

**Секция 19****Производство конструкций  
ракетно-космической техники****МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ  
ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РАКЕТНО-  
КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*А.А.Барзов, В.С.Пузаков, К.Е.Сидельников  
(Московский государственный технический университет  
им. Н.Э.Баумана)*

Под инновационным потенциалом (ИП) будем понимать комплексный критерий, отражающий различные аспекты анализируемой технологии, исследования или разработки, который характеризует их значимость для развития соответствующих отраслей промышленного производства, социальной сферы и т.д. В первую очередь, структура ИП должна отражать результативность применения объекта оценки и его реализуемость в настоящий момент и в ближайшей перспективе.

Анализ показывает, что наиболее актуальна разработка методики количественной оценки ИП для ведущих отраслей машиностроения: ракетно-космической, авиационной и других наукоемких областей производства. Именно реализация ИП технологий, разработанных в этих отраслях, обеспечит максимальную технико-экономическую и социально значимую эффективность общественного развития. В первом приближении ИП можно представить в виде суммы двух основных слагаемых: результативности и реализуемости объекта анализа, которые состоят из суммы субкритериев, конкретизирующих параметры объекта оценки.

При оценке ИП нужно учитывать его кинетический характер, соотносительность субкритериев и относительность всей процедуры расчета ИП конкретной технологии. При математической формализации ИП нужно выделить в его структуре инвариантную и вариативную части, которые с помощью соответствующих весовых коэффициентов позволят получить достаточно взвешенную количественную оценку. Однако трудноформализуемый характер ИП требует применения квалиметрии, в частности, процедуры экспертного оценивания. Не исключено, что в перспективе ИП можно представить в виде некоторого дифференциального

уравнения, решение которого, зависящее от соответствующих начальных условий, даст вполне обоснованную прогностическую оценку ИП.

В качестве примера вышеизложенного, определялся ИП технологии гидрорезания конструкционных материалов РКТ. В результате анализа было установлено, что ИП данной технологии весьма высок, так как ультразвука жидкости может играть роль не только инструмента, но и быть специфическим обрабатываемым материалом. Такое применение технологии ультразвуковой обработки жидкостей, в первую очередь воды и ее производных на порядок превышает ИП классического гидрорезания.

Таким образом ИП – важнейшая характеристика анализируемой технологии РКТ, комплексно отражающая возможности развития данной технологии с целью получения конкретного технико-экономического общественного результата в определенный промежуток времени с учетом материально-финансовых затрат на ее реализацию.

#### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕЩЕННОГО ПОИСКА КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ**

*В.Д.Баскаков*

*(Московский государственный технический университет  
им. Н.Э.Баумана)*

Работа посвящена математической постановке одной из важнейших задач, решаемых при создании новых ракетных и космических летательных аппаратов (ЛА) – обеспечению рациональной точности их изготовления. При этом задача не разделена на конструкторскую (назначение допусков на конструктивные параметры изделия) и технологическую (достижение заданной точности в процессе изготовления ЛА), а направлена непосредственно на поиск производственно – технологических условий (параметры заготовок, технологического оснащения, оборудования, варианты построения технологических процессов и др.), обеспечивающих выполнение требований технического задания заказчика к эксплуатационным характеристикам ЛА. В процессе решения достигается также экстремум целевой функции, роль которой может выполнять себестоимость изделия, трудоемкость его изготовления, материалоемкость и ряд других параметров, в том числе и комбинированных. Допуски на конструктивные параметры ЛА являются промежуточными результатами решения этой задачи.

В работе показано, что частными случаями приведенной математической задачи поиска совмещенных конструкторских и технологических решений являются некоторые важные для практики задачи, в том числе:

1. Выбор рациональных технологических средств повышения эксплуатационных характеристик ЛА с учетом технических и технико-экономических ограничений.

2. Построение рациональных технологических процессов изготовления основных деталей ЛА с учетом обеспечения точностных требований конструкторской документации на изделие.

3. Поиск рациональных технологических средств повышения точности ЛА.

В качестве примера практического использования разработанной математической модели спроектирован рациональный маршрутный технологический процесс изготовления конической оболочечной детали с учетом заданной номенклатуры формообразующих операций.

### ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ГИДРОФОРМОВКЕ

*В.И.Ершов*

*(«МАТИ»- Российский государственный технологический университет им. К.Э.Циолковского)*

При изготовлении деталей типа днищ из листовых заготовок широко используется гидроформовка, то есть штамповка без перемещения фланца.

Возможности процесса ограничиваются разрушением заготовки в зоне, где достигнута наибольшая интенсивность напряжений и получено наибольшее утонение станки, обычно в полюсе заготовки.

