet.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, оснастка, FDM, PolyJet.

А.Н. Lopatin¹, I.D. Zverkov¹**SHAPING MOLDING TOOLS PRODUCTION FOR COMPOSITE
PARTS BY MEANS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES**

The article describes a method of manufacturing shaping molding tools by 3D-printing using the light multi-purpose aircraft as an example. The construction of the lower surface wing matrix of this aircraft, designed for the manufacture by 3D-printing is described. FDM and PolyJet 3D-printing technologies are described. There are compared the manufacturing charges for the production of shaping molding tools by means of milling and 3D-printing. The economic effect of the introduction of 3D-printing into the manufacture of shaping molding tools is considered. Also, the advantages, problems and characteristic features of FDM and PolyJet technologies are indicated.

Keywords: 3D-printing, additive technologies, equipment, FDM, PolyJet.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» [Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Novosibirsk State Technical University»]; e-mail: rector@nstu.ru

Введение

В современной технике композиты находят все большее применение в отраслях авиа-, авто- и судостроения. Преимущество слоистых композиционных материалов (СКМ) в том, что возможно изготавливать легкие и прочные детали двойной и одинарной кривизны с применением относительно простых технологических процессов. Одним из наиболее важных и дорогих техпроцессов при подготовке производства СКМ является изготовление формообразующей оснастки.

В настоящее время применяют два метода воспроизводства формообразующих поверхностей оснастки: изготовление фрезерованием на станках с ЧПУ и изготовление по шаблону.

Применение ЧПУ-станков требует привлечения значительных капиталовложений по причине высокой стоимости оборудования, что часто является неприемлемым для компаний с ограниченным бюджетом. Кроме того, чистовое фрезерование криволинейных поверхностей требует значительного времени работы станка для достижения заданной шероховатости.

Изготовление оснастки по шаблонам предполагает использование большого количества ручно-

го труда и многократного переноса размеров, что негативно сказывается на трудоемкости изготовления и точности получаемых деталей оснастки.

Предлагается использовать аддитивные технологии 3D-печати для изготовления формообразующей оснастки. Суть этих технологий заключается в том, что деталь создается послойным добавлением материала. Существует большое количество видов аддитивных технологий, различающихся по применяемым материалам (металлы, термопласты, фотополимеры) и физическому принципу нанесения материала.

Следует отметить, что уже накоплен опыт по промышленному применению аддитивных технологий для изготовления оснастки в литейном производстве [1, 2]. Методами 3D-печати изготавливаются выплавляемые модели и клее-песчаные формы. Применение 3D-печати в литейном производстве показало высокую эффективность [3].

Для изготовления формообразующей оснастки целесообразно применять 3D-печать пластиком. Для этого подходят технологии послойного наплавления материала (Fused deposition modeling – FDM), отверждение жидкого фотополимера под действием излучения (SLA, DPL, MJM и др.) и лазерного спекания порошка (SLS).

Ожидается, что применение 3D-печати приведет к резкому снижению стоимости оснастки и ускорению ее производства.

Описание изготавливаемой оснастки и деталей

Основное применение СКМ нашли в деталях типа обшивок. Далее рассмотрим технологию изготовления оснастки для композитного крыла интегральной конструкции легкого многоцелевого самолета [4], так как этот класс деталей представляет наибольший интерес.

Силовой каркас крыла состоит из верхней и нижней обшивок, двух внутренних замкнутых контуров, задней стенки и заполнителя между ними (рис. 1).

