

УДК 621.7

С. В. Аджамский, З. В. Сазанишвили, Ю. В. Ткачев

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ПОВЫШЕНИЕ ГИБКОСТИ ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Розглянуті перспективні напрямки підвищення гнучкості дослідно-експериментального й одиничного виробництва виробів космічної техніки. Проаналізовані актуальні проблеми об'ємного друкування металевими порошками й формування виробів з композиційних матеріалів, а також автоматизації обробки на верстатах із ЧПУ. Зроблені висновки про те, що впровадження вказаних технологій у виробничий процес доцільно в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва для розробок в галузі космічного інжинірингу комерційного призначення.

Ключові слова: *адитивні технології, металевий порошок, намотування, станки верстати з ЧПУ, космічний інжиніринг.*

Рассмотрены перспективные направления повышения гибкости опытно-экспериментального и единичного производства изделий космической техники. Проанализированы актуальные проблемы объемной печати металлическими порошками и формирования изделий из композиционных материалов, а также автоматизации обработки на станках с ЧПУ. Сделаны выводы о том, что внедрение указанных технологий в производственный процесс целесообразно в условиях единичного и мелкосерийного производства для разработок в области космического инжиниринга космического назначения.

Ключевые слова: *аддитивные технологии, металлический порошок, намотка, станки с ЧПУ, космический инжиниринг.*

Perspectives of increasing flexibility of pilot experimental and single-piece production are considered. Topical problems of metallic 3D printing and forming of composite material products, as well as processing of metals by numerically controlled machine tools are analyzed. A conclusion is made as for practicability of use of additive technologies, forming of composite materials by filament winding and implementation of NC machine tools in manufacturing process on the way of commercialization of the space engineering field.

Keywords: *additive technologies, metal powder, winding, NC machines, space engineering.*

Введение.

Коммерциализация разработок в области космического инжиниринга в современных условиях определяет вектор на использование экономичных инженерно-технических решений при разработке и производстве изделий космической техники, повышение гибкости производства, снижение затрат на изготовление специальной оснастки и нестандартного оборудования. На ряду с традиционными технологиями обработки (литье, механическая обработка,

штамповка и пр.) и сборки (сварка, пайка, клепка) необходимо внедрять энерго- и ресурсосберегающие технологические процессы; стремиться создавать конструкции, позволяющие снизить объем сборочных работ, таким путем повышать уровень технологичности конструкции в целом.

Формулирование целей и постановка задачи.

Целью данной работы является анализ современных технологий, которые способствуют повышению гибкости производства. Для этого необходимо рассмотреть преимущества и недостатки технологий, таких как объемная печать металлическими порошками (аддитивное производство), формообразование изделий из композиционных материалов, обработка деталей на станках с ЧПУ.

Аддитивное производство.

Одним из комплексных решений для достижения поставленной цели может быть применение технологий и процессов аддитивного производства для изготовления деталей сложных узлов и агрегатов, например, для камер сгорания двигателей, некоторых элементов пневмогидравлической системы и других деталей сложной формы.

Аддитивное производство обеспечивает:

- сокращение цикла разработки – от конструкторской документации до готовой детали, другими словами, быстрое прототипирование цифровой модели в реальном материале с минимальными затратами времени и средств на технологическую подготовку производства;
- сокращение расходов, или отсутствие необходимости вообще, в закупке или проектировании и производстве специального оборудования и оснастки;
- повышение гибкости производства на этапе изготовления опытных образцов, в том числе при необходимости внесения изменений в геометрические характеристики деталей;
- осуществление механической обработки только на финишных операциях, связанных, например, с подготовкой внутренней поверхности камеры сгорания и мест ее стыковки с трубопроводами пневмогидравлической системы, тем самым сведения производственных отходов к минимуму, приближения коэффициента использования материала к 100%;
- сокращение количества деталей в изделии, а, следовательно, существенное снижение трудоемкости сборочных работ, исключение из технологического процесса ресурсоемких сборочных операций пайки и сварки, а также контроля их качества;
- сокращение общего количества наименований технологического оборудования на производственном участке, а также уменьшение количества рабочих, используемой производственной площади и потребляемых энергоресурсов.