Предположим, что разрушение происходит при достижении некоторой критической интенсивности напряжений  $\sigma_1 = \sigma_{ик}$  и соответствующей ей критической интенсивности деформаций  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{ик}$ . Используя уравнение связи напряжения и деформации в виде  $v_\sigma = v_\varepsilon$  (условие постоянства объема), и, принимая во внимание, что интенсивность деформаций связана с максимальной деформацией соотношением  $\varepsilon_{ик} = \beta |\varepsilon_3|$ , где  $\varepsilon_3$  - деформация по толщине заготовки,  $\beta$  - коэффициент Лодэ, получим

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{ик} (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / \beta (\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_3).$$

Величину критической деформации к моменту разрушения с учетом влияния коэффициента жесткости схемы напряженного состояния Г.А. Смирнова – Аляева определим, используя аппроксимацию В.И.Глазкова

$$\varepsilon_{2\max} = \delta_k (2,5 - 2\Pi + 0,5 \Pi^2) (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / \beta (\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_3),$$

где  $\Pi$  – коэффициент жесткости.

При гидроформовке сферического днища, когда в полюсе детали  $\sigma_1 = \sigma_2$ ,  $\sigma_3 \cong 0$ ,  $\Pi = 2$  с учетом простых геометрических соотношений по-

лучим максимальную высоту  $H$  детали в зависимости от максимального удлинения  $\delta_k$  в шейке образца при испытаниях на линейное растяжение:

$$H/d = \{3/16 [(1 + 0,187\delta_k)^2 - 1]\}^{0,5}$$

Проведенные эксперименты на заготовках из алюминиевых, магниевых сплавов, коррозионно-стойких сталей показали, что максимальное различие опытных и расчетных данных не превышает 15%.

Работа подготовлена при поддержке Минобразования по гранту 01.2.00305.923

### СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КОРОБЧАТОЙ ФОРМЫ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*М.В.Ковалевич*

*(«МАТИ»- Российский государственный технологический университет им. К.Э.Циолковского)*

Детали коробчатой формы получили широкое распространение в конструкции летательных аппаратов. Как правило, их изготавливают в инструментальных штампах. Процесс требует нескольких переходов с последующими межоперационными отжигами. Изготовление деталей из титановых сплавов представляет собой особенно сложную задачу.

Одним из способов интенсификации процесса является пневмоматричная формовка деталей коробчатой формы в режиме сверхпластичности. Сущность процесса заключается в формоизменении заготовки газовым пуансоном при определенных температурно-скоростных условиях деформации, соответствующим проявлению у данного сплава эффекта сверхпластичности. Создание контролируемых скоростных условий деформации представляет собой более сложную задачу и требует изменения давления формовки во времени. Зависимость давления формовки от времени называется кривой нагружения. Ее определение и является главной задачей при определении технологических параметров процесса.

Существует два расчетных случая:

- Ячейка. Отношение длины к ширине равно 1.
- Рифт. Отношение длины к ширине больше 2.

Для этих случаев были определены расчетные зависимости для определения кривой нагружения. Расчет ведется методом конечных элементов. В зависимости от текущих толщины заготовки и радиуса очага деформации определяются значения требуемого давления формовки и времени.

Процесс разбивается на три стадии:

1. Свободная формовка купола;
2. Оформление боковой стенки (для высоких рифтов или ячеек) или оформление дна (для низких рифтов или ячеек);
3. Формовка – калибровка углов;

Данные, полученные расчетным путем, были подтверждены в ходе экспериментов.

В дальнейшем планируется более детально изучить случай, когда форма детали является промежуточной между рифтом и ячейкой. Целью является определение зависимости параметров кривой нагружения от отношения длины детали к ее ширине.

### **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОСТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В РАКЕТОСТРОЕНИИ**

*В.С.Пузаков*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

На сегодняшний день среди существующих методов резки различных труднообрабатываемых материалов, используемых в изделиях РКТ, широкое применение нашла технология гидроструйного резания (ГСР). Технология ГСР заключается в использовании сверхзвуковой струи жидкости (ССЖ) в качестве, так называемого, точечного режущего инструмента. Процесс формирования ССЖ происходит следующим образом. Первоначально рабочую жидкость, чаще всего воду, сжимают в системе высокого давления до давлений 2000-3000 бар. Затем сжатая жидкость подается в струеформирующее сопло малого диаметра (0,2-0,5 мм), в результате на выходе из сопла мы получаем ССЖ со скоростью 500 м/с и выше. Для увеличения режущей способности в рабочую жидкость после системы высокого давления добавляют мелкодисперсный абразив, в качестве абразива используют гранатовый или силикатный песок.

При давлениях 200-700 бар технология гидрорезания также используется для очистки загрязненных внешних и внутренних поверхностей струей воды.