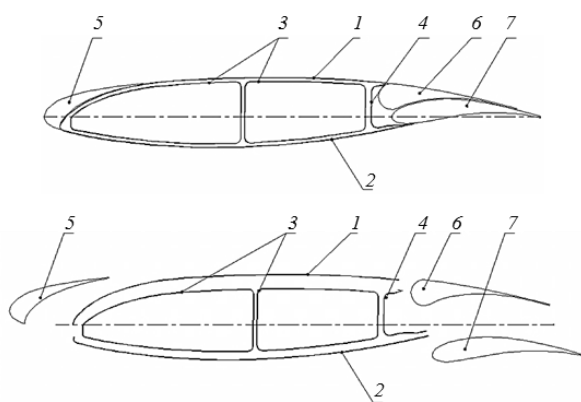


Рис. 1. Сечение композитного крыла интегральной конструкции:

1 – верхняя обшивка; 2 – нижняя обшивка; 3 – внутренние силовые контуры; 4 – задняя стенка; 5 – передкрылок; 6 – интерцептор; 7 – закрылок

Консоль крыла представляет собой трехслойную конструкцию с габаритами 860×4500 мм (рис. 2). Оснастка будет иметь соответствующие габариты, следовательно, для ее изготовления потребуются либо 3D-принтер с соответствующей рабочей зоной, либо необходимо разделить оснастку на несколько элементов для уменьшения требуемых размеров аддитивного оборудования и, как следствие, уменьшения его стоимости.

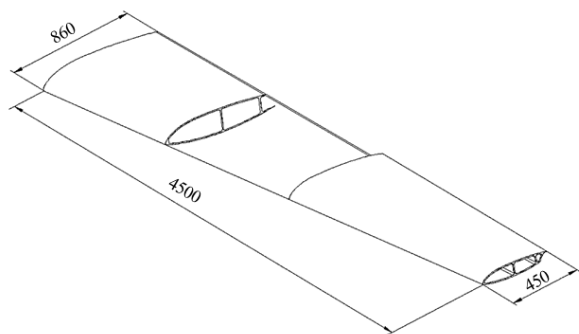


Рис. 2. Консоль легкого многоцелевого самолета

Существует два подхода к изготовлению оснастки.

В первом случае формообразующая оснастка изготавливается на 3D-принтере сразу и готова к использованию после доработки поверхности до требуемой шероховатости. Достоинство этой схемы в том, что отсутствуют переносы размеров; технологическая цепочка, трудоемкость и количество используемого материала минимальны. Главным недостатком такой оснастки является различие температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов оснастки и композитной детали. Как было показано в работе [5], различная температурная деформация может вызывать существенные напряжения и отклонения размеров получаемых деталей, особенно если они имеют большие габариты. Этот недостаток может быть решающим при переходе ко второму методу изготовления оснастки.

Во втором случае сначала изготавливается мастер-модель крыла, а формообразующая оснастка получается снятием слепков с этой модели. В этом случае материал детали и оснастки совпадают, и все температурные искажения сводятся к минимуму. Становится также возможным повысить температуру отверждения и использовать более совершенные связующие, так как материал для 3D-печати – это термопластичные полимеры с максимальной рабочей температурой от 60 (PLA-пластик) до 120°C (поликарбонат PC). При использовании формообразующей оснастки из композиционных материалов возможно увеличивать температуру отверждения до 200°C.

Из-за необходимости изготавливать вспомогательную оснастку в виде мастер-модели возрастают трудоемкость, материалоемкость, продолжительность изготовления и, как следствие, стоимость конечного продукта, а из-за переноса геометрических размеров уменьшается точность деталей оснастки и ухудшается технологичность.

Основным критерием выбора подхода изготовления оснастки является температура отверждения связующего. Если связующее отверждается при комнатной температуре или при незначительном нагреве, то допускается использование оснастки из термопластов. Если же связующее отверждается с выдержкой при температуре выше, чем рабочая температура материала для 3D-печати, то необходимо использовать промежуточную мастер-модель.

Изготовление оснастки на фрезерных станках с ЧПУ

В настоящее время широко применяется изготовление формообразующей оснастки на станках с ЧПУ. Основными этапами этой технологии являются написание управляющей программы для станка, черновая и чистовая обработка, финишная доводка поверхности (шлифование и нанесение покрытий).

Основными расходами в технологии изготовления оснастки фрезерованием составляют затраты на амортизацию фрезерного станка и материал. Стоимость фрезерных трехкоординатных станков приблизительно пропорциональна размерам обрабатываемой области. Следовательно, чем больше размеры оснастки, тем дороже выйдет обработка одной единицы площади формирующей поверхности.