Практический опыт показал, что цельно-напечатанные элементы двигательной установки по технологии Micro Laser Sintering (микролазерное спекание) обеспечивают расчетные параметры при эксплуатации изделий и, следовательно, точность полученных геометрических размеров и форм, а

физико-механические свойства материала соответствует показателям для заготовок, полученных механической обработкой, штамповкой и т. п.

Остановимся более подробно на характеристиках аддитивных процессов. В общем случае в аддитивном производстве для изготовления элементов конструкции изделий исходными материалами являются металлические порошки с максимальным характерным размером частиц до 100 мкм.

В настоящее время не существует общих требований к металлопорошковым композициям, применяемым для объемного послойного формообразования деталей, а методы оценки свойств материалов, полученных традиционными технологиями, не могут быть применены в силу наличия анизотропии, неизбежной при послойном формообразовании деталей. Разные компании-производители 3D-принтеров рекомендуют свой перечень материалов с различным фракционным составом собственного производства.

Проблема получения порошковых материалов актуальна не только для развития аддитивных технологий, но и для целей порошковой металлургии. В последние годы отмечается значительный интерес к объемным наноматериалам, это обусловлено тем, что их конструкционные и функциональные свойства значительно отличаются от свойств крупнозернистых аналогов, в связи с чем нанопорошковые материалы могут быть эффективно использованы для целей аддитивных технологий.

За рубежом вопросы стандартизации материалов для аддитивных технологий находятся в компетенции таких организаций, как NIST – National Institute of Standards and Technology, ISO – International Organization for Standardization (комитет TC261 по аддитивным технологиям) и ASTM – American Society for Testing and Materials (международный комитет F42 по аддитивным технологиям). В настоящее время разработан только стандарт ASTM F2924 на материал Ti-6Al-4V для применения в технологиях Powder Bed Fusion.

Основным параметром, характеризующим порошок, является средний диаметр частиц – d . Например, в принтерах Phenix Systems используется порошок с $d = 10$ мкм; принтеры компании Concept Laser работают с порошками, дисперсность которых лежит в пределах 25 – 52 мкм при $d = 26,9$ мкм; для устройств, выпускаемых Arcam, размер частиц составляет 45 – 100 мкм, а для принтеров компании SLM Solutions – $d = 10 – 30$ мкм и т.д. Следует отметить, что при снижении значения величины d обеспечивается лучшая рельефность и проработанность мелких элементов детали, поверхность изделия становится более гладкой. В тоже время, при слишком малом размере частиц порошка, в процессе построения легкие частицы будут «вылетать» из зоны воздействия лазера за счет введения в эту зону избыточного количества энергии, что приведет к повышению шероховатости детали и микропористости материала в целом. Для предотвращения попадания частиц, вылетающих из зоны воздействия, на сплавленные участки поверхности строящегося слоя внутри рабочей камеры создают направленный «ветер», сдувающий вылетевшие частицы в сторону, что может привести к слишком интенсивному

выносу «строительного материала» из зоны построения. Поэтому при работе с мелкодисперсными порошками со средним диаметром менее 10 мкм применяют маломощные лазеры, а, следовательно, низкопроизводительные. Вышеуказанные порошки в сочетании с соответствующими настройками оборудования применяют для изготовления мелких деталей, производство которых иным способом невозможно [1].

Практика показывает, что сферическая форма частиц порошка обеспечивает более компактную укладку частиц в определенный объем, а также лучшую «текучесть» порошковой композиции с минимальным сопротивлением в системах ее подачи.

В процессе лазерного синтеза, например, по технологии Selective Laser Melting (селективное лазерное плавление) или Selective Laser Sintering (селективное лазерное спекание) при построении детали лазерный луч не только «соединяет» частицы порошка, формируя деталь, но и «портит» частицы порошка, непосредственно прилегающие к поверхности этой детали. В таких системах печати применяют методы просеивания отработанного порошка с целью удаления из него «испорченных» частиц. Затем очищенный от «испорченных» частиц порошок смешивается с новым порошком. Поскольку пропорции смешивания устанавливает каждая компания индивидуально, то идентичность свойств материала деталей, напечатанных на одном и том же принтере, не гарантирована.

Формообразование изделий из композиционных материалов.