Технология ГСР имеет следующие преимущества перед известными технологиями резания материалов: минимальная ширина реза; пожаро- и взрывобезопасность; экологичность процесса. Благодаря своим преимуществам, технология гидрорезания применяется во многих областях промышленности, в частности в ракетостроении для обработки (разрезки) таких материалов, как сталь ( $V_{рез}=20-300$  мм/мин при  $\delta=5-10$  мм), титан ( $V_{рез}=40-250$  мм/мин при  $\delta=8-25$  мм).

В МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан новый способ обработки жидкостей при использовании традиционного гидроструйного оборудования. Было установлено, что при торможении ССЖ о преграду (мишень), выполненную из сверхтвердого материала, происходит активация самой жидкости, то есть в данном случае рабочая жидкость превращается из режущего инструмента в обрабатываемый материал.

В качестве обрабатываемой жидкости использовали бактериально загрязненную смазочно-охлаждающую технологическую среду (СОТС) – 10%-ый эмульсон Укринол-1. Известно, что применение СОТС в ракетостроении и в машиностроении в целом способствует повышению качества обрабатываемой поверхности и стойкости рабочего инструмента. Проведенные эксперименты показали, что обработка СОТС сопровождается диспергированием исходных частиц масляной фракции в 3-5 раз, увеличением антифрикционных свойств ( $\geq 30\%$ ), а главное обеспечивается требуемое снижение бактериального загрязнения после двукратной обработки (микробное число снижается более чем в  $10^3$  раз и не увеличивается в течение минимум 1 года). Данные обстоятельства играют важную роль в процессе использования СОТС при механической обработке материалов, а также при хранении СОТС.

### **РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В ФОРМИРОВАНИИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ РКТ**

*А.В. Сгибнев*

*(Московский государственный технический университет им.*

*Н.Э.Баумана)*

Технологические среды (ТС) являясь неотъемлемой частью системы формообразования, воздействуют на всю совокупность физико-химических процессов, что дает возможность видеть в ТС простой и технологичный рычаг для управления надежностью технологических операций.

Физико-химические воздействия ТС, приводящие к улучшению обрабатываемости материалов, сводятся к смазывающему, охлаждающему, моющему, диспергирующему и защитному действию.

Рассматривая воздействие ТС на любой из конкретных процессов, необходимо учитывать избирательный характер этого воздействия. Ярко выраженная избирательность сред характерна для однокомпонентных ТС, какими являются газы и расплавы.

Использование эффективных составов ТС приводит не только к изменению среднего значения анализируемого параметра (стойкости инструмента), но и снижает дисперсию.

При обработке ряда материалов, например вольфрама, осажденного из газовой фазы (ВГФ) применение жидких ТС вследствие возможности взаимодействия комплекса компонентов ТС и неметаллической графитовой основы. Поэтому для обработки сплавов применяют газовые ТС: аргон, азот.

Параллельно с выбором химсостава ТС стоит вопрос надежного подвода ее в зону обработки. При исследовании влияния подвода газовых технологических сред было осуществлено моделирование условий обтекания потоком ТС инструмента и детали.

Активизация действия традиционных жидких ТС может быть осуществлена наложением ультразвуковых колебаний на поток ТС.

Особый интерес представляет влияние технологических покрытий различных составов TiN, TiN...MoN, TiN...FeN, которые в значительной степени определяют кинетику износа инструмента.

#### **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРОФИЛЕЙ**

*К.А.Макаров*

*(«МАТИ» - Российский государственный  
технологический университет им. К.Э.Циолковского),*

*А.Г.Прохоров*

*(ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное  
производственное объединение им. Ю.А.Гагарина»)*

Необходимость повышения весовой отдачи изделий в самолетостроении потребовала использования в конструкции планера современного самолета профильных деталей, изготавливаемых из высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов и сталей. Значительное количество таких деталей получают гибкой прессованных профилей. В зависимости от их номенклатуры используют различные схемы деформирования.

Одним из наиболее широко распространенных в самолетостроении способов обработки металлов давлением при изготовлении деталей типа полок нервюр, стрингеров, шпангоутов и других является гибка профилей с растяжением. Операция выполняется на профилегибочных станках типа ПГР-6, ПГР-7 и ПГР-8. В настоящее время ведутся работы по внедрению в производство станка ПГР-6А с числовым программным управлением, позволяющим производить гибку профилей в полуавтоматическом режиме.

С целью повышения точности изгибаемых деталей в производстве иногда используют корректированную с учетом пружинения оснастку, т.е. изготавливают обтяжной пуансон такой формы, чтобы после снятия нагрузки с обтянутого по нему профиля последний имел необходимую форму. Для высокопрочных материалов, имеющих высокий модуль упругости и относительно большой разброс механических свойств, величина упругой разгрузки настолько значительна и отличается от расчетных значений, что указанная выше корректировка оказывается малоэффективной. Увеличение же усилия растяжения приводит к разрыву внешней, наиболее растянутой части сечения заготовки.