Затраты на изготовление оснастки, выполненной фрезерованием, можно оценить по следующей формуле:

$$A_{\text{фрез}} = P_{\text{ст}} \cdot T_{\text{ф}} + P_{\text{заг}} \cdot V_{\text{заг}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ст}}$ – стоимость работы станка за 1 ч, руб.; $T_{\text{ф}}$ – продолжительность работы станка, ч; $P_{\text{заг}}$ – стоимость материала заготовки, руб./м³; $V_{\text{заг}}$ – объем заготовки для изготовления матрицы, м³.

Стоимость работы станка складывается из затрат на электроэнергию и амортизацию:

$$P_{\text{ст}} = N \cdot A_{\text{элект}} + \frac{C_{\text{станка}}}{T}, \quad (2)$$

где N – потребляемая станком мощность, кВт; $A_{\text{элект}}$ – стоимость электричества, руб./(кВт·ч); $C_{\text{станка}}$ – стоимость станка, руб.; T – амортизационный период – здесь принят как 8000 ч (4 года).

Продолжительность работы станка оценивается по формуле

$$T_{\text{фрез}} = \frac{V_{\text{заг}} - V_{\text{осн}}}{S_{\text{обр1}}} + \frac{S_{\text{чист}}}{S_{\text{обр2}}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{осн}}$ – объем готовой оснастки (определяется по САД-модели), м³; $S_{\text{обр1}}$ – скорость удаления материала, м³/ч; $S_{\text{обр2}}$ – скорость обработки чистовой поверхности, м²/ч; $S_{\text{чист}}$ – обрабатываемая площадь чистовой поверхности, м².

Объем заготовки для фрезерования $V_{\text{заг}}$ и объем готовой оснастки определяются умножением объема оснастки по габаритам на эмпирический статистический коэффициент. Для заготовок под фрезерование этот коэффициент равен 0,8, а для готовой оснастки 0,6.

Производительность фрезерного оборудования определяется в зависимости от режимов обработки. Для сравнения выбран режим с подачей 1500 мм/мин и съемом материала в 45 мм² для черновой обработки (производительность 0,00405 м³/ч), а также с подачей 1000 мм/мин и шагом в 0,6 мм для чистовой обработки (производительность 0,036 м²/ч). Таким образом, время, необходимое для обработки 1 м² криволинейной поверхности, составило в среднем 40 ч для оснастки легкого многоцелевого самолета [6].

Изготовление оснастки аддитивными методами

В настоящее время существует большое количество различных видов аддитивных технологий,

которые отличаются по применяемым материалам и физическому принципу выращивания деталей. Выделяют семь основных технологий:

- процессы с отверждением фотополимера в емкости (SLA, DPL);
- процессы экструзии (FDM);
- выборочное сплавление порошкового слоя (SLS, SLM, EBM, SMS);
- направленное нанесение порошковых материалов с последующим сплавлением (LENS, DMD);
- соединение листовых материалов (ламинирование) (LOM, UC);
- струйная 3D-печать (MJM, PJ);
- склеивание порошков (3DP).

От формирующей оснастки не требуется большой прочности, поэтому целесообразно применять пластик для 3D-печати, так как печать пластиком на порядок дешевле, чем печать металлами.

Печать пластиком реализуется в таких технологиях, как моделирование наплавлением, отверждение фотополимеров, струйная 3D-печать и спекание порошков. Поскольку оснастка является крупногабаритной деталью, то нецелесообразно использовать процессы, в которых материал заполняет весь объем рабочей зоны из-за увеличения затрат на материал. Поэтому процессы с отверждением фотополимеров в емкости и сплавление порошков далее рассматриваться не будут. Наиболее перспективными технологиями для изготовления оснастки являются моделирование наплавлением (FDM) и процессы струйной печати (MJM, PJ).

