

## ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ

М. А. Дремухин✉, В. Н. Наговицин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Рассматривается процесс применения аддитивных технологий при изготовлении крупногабаритной формообразующей оснастки. Предполагается сократить сроки изготовления и трудозатраты рабочих путем применения нетрадиционных технологических систем при изготовлении модели формообразующей оснастки, которая имеет качественно новые свойства и возможности, а также существенно повышает уровень автоматизации и интенсификации производственных процессов. При проектировании технологического процесса необходима высокая информационность и компьютеризация, определенный уровень электрификации и энергообеспечения, поэтому проектирование новых технологий базируется на рациональных технологических процессах с использованием накопленного опыта и нового системного подхода, разработанного на единстве технологий проектирования производства с помощью CAD/CAE/CAM систем. За основу изготовления формообразующей оснастки был принят экструзионный метод трехмерной печати по технологии FDM (Fused Deposition Modeling) с применением нового модифицированного материала марки PA12CF. Данный материал представляет собой композитный пластик из полиамида-12, армированный углеродными волокнами. Применение аддитивных технологий с использованием современного компьютерного моделирования, в основе которого лежит единство технологических систем, является актуальной задачей. Данные технологические системы позволят значительно повысить производительность, сократить занимаемые оборудованием производственные площади, уменьшить длительность производственного цикла, сократить число рабочих, занятых в производстве, и осуществить возможность перехода к технологиям, не требующим конструкторской документации в бумажном виде. Вместе с тем аддитивные технологии являются открытыми к дальнейшему их развитию и имеют большой потенциал эволюционировать и модифицироваться в соответствии с изменяющимися внешними условиями на рынке труда.

Ключевые слова: формообразующая оснастка, 3D-модель, аддитивные технологии, 3D-печать.

### Введение

Аддитивное производство, или 3D-печать, – процесс создания трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе их цифровых моделей с требуемым комплексом свойств [1]. Концепция 3D-печати основана на построении объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры изготавливаемой модели. В результате послойного добавления можно получить деталь, которая ничем не отличается от детали, полученной

тем же литьем или фрезерованием [2]. Самым распространенным методом 3D-печати является экструзионный метод по технологии FDM (Fused Deposition Modeling) или FFF (Fused Filament Fabrication). Популярность метода вызвана достаточно низкой стоимостью оборудования и расходных материалов для печати [3]. Свое широкое применение 3D-принтеры получили во многих областях промышленности, включая военную, автомобильную и аэрокосмическую.

С каждым годом стоимость 3D-принтеров постепенно снижается, а качество конечного продукта, точность позиционирования и скорость печати наоборот стремительно повышается. Как правило, материал является основой всего произ-

✉ d-max\_70@mail.ru

водства, так как из него в будущем будет изготавливаться деталь или изделие [4]. По мере развития данной отрасли появляется возможность применения и внедрения новых материалов для 3D-печати, а также их сочетание с уже имеющимися материалами открывает большие перспективы в промышленности. Сейчас с помощью аддитивных технологий можно изготавливать изделия как из металлических, так и из полимерных материалов [5].

Аддитивное производство стремительно развивается и вскоре может полностью заменить традиционные способы обработки материала, такие как литье под давлением, штамповка или фрезерование на станках с ЧПУ. Так как аддитивные технологии эффективны как технологически, так и экономически, они очень удобны для современной промышленности. При использовании аддитивных технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации (в любом виде – в промежуточном или в готовой продукции) находятся в единой технологической цепи, в которой каждая технологическая операция может быть выполнена в цифровой области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE), механообработки (CAM). Совокупность этих систем позволила реализовать потенциал аддитивных технологий. Практически это означает реальный переход к «бесбумажным» технологиям, когда для изготовления детали в принципе не требуется бумажная чертежная документация.

Таким образом, применение в качестве основной технологии аддитивной позволит ускорить процесс проектирования новых изделий и их производство, а как итог – уменьшить их временные, стоимостные и массовые характеристики, а также обеспечит высокую устойчивость и надежность функционирования по заданному алгоритму работы.