Одним из наиболее эффективных способов термической интенсификации рассматриваемого процесса является нагрев деформируемого профиля, позволяющий повысить пластические свойства материала заготовки. На Комсомольском-на-Амуре авиационном производственном объединении освоен процесс гибки профилей с растяжением на станке ПГР-7 с применением электроконтактного нагрева заготовки, позволяющий существенно повысить точность изготовления деталей из высокопрочных материалов.

Установка работает так: заготовку устанавливают в изолированные от корпуса зажимные патроны, к которым с помощью специальных шин от силовых трансформаторов типа ТКП 150/2 подводится электрический ток, после чего производится электроконтактный нагрев профиля до необходимой температуры. Затем заготовка подвергается предварительному растяжению и обтяжке по пуансону до заданных размеров. После окончания изгиба выключают нагрев и прикладывают к концам заготовки калибрующее усилие. При этом профиль находится на оправке до полного остывания. Благодаря тому, что профиль изолирован от корпуса с одной стороны асбестовой тканью, а с другой - асбоцементной прокладкой, которые обладают низкой теплопроводностью, удается осуществить обтяжку в нагретом состоянии, что практически полностью устраняет пружинение и повышает точность. Корректировка оснастки и промежуточный отжиг в печах при этом не требуется.

Таким образом, разработанный и внедренный в производство технологический процесс и оснастка для его реализации позволяют повысить точность изготовления гнутых из профилей деталей без корректировки формообразующей оснастки и повысить производительность за счет исключения ручных доводочных операций, что особенно важно для высокопрочных материалов.

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ**

---

**ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ПО  
ПРОФИЛЮ РКТ**

*А.Л.Галиновский, С.С.Чеканов, Н.А.Сахарова  
(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Анализ текущего положения дел в магистратуре и аспирантуре, а именно эти системы обучения являются ключевыми элементами подготовки кадров высшей квалификации в вузовском и послевузовском профессиональном образовании, показывает, что в настоящее время практически отсутствует механизм эффективного взаимного поиска руководителей и консультантов с аспирантами, как очной, так и заочной форм обучения. Этот факт значительно сужает перспективы и потенциальные возможности процесса подготовки кадров, прежде всего в аспирантуре технических и естественно-научных вузов.

В этой связи одним из путей и перспектив развития системы образования и, прежде всего магистратуры и аспирантуры, является разработка и становление комплексной системы по результативному и качественному взаимодействию магистров и соискателей ученой степени с научными руководителями и консультантами в сочетании с повышением общей информационной культуры данных образовательных диад.

Важно отметить, что особую значимость представляют предварительные и ранние этапы образовательного процесса в аспирантуре, связанные, прежде всего, с формированием диады, состоящей из научного руководителя и будущего диссертанта. Уже на этапе обучения на старших курсах магистратуры, т.е. на предварительных этапах обучения в системе послевузовского профессионального образования (ППО), у обучающихся появляется группа принципиально важных вопросов, связанных, во-первых, с выбором и построением дальнейших образовательных траекторий, во-вторых, с нахождением потенциального научного руководителя.

Необходимо отметить, что на практике процесс выбора руководителей и консультантов на этапах курсовых, выпускных, дипломных работ носит во многом формальный характер и в значительной степени ограничен. Зачастую происходит автоматическое распределение групп студентов, бакалавров и магистров среди профессорско-преподавательского состава профилирующей кафедры, желающих в перспективе учиться в системе ППО. Этот факт значительно сужает перспективы и потенциальные возможности процесса подготовки кадров в аспирантуре.

Для решения поставленных проблем предлагается разработка и апробация, на базе управлений аспирантурой и докторантурой ведущих

вузов Москвы, пилотного варианта информационно-аналитической системы (ИАС). Основная задача ИАС заключается в помощи широкому контингенту магистров старших курсов, будущим аспирантам, соискателям ученой степени и их потенциальным руководителям и консультантам находить друг друга исходя из выбранной группы индивидуализируемых критериев и факторов отбора. Причем система обоюдного подбора в реализованном алгоритме и методике функционирования построена таким образом, что учитывает как научно-профессиональную направленность и заинтересованность, так и личностно-психологическую совместимость будущей образовательной диады. Отличительная черта данной ИАС состоит в том, что каждый ее пользователь – научный руководитель (НР) или потенциальный аспирант (ПА) формулируя свои индивидуальные требования к партнеру по научно-образовательной диаде имеет возможность получить необходимые сведения о группе контрагентов, наиболее близко удовлетворяющих этим требованиям. Таким образом, ИАС состоит из постоянно обновляющейся, но инвариантной части (базы данных о НР и ПА) и адаптируемой индивидуализированной структуры поиска наиболее результативных контактов между ними.