Следует также отметить, что постоянное стремление к снижению массы изделий космической техники, непосредственно связано с применением неметаллических конструкционных композиционных материалов.

Основными элементами конструкции, изготавливаемыми из композиционных материалов, могут быть топливные баки и сосуды высоко давления; переходные, хвостовые, приборные отсеки; элементы двигательной установки; теплозащитные покрытия, которые можно получать с использованием различных технологий, например, намотки и выкладки [2].

Технология намотки может быть применена в производстве баллонов высокого давления различной формы; емкостей для хранения и транспортирования химически активных жидкостей; сосудов Дьюара; труб различного назначения; аэродинамических обтекателей и т. д.

Исходными данными при проектировании изделий, изготавливаемых намоткой, являются: длина изделия; наружный диаметр; рабочий объем; рабочее давление; давление разрушения; количество полюсных отверстий (одно или два); равенство или различность полюсных отверстий; форма днища.

Взяв за основу исходные данные, в частности эксплуатационные свойства, материаловед совместно с химиком осуществляют выбор армирующего волокна и связующего. Также следует брать во внимание, что изготовители волокон производят их предварительную обработку под рекомендуемое ими же связующее для повышения степени пропитываемости, улучшения смачиваемости и пр.

В ракетной технике в качестве армирующих волокон используют углерод, стекло, кевлар, базальт, органику, как связующее – эпоксидные, фенолформальдегидные, фурфурольные, полиэфирные смолы и т.д.

На свойства композиционных материалов влияют следующие факторы:

- материал применяемых волокон и их химический состав;
- объемная доля наполнителя;
- состояние поверхности волокна;
- механические свойства наполнителя и матрицы;
- адгезионные характеристики связующего и свойства межфазных слоев;
- равномерность натяжения волокон в процессе намотки;
- температура и время процесса отверждения.

Расчетчик совместно с технологом определяют математическую схему намотки для участков поверхности с различной геометрией, с учетом коэффициента трения и механических свойств нити. Далее производится расчет прочности исходя из свойств однонаправленного волокна с учетом радиальных и осевых углов намотки, а также последующей кольцевой подмотки стыковочных и прочих закладных элементов. Следует учесть тот факт, что при использовании различных материалов необходимо вносить поправки в алгоритмы намотки, исходя из механических свойств. Например, при намотке углеродных нитей необходимо снижать угол укладки в связи с их хрупкостью и низкой прочностью на изгиб.

Расчетная модель учитывает математически идеальную геодезическую намотку, которая на практике трудно реализуется. Намотка по схеме близкой к геодезическим линиям применяется только для равнополюсных конструкций. На этапе разработки технологии расчетным путем выбирают углы, скорость и другие параметры намотки. При расчетах прочностных свойств необходимо ввести коэффициент безопасности 1,25...1,30.

При выборе технологии намотки важно учитывать направление приложенных нагрузок, например, при изготовлении баллонов, коконов (осевые нагрузки) используют «мокрую» спиральную намотку, а во время подмотки (радиальные нагрузки) рационально применять метод «сухой» кольцевой намотки.

Исходя из имеющегося оборудования, данная технология требует конструирования технологической оснастки и специальных приспособлений. В процессе отработки конструкций изделий возможно использование многоразовых металлических разъемных оправок, одноразовых песчано-полимерных оправок или лейнеров.

Программисты обеспечивают разработку управляющей программы для ЧПУ. Намотка одного изделия требует разработки 5 – 6 управляющих программ с последующей наладкой при изготовлении опытного образца. Количество управляющих программ определяется геометрией изделия, свойствами волокна, количеством используемых схем намотки, а также этапов – в случае большого различия в геометрии можно наматывать фрагменты

изделия по различным схемам с промежуточной механической обработкой для удаления излишков материала.

При отсутствии лайнера необходимо выбрать химически нейтральный (к компоненту в ёмкости) герметизирующий слой. Герметичность ёмкостей для хранения жидкостей можно контролировать масс-спектрометрическим методом. Степень негерметичности по отношению к гелию должна составлять 10^{-6} – 10^{-18} л·мкм/с в зависимости от длительности хранения в наполненном состоянии и физических свойств жидкости. Обеспечение герметичности осуществляется подмоткой промежуточных слоев из резины, вулканизируемой с изделием, стеклофольги – специального материала на основе свинца и поликарбонатных компонентов.