## 1. Постановка задачи

Формообразующая оснастка (ФО) должна быть изготовлена при помощи трехмерной печати по технологии FDM с использованием 3D-принтеров за счет расплавления нити пластика в экструдере и послойного выращивания изделия путем наплавления материала на рабочую поверхность слой за слоем, воссоздавая форму электронной модели. В качестве материала модели должны быть применены современные модифицированные высокотемпературные инженерные пластики, а именно филаменты на основе полиамида с наполнителем в виде углеволокна марки PA12CF. Материал представляет собой композитный пластик из полиамида-12, армированный углеродными волокнами. В зависимости от габаритов изделия необходимо выбрать оборудование для 3D-печати с размерами рабочей области, кото-

рая позволит напечатать модель ФО целиком или с разделением модели на минимальное количество частей.

Упрощенный процесс, протекающий в данной технологии, можно описать следующими шагами:

1. Проектирование дизайна (конструкции) 3D-модели;
2. Выбор оборудования для 3D-печати;
3. Доработка электронной 3D-модели для трехмерной печати;
4. Преобразование 3D-модели в G-code и ее подготовка в слайсере для 3D-печати.

## 2. Описание конструкции электронной 3D-модели

Для 3D-печати была спроектирована 3D-модель ФО, которая была использована в качестве исходной электронной модели для трехмерной печати [6]. 3D-модель оснастки изображена на рис. 1.

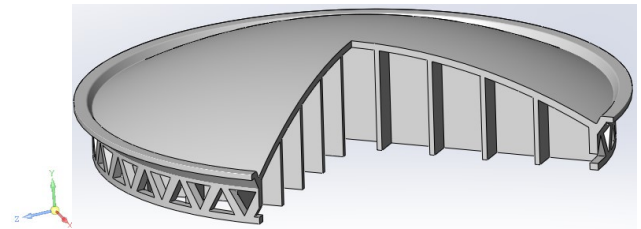


Рис. 1. 3D-модель оснастки

3D-модель оснастки состоит из формообразующей поверхности (ФОР), которая включает в себя формообразующую криволинейную часть толщиной 20 мм, повторяющую геометрию изготавливаемого с помощью нее изделия и переходящую во вспомогательную прямолинейную часть, которая заканчивается бортом. ФОР оснастки устанавливается на опорную структуру, с тыльной стороны которой вдоль линии, эквидистантной границе перехода криволинейной части в прямолинейную, установлено основание с толщиной стенки 60 мм и с выполненными технологическими отверстиями в виде треугольников, предназначенных для облегчения веса конструкции. Дополнительно основание усилено поддерживающим каркасом в виде решетки из 16 ребер жесткости с толщиной стенки ребра 35 мм.

## 3. Выбор оборудования для 3D-печати

Был произведен поиск и выбор 3D-принтера для 3D-печати среди российских производителей. В результате был найден максимально близко удовлетворяющий всем предъявленным требованиям производственный 3D-принтер модели

Magnum серии RX-2, обладающий наибольшей среди аналогов рабочей зоной и позволяющий печатать крупногабаритные объекты сложной формы с высокой точностью детализации, а также способный работать с инженерными пластиками по технологии FDM и FFF с рабочей зоной для печати 2000×1200×1200 (Д×Ш×В) мм. Общий вид 3D-принтера изображен на рис. 2.

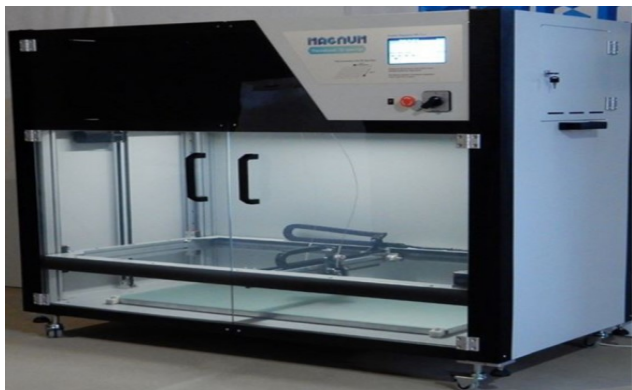


Рис. 2. Общий вид 3D-принтера

#### 4. Доработка электронной 3D-модели для печати на выбранном оборудовании

Для изготовления формообразующей оснастки на данном оборудовании 3D-модель была разбита на 6 частей (сегментов) с последующей сборкой этих сегментов в единую конструкцию. 3D-модель одного из сегментов представлена на рис. 3.