FDM-технология. Моделирование методом наплавления в настоящее время наиболее широко распространено. Аддитивное оборудование представлено от настольных 3D-принтеров до промышленных аппаратов с рабочей зоной в несколько метров. Процесс печати представляет собой нанесение материала тонкой полоской по управляющему шаблону в соответствии с компьютерной моделью детали. Слои наносятся соплом, которое разогрето до температуры полужидкого состояния пластика. Пластик подается в сопло в виде калиброванной нити. Наиболее распространенные материалы, с которыми работают по FDM-технологии, и их характеристики представлены в табл. 1.

Достоинствами FDM-технологии являются низкая стоимость оборудования и материала, возможность изготавливать оборудование под крупногабаритные детали без существенного увеличения стоимости. Недостатком этой технологии является грубая шероховатость поверхности, которая может достигать значений в 20% от высоты наплавленного слоя [7]. Так, при толщине слоя 0,254 мм шероховатость вдоль направления построения составляет $R_a \approx 20-35$, а при толщине слоя 0,178 мм – $R_a = 12-25$ [7]. Следует отметить, что шероховатость имеет направленный характер и при измерении параллельно слоям может составлять $R_a \approx 0,5-4$.

Применяемые пластики для моделирования методом наплавления

Материал	Температура печати, °С	Максимальная температура эксплуатации, °С	Приблизительная стоимость, руб./кг	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^5, K^{-1}$
PLA	185–210	50	1300	4–5
ABS	210–250	100	1300	8–10
PC	270–310	130	2000	6–7
Nylon	240–260	50–70	2000	4
PETG	220–250	70	1400	6,6

Для получения гладкой поверхности и использования ее в качестве формообразующей оснастки необходимо дорабатывать поверхность FDM-деталей.

Поскольку в процессе 3D-печати методом FDM существует перепад температур в среднем 200°С, ожидается появление температурных деформаций на крупногабаритных деталях. Для компенсации этих деформаций необходимо разрабатывать математические модели FDM-процесса и алгоритмы по оптимизации исходной геометрической формы деталей. Определенного успеха в этой области добилась компания Ansys при моделировании лазерного спекания металлических порошков [8, 9], предложив готовый программный комплекс. Этот комплекс позволяет моделировать весь процесс 3D-печати методом конечных элементов. Для расчета используются уравнения теплопередачи и статического анализа, а также файл g-кода для моделирования движения лазера. В работе [10] предлагается математическая модель FDM-процесса для расчета деформации в виде изгиба при температурной усадке твердотельных объектов, при этом моделирование пустотелых деталей со сложной формой не поддерживается. В работе [11] предлагается алгоритм по модификации исходной модели для компенсации заданной деформации. В работе [12] рассматривается построение крупногабаритных объектов методом FDM и выполняется термочувствительный анализ методом конечных элементов на основе данных программы печати в виде g-кода.

Затраты на изготовление оснастки, выполненной 3D-печатью по технологии FDM, оценивают по следующей формуле:

$$A_{\text{принт}} = P_{\text{пр}} \cdot T_{\text{п}} + P_{\text{пласт}} \cdot V_{\text{осн}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{пр}}$ – стоимость работы принтера за 1 ч, руб.; $T_{\text{п}}$ – продолжительность работы принтера, ч; $P_{\text{пласт}}$ – стоимость материала для печати, руб./м³; $V_{\text{осн}}$ – объем напечатанной оснастки, м³.

Продолжительность работы 3D-принтера оценивается по формуле

$$T_{\text{принт}} = \frac{Z \cdot V_{\text{печ}}}{S_{\text{печ}}}, \quad (5)$$

где Z – коэффициент заполнения объема (вполне достаточно заполнить 30%); $V_{\text{печ}}$ – печатаемый объем пластика (определяется по компьютерной модели), м³; $S_{\text{печ}}$ – скорость печати, м³/ч.

Производительность 3D-печати зависит от размеров экструдера, толщины слоя и скорости движения экструдера. Для сравнения выбраны: экструдер диаметром 3 мм, толщина наплавленного слоя 1 мм и скорость движения экструдера 60 мм/с. Таким образом, скорость печати $S_{\text{печ}}$ оказалась равной 0,000648 м³/ч.