Лейнер может быть изготовлен из стали на токарно-давальном станке обкаткой при локальном нагреве из бесшовной трубчатой заготовки либо иметь сварную конструкцию. При доступности материалов лейнер может быть изготовлен из алюминиевого сплава или пластика.

На завершающем этапе изготовления изделий методом намотки химик назначает технологические режимы отверждения, в частности определяет физические процессы, – термические, химические (полимеризация, поликонденсация, мономеризация и другие) – необходимые для получения заданных свойств полученного композиционного материала.

Испытания образцов и изделия в целом проводятся на всех этапах разработки:

1. Испытание одноосных волокон на прочность.

2. Определение механических свойств полученного композиционного материала. Для каждой пары связующего и наполнителя необходимо изготавливать эталонные образцы.

2. Намотка колец диаметром 300 мм с последующей вырезкой образцов для прочностных испытаний полученного композиционного материала.

3. Гидравлические испытания всех готовых конструкций при 75% от рабочего давления и выборочно до разрушения.

4. Неразрушающий контроль:

– контактный метод – дефектоскоп, укомплектованный дополнительно сканером и системой обработки данных. Недостаток при работе с композитами – высокая шероховатость поверхности изделия не позволяет выявлять истинные дефекты.

– бесконтактный метод, основанный на ультразвуке. Преимущество – создает карту дефектов готового изделия.

Разработка любой конструкции должна начинаться с изготовления масштабных макетов. Такой подход позволяет отработать геометрию, технологию, проверить свойства получаемого материала и провести испытания с минимальными затратами. Это увеличивает длительность подготовки производства.

Следует учесть, что помещение, в котором осуществляется намотка должно соответствовать требованиям по взрывоопасности В-1б (горючие газы

или пары ЛВЖ могут образовать с воздухом взрывоопасные смеси при аварии; аммиачные установки, электролиз воды и т.п.), а помещение, в котором осуществляется отверждение намотанного изделия должно соответствовать требованиям по взрывоопасности В-1а (горючие газы или пары ЛВЖ могут образовать с воздухом взрывоопасные смеси при аварии).

Также формообразование изделий из композиционных материалов намоткой не решает вопросов повышения гибкости производства, так как требует изготовления специальных приспособлений, применяемых для ограниченной номенклатуры изделий.

Автоматизация обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Большую часть конструкции в современных изделиях ракетной техники занимают металлические детали и узлы.

Для металлообработки в условиях экспериментального и единичного производства, когда необходимо выполнять многократную смену инструмента при изготовлении сложных деталей, быстро перенастраивать оборудование, целесообразно применять станки с ЧПУ, а также токарные и фрезерные обрабатывающие центры различной степени сложности. В номенклатуре современных производителей металлообрабатывающего оборудования присутствуют многоосевые токарные и токарно-фрезерные станки с ЧПУ, горизонтальные и фрезерно-расточные центры, вертикальные и горизонтальные обрабатывающие центры, сверлильно-расточные станки, порталные обрабатывающие центры для 5-сторонней обработки крупногабаритных деталей, токарно-карусельные, ленточно-пилочные, а также электроэрозионные станки и др. [3].

Применение станков с ЧПУ позволяет повысить гибкость производства, а именно [4]:

- использовать один станок для изготовления широкой номенклатуры деталей, в том числе при обработке деталей разной формы и размеров;
- изготавливать модифицированные детали без значительных дополнительных затрат на перенастройку, разработку или покупку новых приспособлений.

Внедрение технологий обкатки, раскатки, выдавливания, фланжирования и других формообразующих операций на станках с ЧПУ позволяет отказаться от аналогичных операций штамповки, вытяжки и пр. с использованием материалоемкой оснастки на кузнечнопрессовом оборудовании. Такой подход позволяет изготавливать оболочечные формы (днища, обечайки) широкой номенклатуры, обеспечивать быструю переналадку оборудования.

Выводы.