Предложенная схема ИАС в перспективе позволит более взвешенно подходить к вопросам планирования и финансирования системы профессионального образования.

### **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО- КОСМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В CAD/CAM СИСТЕМАХ**

*Л.А.Кашуба*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Основополагающие работы в области анализа влияния погрешностей элементов конструкций на интервалы отклонений выходных параметров, соответствующие заданной доверительной вероятности, не позволяют в настоящее время дать достоверный прогноз из-за наличия корреляционных связей между входными параметрами. В данном докладе предлагается в качестве основного элемента моделирования геомет-

рии элементов конструкции использовать независимые параметры поверхностей, ограничивающих эти элементы.

В докладе представлены следующие математические модели.

Модель реальной поверхности, имеющая форму номинальной поверхности и размеры (масштаб) в связанной с поверхностью системе координат, представлена сеткой узлов пересечения параметрических линий  $uv$  или точками пересечения линий следов ортогональных плоскостей. Частота узлов сетки определяется по Фурье-анализу реальной поверхности, сформированной в аналогичных условиях (материал, технология, инструмент, оборудование) и теореме Котельникова. Случайные отклонения формы поверхностей моделируются случайными смещениями узлов номинальной поверхности, которые расположены между двумя поверхностями эквидистантными к номинальным поверхностям на расстоянии поля допуска отклонения формы. По смещенным узлам формируется реальная поверхность интерполированием по Кунсу.

Модель детали, заданная номинальным расположением систем координат  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) поверхностей, ограничивающих деталь в системе координат детали векторами  $R_i$  и матрицей направляющих косинусов  $A_i$  и случайными отклонениями этих параметров в пределах поля допуска отклонений расположения поверхностей.

Модель сборки деталей по сопрягаемым поверхностям в системе координат сборочной единицы.

На основе разработанных моделей стала возможной разработка системы оценок интервалов отклонения параметров отклонений формы, размеров и расположения поверхностей по результатам контроля точек реальной поверхности и системы синтеза допусков на входные параметры, обеспечивающих сборочную взаимозаменяемость и заданные ограничения на входные параметры функциональной взаимозаменяемости.

Для стохастического моделирования взаимозаменяемости разработан аппарат на основе метода Монте-Карло в котором определены виды законов распределения входных параметров на основе теорем Шеннона и количество необходимого числа реализаций на основе непараметрических толерантных пределов, обеспечивающих достоверные и статистически надежные оценки сверху допусков выходных параметров.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ  
ГЕОМЕТРИИ МАСС***Чжао ЧжиХао, Л.А.Кашуба**(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Проблема контроля геометрии масс (определения координат центра масс и параметров положения главных центральных осей инерции) возникла и развивалась в процессе совершенствования технологии ракетно-космической техники. Наиболее сложным и трудоемким оказалось определение положения главных центральных моментов инерции по результатам измерений периодов колебаний на стендах, использующих принцип обращенного унифилярного подвеса типа СИМИ. На этих стендах измеряют период колебания объекта испытаний (ОИ) и технологической оснастки вокруг шести осей, расположенных определенным образом в системе координат ОИ. По известному расположению координат центра масс и вычисленным по результатам измерений шести осевых моментов инерции ОИ без оснастки вычисляют величину и расположение главных центральных моментов в системе координат ОИ.

Точность вычислений зависит от следующих факторов: точности измерений периодов колебаний ОИ с оснасткой, расположения осей измерения в системе координат ОИ и точности вычислений координат центра масс и расположения осей измерения осевых моментов инерции в системе координат ОИ. Были проведены исследования влияния положения осей измерения осевых моментов инерции в системе координат ОИ на точность вычисления величины и расположения главных центральных осей инерции. В качестве моделей использовались математические эталоны ОИ с разным соотношением величин главных центральных моментов инерции, на которых было исследовано влияние различных схем расположения осей измерения моментов инерции в широком диапазоне углов раскрытия конуса расположения осей от  $3^\circ$  до  $60^\circ$  при разной точности измерений, определяемой количеством значащих цифр в мантиссе числа от 2 до 12 значащих цифр. Исследования показали, что в схемах, опубликованных в литературе, имеет место линейная зависимость между уравнениями, используемыми для вычислений главных центральных моментов инерции. Это приводит к большим погрешностям определения параметров главных центральных осей инерции по сравнению с математическим эталоном.

Предложены схемы, в которых нет линейной зависимости. Отмечено, что точность вычислений по этим схемам расположения осей не хуже точности исходных данных в широком диапазоне изменения углов рас-

крытия конуса (от  $6^\circ$  до  $15^\circ$ ) между осями измерения осевых моментов инерции при использовании для вычислений пакета MathCad.