Технологии MJM и PJ. Технология струйной печати появилась относительно недавно и применяется во многих областях – от биопечати до многокомпонентного производства функциональных деталей. Печать фотополимерами реализуют с помощью технологий MJM (Multi Jet Manufacturing) и PJ (PolyJet). Несмотря на широкий спектр применения, эти технологии все еще мало распространены, отчасти по причине действия патента и монополии компании Objet Geometries на изготовление такого оборудования. Поэтому стоимость принтеров для струйной 3D-печати приблизительно в 40 раз больше, чем принтеров FDM, а материал для печати (фотополимер) в 10–20 раз дороже, чем пластик для FDM-принтеров. Однако возможности этой технологии представляют интерес, и при снижении стоимости на материал и оборудование ее применение будет оправданно.

Сущность процесса струйной печати заключается в нанесении жидкого фотополимера на предыдущий слой (или на подложку) и отверждении под ультрафиолетом. Фотополимер наносят с помощью печатающей головки с большим количеством сопел. Благодаря возможности нанесения слоев толщиной ~0,01 мм, поверхность деталей получается очень гладкой, с шероховатостью в диапазоне $R_a \approx 0,9–2,2$ [13, 14]. Таким образом, отсутствует необходимость в дополнительной обработке получаемых деталей, достаточно будет провести грунтование и покраску формообразующих поверхностей оснастки. Применяемые фотополимеры и их характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2

Применяемые фотополимеры для струйной 3D-печати

Материал	Максимальная температура эксплуатации, °С	Стоимость, руб./л
Конструкционные – FullCure 720/835/840/850 RGD5160-DM	45–60	~20000
Для поддерживающих структур – FullCure 705 (водорастворимый)	–	~10000

Таблица 3

Примеры аддитивного оборудования

Наименование оборудования	Технология	Приблизительная стоимость	Размеры рабочей области (X, Y, Z), м
3Dpunlimited 3DP1000	FDM	17 000 USD (1 120 000 руб.)	1×1×0,5
SUMPOD MEGA XL Version 2	FDM	10 000 gbp (850 000 руб.)	1,8×1×1,4
BigRep One.2	FDM	36 000 EUR (2 700 000 руб.)	1×1×1,1
Царь 3D-принтер	FDM	500 000 руб.	1,2×1,2×1,2
Objet1000	PolyJet	600 000 USD (40 000 000 руб.)	1×0,8×0,5

Производительность принтеров для струйной печати зависит от количества сопел печатающей головки и толщины наносимого материала. В свою очередь время, необходимое для изготовления детали, зависит в большей степени от высоты этой детали (вдоль направления выращивания). По данным работы [15] скорость печати по технологии PolyJet составляет в среднем 9 мм/ч при толщине слоя 28 мкм.

Затраты на изготовление оснастки, выполненной струйной 3D-печатью, оценивают по той же формуле (4), что и для технологии FDM.

Продолжительность печати может быть оценена по формуле

$$T_{\text{принт}} = \frac{Z_{\text{max}}}{S_{\text{печ}}}, \quad (6)$$

где Z_{max} – максимальный габаритный размер в направлении Z, мм; $S_{\text{печ}}$ – скорость печати, мм/ч.

Возможной проблемой при использовании фотополимеров может стать поводка деталей из-за усадки пластика при отверждении, поэтому процесс печати фотополимерами также нуждается в математическом моделировании.

Примеры доступного аддитивного оборудования представлены в табл. 3. Следует отметить, что существует большое количество 3D-принтеров, работающих по технологии FDM, в то время как только один принтер по технологии PolyJet подходит для изготовления оснастки (данные об оборудовании взяты из открытых научно-технических источников).