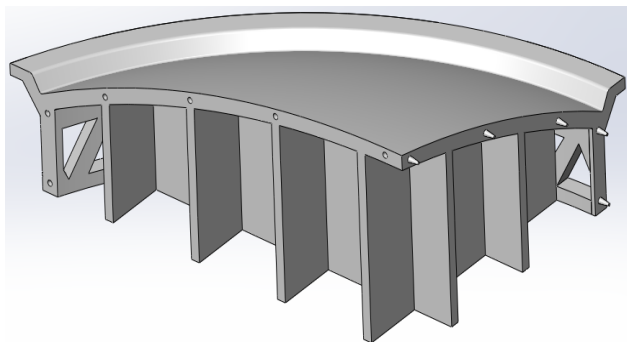


Рис. 3. 3D-модель сегмента оснастки

Для сопряжения сегментов между собой был выбран метод склеивания. На качество клеевого соединения филламентов влияет и клей, и выбранный процесс склеивания, а также то, насколько качественно проведена обработка поверхности перед соединением. В качестве клеевого состава был использован цианакрилатный клей на основе эфира цианакриловой кислоты марки Permabond C802, который является высокоэффективным клеем низкой вязкости, специально разработанным для обеспечения устойчивости к повышенным температурам, достигающим 180 °С, выдерживая

при этом высокую прочность соединения под нагрузкой до 25 МПа.

Для увеличения точности центрирования и для исключения торцевого перемещения при соединении сегментов между собой было применено коническое соединение с натягом. Данный вид соединения обеспечивает центрирование сопрягаемых между собой сегментов путем запрессовки наружного конуса во внутренний, который зависит от разности (до сборки) диаметров внутреннего и наружного конусов в их поперечных сечениях, совмещаемых после фиксации осевого положения. При конусном соединении не требуется приложения больших усилий для соединения, а также допускается выполнение (при необходимости) однократной разборки до нанесения клеевого состава на торцевую поверхность. Благодаря этим свойствам можно получить высокопрочные клеевые швы с зазором порядка 0,1 мм при условии хорошей стыковки сопрягаемых поверхностей.

#### 5. Технология изготовления модели на 3D-принтере

Созданную с помощью САД-системы 3D-модель сегмента подготовили к печати с помощью САЕ-системы, а затем загрузили в формате STL в программное обеспечение (слайсер), в котором была выполнена обработка трехмерной цифровой модели.

3D-модель с помощью слайсера преобразовали в G-code, затем оператором вручную сориентировали наиболее подходящим образом в виртуальном пространстве рабочей камеры для печати, нарезали на тонкие слои в соответствии с последовательностью выкладывания пластика на рабочую поверхность стола 3D-принтера [7]. Были сгенерированы поддерживающие структуры (из специального материала поддержки), необходимые для печати нависающих элементов и отделяемых от модели вручную по завершении процесса печати [8]. Условное расположение сегмента в виртуальной камере рабочего стола 3D-принтера показано на рис. 4.

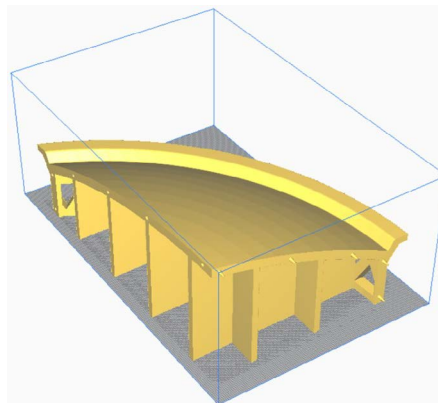


Рис. 4. Виртуальное расположение сегмента оснастки на столе 3D-принтера



Поэтапный процесс построения модели с учетом выбранных настроек слайсера представлен на рис. 5–8.