### **ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В CAD/CAM СИСТЕМАХ**

*М.В.Щедрин, Л.А.Кашуба  
(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Традиционные методы технологического проектирования механической обработки деталей машиностроения имеют существенные недостатки. В них не предусмотрены технологические процессы и операции, связанные с обеспечением качества продукции, гарантирующие приемку всех изготовленных деталей на завершающем этапе их изготовления. Эти недостатки определены неполнотой исходных ограничений для обоснования выбора варианта технологического процесса. В состав исходных ограничений традиционно входят материал детали, номинальные значения размеров, параметры свойств и допуски на них, заданные в рабочей конструкторской документации. При проектировании технологии изготовления неявно предполагается, что все средства формирования параметров детали имеют стабильную во времени точность, обеспечивающую требуемые допуски при настройке на середину поля допуска, а средства технического контроля абсолютно точны. В результате такого проектирования получают идеализированный технологический процесс, не учитывающий реальной точности средств производства и не гарантирующий приемлемых затрат и сроков изготовления партии деталей, что неприемлемо в современных условиях.

Основными условиями приемки продукции являются ограничения вероятности ошибочной приемки в состав принятой продукции объектов, параметры которых выходят за рамки поля допуска (риск заказчика). Этот риск обусловлен точностью средств контроля параметров. В исходных данных обязательно должны присутствовать вероятность риска заказчика, допустимая вероятность неисправимого брака точность используемых при изготовлении деталей средств производства и технического контроля, ресурс изделия, поскольку выбор того или иного технологического решения является определяющим для каждого из этих параметров. Всесторонний учет всех исходных данных позволяет спроектировать процесс изготовления детали более полно и в результате оценить пред-

полагаемые затраты и сроки изготовления партии деталей в условиях выбранного типа производства.

Разработан алгоритм проектирования технологии изготовления деталей любой формы в CAD/CAM системах, в котором при отсутствии 3D моделей по двумерным чертежам разрабатываются трехмерные модели, как элементов конструкции, так и заготовок, формируется технологический процесс с учетом ограничений по неисправимому браку и гарантированной приемке по всем параметрам с заданным риском заказчика, формируются 3D модели заготовок и определяются продолжительность изготовления партии деталей в условиях заданного типа производства на станках с ЧПУ, а также затраты на механическую обработку детали без учета заработной платы обслуживающего персонала.

### **ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ И МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ТОРОВОЙ ФОРМЫ**

*М.А.Комков*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Композитные и металлокомпозитные торовые баллоны относятся к новым наиболее перспективным баллонам высокого давления. Они хорошо komponуются в изделиях различного назначения, обладают наилучшими весовыми характеристиками, имеют большие возможности дальнейшего совершенствования и организации серийного производства.

Изложены теоретические основы проектирования, технология и средства изготовления орбитальной намоткой композитных и металлокомпозитных оболочек торовых сосудов давления. Показана перспектива применения металлокомпозитных торовых баллонов давления в изделиях ракетно-космической техники, а полимерно-композитных торов - в дыхательных аппаратах и газобаллонных автомобилях. Представлены результаты НИОКР, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Приведены результаты испытаний [1] внутренним давлением до разрушения (20...24 МПа) опытных образцов стеклопластиковых торовых баллонов объемом 3,2...5,4 литра, на которых получено снижение массы в 3,25...3,75 раза по сравнению с их металлическими аналогами. Изготовлены опытные (объемом до 5,4 литра) и натурные (объемом 60 литров) образцы металлокомпозитных торовых баллонов и проведены их испытания внутренним давлением до разрушения. Получено снижение массы на опытных и натурных комбинированных торовых баллонах в 1,85...2,25 раза по сравнению с их металлическими аналогами.

В настоящее время для дыхательных аппаратов используются стальные или металлокомпозитные 3-х...9-ти литровые цилиндрические баллоны массой 4...12 кг, эксплуатируемые при давлениях 20...24 МПа. В то же время, эргономические испытания дыхательных аппаратов с баллонами торовой формы на спине человека (подъем по лестницам, перемещения ползком, прохождение люков, водных стоков, разбор завалов и др.), показали [2] значительные преимущества применения торовых баллонов по сравнению с цилиндрическими баллонами.

Перспективно также применение композитных торовых баллонов для хранения сжатого природного газа или метана (СН<sub>4</sub>) в газобаллонных автомобилях. Так стеклопластиковый торовый баллон объем 50 литров при рабочем давлении 20...24 МПа обеспечит пробег автомобиля, например, ГАЗ-2407 не менее чем на 100 км. Если же метан охладить до криогенной температуры равной -162°С, то в баллоне на 50 литров при 90% его заполнении будет запасено более 29 кубометров газа, что обеспечит пробег автомобиля ГАЗ-2407 не менее чем на 250...270 км пути.