При экспериментальном и единичном производстве узлов сложной формы рационально применять технологии объемной печати металлическими порошками. Технологии аддитивного производства способствуют быстрому прототипированию, повышению гибкости производства на этапе изготовления опытных образцов, сокращению специального оборудования и оснастки,

общего количества наименований технологического оборудования на производственном участке, а также рабочих и потребляемых ресурсов. Однако внедрение данной технологии требует отработки режимов изготовления, а также применения порошковых металлов определенной фракции.

В условиях постоянного стремления снижения массы изделий ракетно-космической техники целесообразно применение композиционных материалов. Для изготовления тел вращения, в том числе емкостей высокого давления и труб различного назначения рационально применять технологию намотки. Отработка геометрии и технологии, проверка свойств получаемого материала возможна на масштабных макетах, что позволяет снизить затраты на этапе разработки конструкции. Однако, длительная подготовка производства, необходимость изготовления дополнительной оснастки и оправок, особые требования к помещению не способствуют применению технологии намотки при опытно-единичном производстве.

Для повышения точности обработки, снижения времени изготовления детали и человеческого фактора, а также быстрой переналадки оборудования, в единичном производстве целесообразно применение станков с числовым программным управлением.

Анализ перспективных современных технологий показал, что внедрение в производственный процесс аддитивных технологий, а также обработки на станках с ЧПУ целесообразно применять в опытно-экспериментальном и единичном производстве.

Библиографические ссылки

1. Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 272 с.
2. Андрюшкин, А. Ю. Композиционные материалы в производстве летательных аппаратов / А. Ю. Андрюшкин, В. К. Иванов, – Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2010. – 144 с.
3. <http://varius.com.ua/#oborudov>
4. Ткачов, Ю. В. Технологічні основи вибору обладнання машинобудівних цехів: Навч. посіб. / Ю. В. Ткачов, Є. О. Джур, Є. Ю. Ніколенко. – Д.: РВВ ДНУ, 2006. – 136 с.

Надійшла до редколегії 30.05.2017

ЗМІСТ

Ащепкова Н.С. Моделювання взаємодії рухомого робота з зовнішнім середовищем	3
Аджамский С. В., Сазанишвили З. В., Ткачев Ю. В. Повышение гибкости опытно-экспериментального производства изделий космической техники	8
Гайдученко П.А. Инженерная методика определения параметров торовой ёмкости минимальной массы	16
Гусарова И.А. Использование композиционных керамических материалов для жаростойких и теплозащитных конструкций многоразовых космических аппаратов.....	33
Елисеев В.И., Совит Ю.П. Диффузионный массообмен в несмешивающихся жидких электролитах.....	40
Карпович Е. В., Черныш И. А. Определение технологических условий получения бездефектных сварных соединений деталей из титанового сплава вт14 электронно-лучевой сваркой.....	52
Калинин А.В., Носова Т.В., Давидюк А.В., Юшкевич О.П. Влияние микролегирования и модифицирования на структурное упрочнение и свойства сплавов.....	62
Лукашов М.А., Паршин С.А., Ткачев Ю.В., Сазанишвили З.В. Формирование требований к ракетам-носителям сверхлегкого класса в рамках современного рынка пусковых услуг.....	68
Липовский В.И., Линник А.К., Шинкарук В.И. Оптимизация «кейса» топливного отсека орбитальной ступени РН «вега»	78
Золотько О. В., Золотько О. Є., Сосновська О.В., Савченко І.С. Вибір оптимального методу зменшення залишків компонентів палива у баках ракет	91
Лукиша А.П. Методика пересчёта тепло-гидравлических характеристик пористых прямооточных парогенераторов с граничных условий второго рода для граничных условий первого рода.....	97
Лабуткина Т. В., Серпокрьл В. Ю «Оскулирующие трубки», охватывающие группы близких траекторий орбитальных объектов, в задачах прогноза орбитальных столкновений.....	106
Мітіков Ю.О., Іваненко І.С. Новий спосіб боротьби з температурним розшаруванням рідкого кисню в баках ракетних русійних установок.....	127
Полишко С.А. Влияние модифицирования на стабилизацию химического состава и повышение уровня механических свойств колесной стали марки КП-2	134
Седачова Е. Г., Кулик А. В., Убизький Н. Н. Метод решения одномерных задач процессов листовой штамповки при изготовлении элементов конструкций изделий ракетно-космической техники.....	142