На рис. 5 показан первый слой печати, который является очень важным при печати на любом 3D-принтере. Очень важно, чтобы первый слой распечатки надежно прикрепился к платформе (столу) принтера, так как является связующим слоем между платформой и моделью, все остальные слои будут использовать его как фундамент, на котором будет печататься непосредственно сам сегмент.

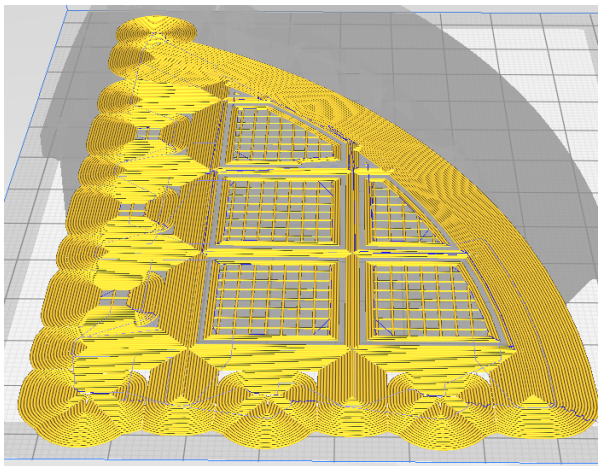


Рис. 5. Первый слой печати сегмента оснастки

Для печати первого слоя было применено стандартное сопло диаметром 0,8 мм. Чем меньше значение, тем поверхность будет более гладкой, а слоистость менее заметной, но при этом скорость печати значительно снижается. Высоту слоя для улучшения адгезии выбирали равной половине диаметра сопла. Ширина линии выбрана равной толщине сопла, чтобы линии ложились как можно плотнее друг к другу. Установили более низкую скорость печати, на 50 % медленнее, чем остальные слои, чтобы слой хорошо прикрепился к поверхности платформы. Температуру нагрева экструдера и платформы выбрали с запасом на 5 °C от рекомендованных значений производителя для исключения моментов, когда на термисторе уже нужная температура, а поверхность стола еще не успела прогреться, при этом температура начала и конца печати не должна быть меньше нижнего предела для выбранного пластика [9]. Также был выбран тип прилипания первого слоя к столу, который называется каймой – несколько линий, печатаемых вокруг модели, тем самым увеличивая площадь соприкосновения и улучшая адгезию модели со столом [10].

Процесс выбора шаблона для поддержек является сложным, требующим большого опыта работы с 3D-принтерами, подбирается для каждой модели индивидуально [11]. В качестве шаблона поддержек был выбран вариант зигзаг, он удаля-

ется легче и быстро печатается. Размещение поддержек выбираем только от стола. Угол нависания поддержек служит для их фильтрации, это угол между вертикалью и касательной к поверхности, при котором начинают строиться поддержки, в нашем случае угол равен 55°. Количество линий стенки поддержки выставили равной единице, это поможет увеличить их прочность, чтобы они не деформировались и не отваливались во время печати. Толщина каждой линии стенки, а также их количество – параметры, связанные между собой, чем больше линий, тем выше прочность. Зазор поддержки по оси  $y$  установили 0,2 мм, по оси  $z$  – 0,5 мм, эти зазоры необходимы для того, чтобы модель не слипалась с поддержкой, и ее можно было потом легко отделить. Чем больше зазор, тем легче будет отделить, но тем ниже качество и прочность нижней поверхности, которая будет печататься на этих поддержках. Связующий слой всегда включаем, он помогает добиться лучшего качества нависающих областей. Плотность связующего слоя и дна установили на 70 %. Чем больше, тем лучше качество, но сложнее будет отделять. Толщину слоя заполнения поддержек выбираем в два раза превышающую слой печати самой модели, поскольку высокий уровень детализации в данном случае не нужен, а плотность их заполнения устанавливаем на 25 %, чтобы сократить время печати.