Литература

1. Комков М.А. Определение конструктивных и технологических параметров намотки композитных баллонов торовой формы. – М.: МГТУ, 2000. - 24с.
2. Cook J. and Chambers J. Toroidal pressure vessels for breathing apparatus. Paris, 19- International Conference SAMPE Europe, April 1998, pp 125-132.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВКИ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАЛОЖЕСТКИХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

*Н.В.Полухин, (РКК «Энергия»)*

*В.А.Тарасов, А.С.Филимонов*

*(Московский государственный технический университет им.*

*Н.Э.Баумана)*

Важной задачей изготовления мало жестких конструкций ракетно-космической техники является обеспечение точности положения реперных точек поверхностей конструкций по отношению к теоретической поверхности. Корректировка положения реперных точек конструкций достигается путем их принудительного перемещения с помощью специальных конструктивных элементов или технологической оснастки в сторону теоретической поверхности с погрешностью, не превышающей допуск.

Однако при проведении регулировки положения любой точки мало жесткой конструкции соседние точки будут изменять достигнутое по-

ложение в силу конечной жесткости ее элементов, внося погрешность в достигнутую точность формы поверхности. Большое количество регулируемых точек, неравенство числа контролируемых и регулируемых точек вызывает затруднение при регулировке методом проб и ошибок.

Для осуществления процедуры корректировки формы поверхности конструкции создано программно-математическое обеспечение регулировки положения ее реперных точек, которое включает в себя:

- методику подготовки баз данных коэффициентов взаимного влияния смещения реперных точек конструкции;
- методику пересчета координат реперных точек в фактические погрешности их положения;
- методику определения совокупности компенсирующих смещений реперных точек из условия требуемой точности;

Программно-методическое обеспечение позволяет:

- создавать базы данных исходных погрешностей положения точек поверхности маложесткой конструкции и эталона путем пересчета измеренных координат этих точек в системе координат теодолитов;
- назначать совокупность регулировочных смещений, которые допускают независимую реализацию.

Программно-методическое обеспечение необходимо для автоматизированного управления процессом регулировки формы поверхности антенны на сборочном участке.

## **ЛЕГКОВЕСНЫЕ ТЕПЛОЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

*М.П.Тимофеев, В.А.Тарасов, Ю.В.Смирнов, З.И.Свиридова  
(Дмитровский филиал Московского государственного технического  
университета им. Н.Э.Баумана)*

Высокая надежность, пожаробезопасность и экологическая чистота теплоизоляции в экстремальных температурных условиях являются основными требованиями, предъявляемыми к современным теплоизоляционным материалам для авиа-космической техники. Этим требованиям удовлетворяют теплозвукоизоляционные материалы на основе базальтовых, каолиновых, кварцевых волокон и их композиций на неорганическом связующем, разработанные в МГТУ им. Н.Э.Баумана. Отработаны технологические процессы изготовления изделий в виде плит, картона и фасонных изделий.

Применение материалов: атомная энергетика, машиностроение, промышленное оборудование, строительство, судостроение, авиа и раке-

тостроение, транспорт, криогенная техника, пищевая и медицинская промышленность и т.д.

Основные преимущества предлагаемых тепловозвукоизоляционных материалов:

- высокие тепловозвукоизоляционные характеристики;
- низкий коэффициент теплопроводности;
- экологическая чистота и негорючесть материала;
- инертность к агрессивным средам;
- низкая объемная масса;
- технологичность сборки.

МГТУ им. Н.Э.Баумана предлагает заинтересованным сторонам различные формы сотрудничества, связанные с освоением промышленного производства по выпуску экологически чистой и негорючей теплоизоляции, а также готовую продукцию, отвечающую заданным Заказчиком требованиям.

### **ВЫБОР РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ СО СВЕРХВЫСОКИМИ СКОРОСТЯМИ РЕЗАНИЯ**

*В.М.Корнеева, С.С.Корнеев*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Развитию механической обработки присуща тенденция к повышению скоростей резания. Современный уровень состояния станкостроения вполне может обеспечить резкое повышение скоростей обработки. Существующие фрезерные станки имеют приводы главного движения с частотами вращения свыше 50000 об/мин, и рабочую подачу свыше 10 м/с. Однако возможность повышения скоростей резания при обработке лезвийным инструментом различных конструкционных материалов ограничивается низкой стойкостью инструмента, обусловленной достаточно низкой температурой его красностойкости.