Сравнение технологий

Для выбора наилучшего способа изготовления оснастки сравним эффективность каждого метода. Критериями эффективности являются стоимость оснастки и время на ее изготовление. Стоимость оснастки складывается из стоимостей материалов и работы оборудования. Затраты на зарплату рабочим не учитываются, так как они предполагаются приблизительно одинаковыми для всех технологий. В качестве примера рассмотрим матрицу нижней внешней обшивки крыла для легкого многоцелевого самолета [6], которая изображена на рис. 3, а также изготовление формообразующих элементов, так как силовой каркас изготавливают одинаково для каждой рассматриваемой технологии. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

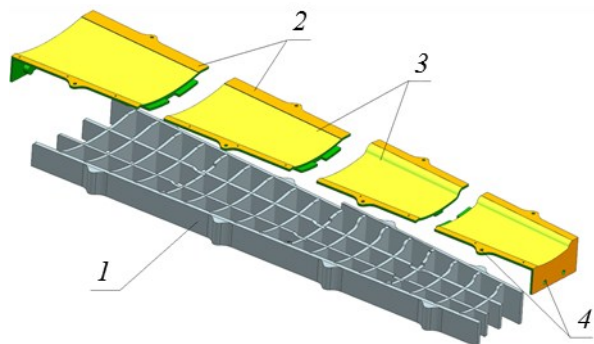


Рис. 3. Составная матрица нижней внешней обшивки крыла:

1 – силовой каркас; 2 – базовые поверхности; 3 – формообразующие поверхности; 4 – базовые отверстия

Стоимость изготовления оснастки по разным технологиям

Технология	Время на изготовление, ч	Стоимость изготовления деталей, тыс. руб.		
		за материал	за работу оборудования	Итого
Фрезерование	172	266	70	336
3D-печать по технологии FDM	71	57	9	66
3D-печать по технологии PolyJet	511	723	1401	2124

Видно, что технология FDM лидирует по всем позициям и представляет интерес для производства. В то же время технология PolyJet оказалась не только очень дорогой, но и низкопроизводительной. Таким образом, технология FDM наиболее подходит для изготовления крупногабаритной оснастки.

Одним из перспективных является направление с постобработкой поверхности при использовании технологии FDM. Существуют несколько видов постобработки для получения гладкой поверхности: шпатлевание и шлифование, химическое оплавление, чистовое фрезерование.

При шпатлевании поверхности используется ручной труд и, как следствие, качество готовой детали будет зависеть от квалификации рабочего. В то же время этот метод увеличивает трудоемкость, пропорциональную площади чистовой поверхности. Так, на доводку 1 м² поверхности необходимо в среднем 1,5 ч.

При химическом оплавлении деталь помещается в атмосферу, насыщенную парами растворителя. Эта технология подходит только для пластиков, которые могут быть растворены каким-либо веществом. Для PLA-пластика такими растворителями являются дихлорэтан и дихлорметан, которые обладают умеренной токсичностью. Для пластика ABS растворителем является ацетон. Нейлон, поликарбонат и пластик PET-G обладают химической стойкостью и не растворяются. В то же время при химическом травлении возможна деформация детали, поэтому процесс требует дополнительного контроля и исследования влияния режимов обработки на точность контура. Процесс также требует как можно меньшей толщины наплавленного слоя, известны случаи качественного применения при толщине 0,1 мм. Это требование значительно увеличит время, необходимое для изготовления детали.

При фрезеровании вновь возникает потребность в использовании дорогостоящего фрезерного оборудования, что практически сводит к нулю все преимущества аддитивной технологии. В данном случае только повышенный коэффициент использования материала может уменьшить стоимость оснастки. Примером такого подхода является компания Local Motors, которая изготовила корпус автомобиля на 3D-принтере, а затем фрезерованием была достигнута гладкая поверхность

[12]. Другим подходом является использование специального аддитивного оборудования, в котором в одном устройстве совмещены экструдер и фрезер, – примером развития такой технологии является SDM-технология (Shape Deposition Manufacturing) [16].

В то же время существуют разработки, направленные на уменьшение шероховатости напечатанных деталей с помощью изменения стратегии печати. Так, в работах [17–19] предлагается при печати финишной поверхности направлять сопло экструдера эквидистантно детали, формируя тем самым гладкую поверхность. При этом процесс разделяется на два этапа: сначала печатается слой за слоем большая часть детали – силовая (или поддерживающий каркас), затем экструдер оформляет чистовую поверхность, совершая трехкоординатное движение вдоль образующих сечений поверхности. Данный подход позволяет существенно сократить продолжительность печати с использованием режимов с повышенной производительностью (увеличенная толщина слоя и диаметр сопла). При этом шероховатость зависит только от параметров печати чистовой поверхности. В работе [17] предлагается математическая реализация этого процесса с алгоритмом генерации управляющей программы. Реализация этого подхода на практике описана в работах [18, 19].