Охлаждение печатаемых слоев модели производится на всем протяжении печати с помощью вентилятора, скорость которого ставим исходя из типа пластика и мощности системы, при этом порог переключения на повышенную скорость большого влияния на процесс печати не оказывает. Начальную скорость вентилятора – это скорость на первом слое – выбрали минимальной и равной 15 % от максимальной. Если модель охлаждается слишком быстро, будет происходить деформация и пластик по краям модели может начать отлипать от платформы [12]. Поэтому для обеспечения надежного прилипания пластика к поверхности стола 3D-принтера обдув модели включается только после третьего слоя печати с постепенным увеличением скорости работы вентилятора.

Выбор данных параметров обеспечит увеличение площади соприкосновения модели со столом, улучшит адгезию первого слоя, обеспечит надежное прилипание материала к столу 3D-принтера, тем самым создаст надежное основание для печати самого сегмента.

На рис. 6 представлен 456-й слой печати ребер жесткости с основанием оснастки до формирования рабочей поверхности с отбортовкой, а также показан процесс печати поддержек, где видно, что они занимают достаточно большое пространство.

Поэтому для снижения временных и денежных затрат при печати будем использовать второй

экструдер, что позволит увеличить скорость печати. В качестве материала для поддержек будем использовать специальный ABS-пластик, который почти в два раза дешевле филаментов на основе полиамида и обладает необходимыми прочностными характеристиками для печати поддержек сегмента.

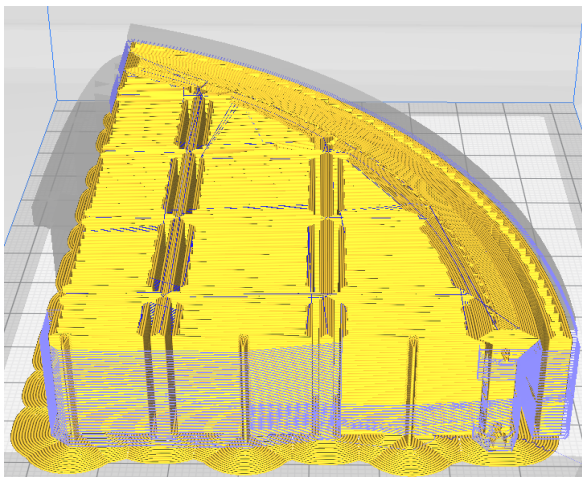


Рис. 6. 456-й слой печати сегмента оснастки

Плотность заполнения ребер жесткости с основанием подбиралась исходя из соображений скорости печати, прочности и расхода материала, в нашем случае плотность заполнения ребер удалось снизить в два раза. В качестве шаблона заполнения выбрали шестигранники, так как у них отношение прочности к количеству пластика одно из самых лучших, а соединение линий заполнения с основным контуром позволило значительно снизить нагрузку с экструдера и повысить прочность изделия. Процент перекрытия заполнения – это то, на сколько линии заполнения заходят на оболочку модели, тем самым позволяя обеспечить отсутствие зазоров между слоями. Исходя из размеров оснастки и толщины линий, выбрали 3 мм. Выбранная толщина слоя заполнения позволила печатать более толстыми слоями, чем внешние периметры, т. е. заполнение будет печататься только на каждом втором слое, но вдвое толще. Ввиду этого значительно повысится скорость, при этом, не влияя на качество модели.

Высокая скорость печати зависит от принтера, насколько он откалиброван и в частности от его конструкции. Большая скорость влияет на качество изделия, что приводит к образованию смещения слоев при печати [13]. При печати ребер с основанием скорость выставили 90 %, скорость заполнения выставили на 5 % выше. Также скорость перемещения экструдера внутри рабочей камеры должна быть в пределах разумного для кинематики выбранного принтера, слишком большая скорость чаще всего приводит к проскакиванию ремня или пропуску шагов, приводящие к смещению слоев [14].

Иногда крайне нежелательно, чтобы сопло двигалось по уже напечатанным частям, так как может задеть или оставить борозду на уже пропечатанных слоях детали [15]. В этом случае включаем режим комбинга, который заставляет слайсер искать пути перемещения таким образом, чтобы избежать уже напечатанных участков. Дистанция обхода – это то, на каком расстоянии от модели будет двигаться сопло. 1 мм вполне хватает.

Выбор данных параметров позволяет значительно сократить время на печать заданных слоев при сохранении прочностных свойств конструкции и с сохранением межслойной адгезии, а также позволяет значительно снизить массу сегмента из-за уменьшения плотности заполнения силового каркаса сегмента.

На рис. 7 представлен 764-й слой печати с уже пропечатанной отбортовкой и показан процесс печати рабочей поверхности оснастки.

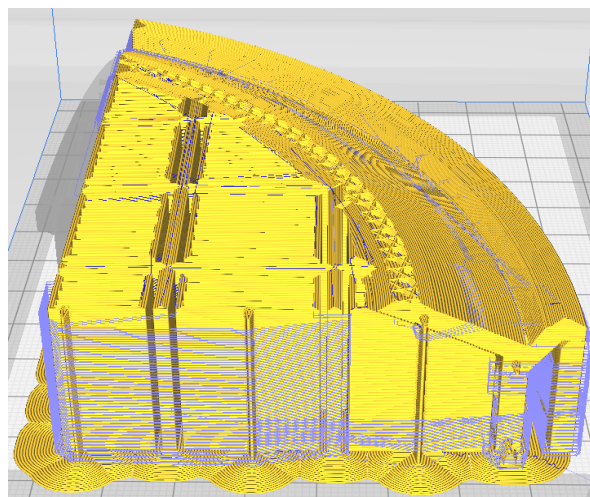


Рис. 7. 764-й слой печати сегмента оснастки

Печать рабочей поверхности выполнили тонкими слоями с высотой слоя печати равной половине диаметра сопла со скоростью в 55 % и плотностью заполнения в 68 %.

Параметр «Выравнивание шва по оси y» очень важный, так как наличие шва очень портит рабочую поверхность модели. Сам шов возникает из-за того, что внешний периметр не замкнут и место, в котором берет начало и находит конец каждый новый слой совпадают в одной точке. В этой точке происходит смена слоя, в результате которой осуществляется подъем сопла, из которого просачивается некоторая часть печатающего материала. Из-за этого образуются небольшие скопления пластика на рабочей поверхности изделия, которые придавливаются новым слоем, образуя комок, выступающий наружу, тем самым формируя шов.

Для того чтобы убрать шов необходимо начинать печатать каждый новый слой в определенном месте. С помощью слайсера по координатам в ручном режиме были выбраны необходимые ме-

ста точек на поверхности модели, с которых должен был печататься каждый новый слой.

Выбор данных параметров позволяет напечатать рабочую поверхность с менее шероховатыми (ступенчатыми) переходами между слоями, но при этом значительно увеличивает время печати.

На рис. 8 показан последний слой печати (1147-й), когда сегмент полностью напечатан.

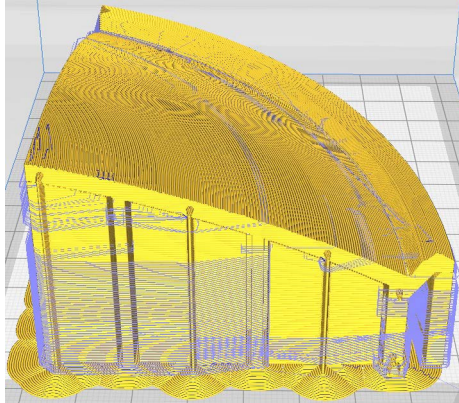


Рис. 8. Готовая модель сегмента

Расчетное время печати сегмента составило 49 дней 18 часов. Количество слоев при печати – 1147 штук. Вес модели напечатанного сегмента с учетом материала поддержек составил 305 кг, без поддержек – 208,5 кг.