Заключения

По результатам исследования можно сделать вывод, что применение аддитивных технологий при изготовлении формообразующей оснастки оправдано и приведет к снижению затрат на ее изготовление. Наиболее перспективной технологией является FDM, при использовании которой затраты на изготовление оснастки снижаются в 6–7 раз для деталей малой кривизны типа обшивки крыла. Время, необходимое для изготовления оснастки, уменьшится в 3–4 раза.

Для дальнейшей разработки технологии изготовления оснастки аддитивными методами необходимо провести математическое моделирование процесса по одной из существующих методик и напечатать полноразмерный опытный образец оснастки. Актуальной задачей также является создание FDM-принтера, который был бы способен автоматически создавать детали с гладкой поверхностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблочников Е.И., Грибовский А.А., Пирогов А.В. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литьевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов // *Металлообработка*. 2013. №5–6. С. 74–80.
2. Рыбкин В.А., Щербаков А.В., Шерышев М.А. Применение аддитивных технологий в технологической подготовке производства для литья термопластичных полимерных материалов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. №11. С. 99–101.
3. Лунев А.С., Бушуев Д.В., Горб Ю.Ю., Батина Н.А. Внедрение аддитивных технологий в литейном производстве авиационной компании «Прогресс» // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2016. №3 (28). С. 99–105.
4. Лопатин А.Н. Проект легкого туристического самолета // *Аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов: тез. докл. XVI Всерос. школы-семинара СибНИА (Седова заимка, 28 февраля–2 марта 2018 г.)*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. С. 24–26.
5. Wisnom M.R., Gigliotti M., Ersoy N. et al. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures // *Composites: Part A*. 2006. Vol. 37. P. 522–529.
6. Лопатин А.Н. Модернизация производства легкого летательного аппарата: дис. ... магистр. Новосибирск, НГТУ, 2018. 71 с.
7. Ahna D., Kweona J.-H., Kwonb S. et al. Representation of surface roughness in fused deposition modeling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. P. 5593–5600.
8. ANSYS Additive Print [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-additive-print> (дата обращения: 01.03.2019).
9. ANSYS Additive Suite [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-additive-suite> (дата обращения: 01.03.2019).
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. P. 1087–1096.
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.
12. Kunc V., Compton B., Simunovic S., Duty C. et al. Numerical Simulation of Big Area Additive Manufacturing (3D Printing) of a Full Size Car // *SAMPE Journal*. 2015. Vol. 51 (4) P. 27–36.
13. Cazo A., Morer P., Matey L. PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties // *Proc. IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2014. Vol. 228 (12). P. 1664–1675.
14. Rupinder Singh Process capability study of PolyJet printing for plastic components // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011. Vol. 25 (4). P. 1011–1015.
15. Rimašauskas M., Rimašauskienė R., Balevičius G. Development of the intelligent forecasting model for manufacturing cost estimation in PolyJet process // *Materials of 9th International DAAAM Baltic Conference «Industrial Engineering» (Tallinn, Estonia, April 24–26, 2014)*. 2014. P. 175–180.
16. Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B., Yang S. Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review // *Virtual and Physical Prototyping*. 2013. Vol. 8 (1). P. 19–50.
17. Jin Y., Du J., He Y., Fu G. Modeling and process planning for curved layer fused deposition // *Journal of Additive Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 33. P. 78–87.
18. Allen R.J.A., Trask R.S. An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot // *Additive Manufacturing*. 2015. Vol. 8. P. 78–87.
19. Chakraborty D., Reddy B.A., Choudhury A.R. Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling // *Computer-Aided Design*. 2008. Vol. 40. P. 235–243.