По данному принципу печатаются остальные сегменты ФО. Суммарное время на изготовление 6-ти сегментов на одном 3D-принтере с учетом его настройки и подготовки к печати составляет 1 год. При этом расчетный вес оснастки без учета материала поддержек составляет 1271 кг.

## Заключение

В результате была послойно проработана 3D-модель спроектированной ФО для трехмерной печати по технологии FDM. Данная технология позволяет сократить ручной труд и необходимость делать чертежи и расчеты на бумаге, а также устранить выявленные недостатки не в процессе создания изделия, а непосредственно при разработке 3D-модели в слайсере перед 3D-печатью. Широкое разнообразие применяемых материалов, формирования слоев и их соединений позволяет печатать функционально новые элементы ФО, выдерживающие воздействие агрессивных сред, высокую температуру, интенсивные механические нагрузки.

Полученный результат позволит выполнить сравнительный анализ с другими существующими методами и выбрать наиболее подходящий способ изготовления ФО, который будет удовлетворять заданным требованиям.

## Список литературы

- [1] Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие, 2013. С. 4–35.
- [2] Смирнов В. В., Барзали В. В., Ладнов П. В. Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности // Опыт ФГБОУ УГАТУ. Новости материаловедения. Наука и техника. № 2 (14), 2015. С. 23–27.
- [3] Курынцев С. В., Нагулин К. Ю., Горунев А. И. Аддитивные технологии третья индустриальная революция // Научные технологии в машиностроении. 2016. С. 39–44.
- [4] Kuryntsev S. V. The influence of pre-heat treatment on laser welding of T-joints of workpieces made of selective laser melting steel and cold rolled stainless steel // Optics & Laser Technology. 2018. pp. 59–66.
- [5] Зотов О. Ю., Фролов Д. А. Особенности метода изготовления изделий путем послойного наплавления материала // Ученый XXI века. 2016. № 1 (14). С. 7–11.
- [6] Дремухин М. А., Наговицин В. Н. Разработка и моделирование неметаллической формообразующей оснастки для изготовления полимерных композиционных рефлекторов спутниковых антенн // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5. № 4. С. 183–190.
- [7] Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМ, 2015. С. 63.
- [8] Gajdos I., Slota J. Influence of Printing Conditions on Structure in FDM Prototypes // Tehnicki Vjesnik. 2013. no. 20 (2). pp. 231–236.
- [9] Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
- [10] Кушнир Н. В., Кушнир А. В., Геращенко А. М., Тыртышный А. В. История и технологии трехмерной печати // Научные труды КубГТУ. 2015. № 5.
- [11] Barnatt C. 3D-Printing: The Next Industrial Revolution. Explaining The Future.com, 2013. 276 p.
- [12] Evans B. Practical 3D-Printers: The Science and Art of 3D Printing. Apress, 2013. 332 p.
- [13] Larson H., Kurman M. Fabricated: The New World of 3D-Printing. Wiley, 2013. 280 p.
- [14] McMahon C. 3D-Printing: Second Edition. Imagine Publishing Ltd., 2013. 116 p.
- [15] Sheppard K. 3D-Printing. Tebbo, 2012. 174 p.



## APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING FOR PRODUCTION OF FORM-FORMING RIGGINGS

**M. A. Dremukhin, V. N. Nagovitsin**

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

*The article discusses the process of using additive technologies in the manufacture of form-building equipment. It is supposed to reduce the manufacturing time and labor costs of workers by using non-traditional technological systems in the manufacture of the form-building equipment's model, which has qualitatively new properties and capabilities and also significantly increases the level of automation and intensification of production processes. When designing a technological process high information and computerization, a certain level of electrification and energy supply are required, therefore, the design of new technologies is based on rational technological processes, using accumulated experience, and a new system approach developed on the basis of the unity of production design technology using CAD/CAE/CAM systems. The extrusion method of three-dimensional printing using the FDM technology with the use of a new modified material of the PA12CF brand was adopted as the basis for the production of form-building equipment. This material is a polyamide-12 composite plastic reinforced with carbon fibers. The use of additive technologies using modern computer modeling based on the unity of technological systems is an urgent task. These technological systems will significantly increase productivity, reduce the production area occupied by equipment, reduce the duration of the production cycle, reduce the number of workers employed in production, and make it possible to switch to technologies that do not require paper-based design documentation. At the same time, additive technologies are open to their further development and have great potential to evolve and be modified in accordance with the changing external conditions on the labor market.*

*Keywords: forming equipment, 3D model, additive manufacturing, 3D printing.*

### References

- [1] Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylin I. N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroyeni* [Additive technologies in mechanical engineering]. 2013, pp. 4–35. (In Russian)
- [2] Smirnov V. V., Barzali V. V., Ladnov P. V. *Perspektivy razvitiya additivnogo proizvodstva v rossijskoj promyshlennosti* [Prospects for the development of additive manufacturing in the Russian industry] // Experience of FGBOU USATU. Materials science news. Science and technology, 2015, no. 2 (14), pp. 23–27. (In Russian)
- [3] Kuryntsev S. V., Nagulin K. Yu., Gorunov A. I. *Additivnye tekhnologii tret'ya industrial'naya revolyuciya* [Additive technologies third industrial revolution] // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2016, pp. 39–44. (In Russian)
- [4] Kuryntsev S. V. The influence of pre-heat treatment on laser welding of T-joints of workpieces made of selective laser melting steel and cold rolled stainless steel // Optics & Laser Technology, 2018, pp. 59–66.
- [5] Zotov O. Yu., Frolov D. A. *Osobennosti metoda izgotovleniya izdelij putem poslojnogo naplavljeniya materiala* [Features of the method of manufacturing products by layer-by-layer deposition of the material] // Scientist of the XXI century, 2016, no. 1 (14), pp. 7–11. (In Russian)
- [6] Dremukhin M. A., Nagovitsin V. N. *Razrabotka i modelirovanie nemetallicheskoj formoobrazuyushchej osnastki dlya izgotovleniya polimernyh kompozicionnyh reflektorov sputnikovyyh anten* [Development and modeling of non-metallic form-forming rigger for manufacture of polymer composition reflectors for satellite antennas] // Spacecrafts & Technologies, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 183–190. doi: 10.26732/j.st.2021.4.01. (In Russian)
- [7] Valetov V. A. *Additivnye tekhnologii (sostoyanie i perspektivy)* [Additive technologies (state and prospects)]. St. Petersburg, ITM University, 2015, P. 63. (In Russian)
- [8] Gajdos I., Slota J. Influence of Printing Conditions on Structure in FDM Prototypes. Tehnicki Vjesnik, 2013, no. 20 (2), pp. 231–236.
- [9] Zlenko M. A., Nagaytsev M. V., Dovbysh V. M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroyeni* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, SSC RF FSUE «NAMI», 2015, 220 p. (In Russian)

- [10] Kushnir N. V., Kushnir A. V., Gerashchenko A. M., Tyrtysny A. V. *Istoriya i tekhnologii trekhmernoj pechati* [History and technology of three-dimensional printing] // Scientific Works of the Kuban State Technological University, 2015, no. 5.
- [11] Barnatt C. 3D-Printing: The Next Industrial Revolution. Explaining The Future.com, 2013, 276 p.
- [12] Evans B. Practical 3D-Printers: The Science and Art of 3D Printing. Apress, 2013. 332 p.
- [13] Larson H., Kurman M. Fabricated: The New World of 3D-Printing. Wiley, 2013, 280 p.
- [14] McMahon C. 3D-Printing: Second Edition. Imagine Publishing Ltd., 2013, 116 p.
- [15] Sheppard K. 3D-Printing. Tebbo, 2012, 174 p.

## Сведения об авторах

28

*Дремухин Максим Андреевич* – инженер АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский федеральный университет в 2021 году. Область научных интересов: разработка и проектирование крупногабаритных изделий.

*Наговицин Василий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент межинститутской базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» Сибирского федерального университета, главный специалист по прочности антенных систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Пермский государственный университет имени М. Горького в 1977 году. Область научных интересов: механика композиционных материалов.