Проведенный теплофизический анализ и разработанная на его основе математическая модель теплового состояния режущего инструмента в условиях обработки со сверхвысокими скоростями до 300 м/с, т.е. скоростями на порядок и более превышающими используемые в настоящее время в производстве, показали, что в условиях прерывистой обработки, которые можно обеспечить в производственных условиях при фрезеровании, подбором периодизации процесса можно управлять тепловым режимом операции, обеспечивая наименьшую степень теплового воздействия на инструмент и наибольшую его стойкость.

Это подтвердили результаты экспериментальных исследований, в результате чего был разработан способ обработки металлов резанием со скоростями свыше 50 м/с [1] и определена методология выбора режимов резания.

Разработанная методика выбора режимов обработки лезвийным инструментом со сверхвысокими скоростями резания позволяет реализовать процесс в условиях производства, обеспечивая приемлемую, т.е. технологически обоснованную, стойкость инструмента из существующих в настоящее время инструментальных материалов.

Литература

1. А.С. 1222420 (СССР). Способ обработки металлов резанием / В.М. Корнеева, С.С. Корнеев // Б.И.-1986. -№13.

## ЛОКАЛЬНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРУБ

*А.С.Чумадин, М.В.Горюшина  
(«МАТИ»- Российский государственный технологический  
университет им. К.Э.Циолковского)*

Методы локального деформирования нашли широкое применение в обработке металлов давлением. Они позволяют не только снизить деформирующее усилие и мощность технологического оборудования, но в ряде случаев повысить пластические свойства деформируемого сплава за счет создания благоприятной схемы напряженного состояния материала (с большой долей сжимающих напряжений).

При деформировании концевых участков труб эффективными являются методы ротационно-давяльной обработки.

Увеличение диаметра концевой части трубы осуществляется путем сжатия (утонения) стенки трубы от  $S_0$  до  $S_k$ , деформируемой между оправкой и давяльным роликом в локальном очаге деформации. Вращающаяся оправка обеспечивает вращение всей трубы и поэтапное деформирование ее концевой части.

Преимуществом процесса раскатки по этой схеме является то, что он осуществляется в условиях сжатия материала стенки трубы. Это, по сравнению с другими способами раздачи трубы, обеспечивает большие предельные деформации, особенно при деформировании сварных труб.

Схема ротационно-давяльной обработки для уменьшения концевой части трубы следующая. Деформирование (обжим) трубы осуществляется путем осевой подачи трубы в зазор, образованный вращающейся

оправкой и прижимным роликом. Подача трубы производится за счет сил трения путем смещения оси вращения заготовки относительно оси вращения оправки. Заготовка сначала зажимается между оправкой и прижимным роликом на пластически недеформируемом участке трубы и приводится во вращение оправкой.

Результаты экспериментальных работ по ротационному обжиму сварных водопроводных труб показывают, что диаметр исходной трубы может быть уменьшен на 20-25%. Разрушение сварного шва при этом, как правило, не наблюдается. Дальнейшее формоизменение ограничивается возможностями осевой подачи заготовки.

Эксперименты проводились на специально спроектированной опытной установке. Технические характеристики установки:

- минимальный диаметр деформируемой трубы – 20 мм;
- максимальный диаметр – 55 мм;
- максимальная толщина стенки – 5 мм;
- длина зоны обработки – 20-60 мм;
- число оборотов приводной оправки – 140 об/мин;
- максимальное усилие давящего ролика – 3, 75 т.

### **РОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ РКТ**

*Липин Ню, В.А.Тарасов*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

В практике плазменного напыления покрытий считается, что остаточные напряжения существенно уменьшают прочность сцепления покрытия с поверхностью детали РКТ, вызывая снижение функциональных показателей покрытия. Специфика формирования газотермических и, в особенности, плазменных покрытий, состоит в быстром нагреве ( $10^{-3}$  –  $10^{-4}$  с) и более быстром охлаждении на подложке ( $10^{-3}$  –  $10^{-6}$  с). В связи с этим, процессы кристаллизации затвердевающих частиц не успевают пройти в стационарном режиме.

Целью данной работы является обоснование аналитических моделей формирования остаточных напряжений в системе “деталь-покрытие” на базе численного анализа с помощью программного продукта “NASTRAN”.

В процессе остывания частицы, в силу эффекта термического сжатия, происходило ее деформирование. Распределение и область проникновения остаточных напряжений в материал детали изучались путем анализа результатов расчета напряженно-деформированного состояния.

В расчете варьировались толщина покрытия  $\delta$ , радиус торца детали  $R$ , температуры  $T_n$ ,  $T_o$  и коэффициенты термического расширения  $\psi_n$ ,  $\psi_o$  покрытия и основы для разных пар “деталь-покрытие”, а условный перепад температуры  $T$  принят равным  $\psi T = \psi_n T_n - \psi_o T_o$ . Получены распределения напряжений и в центральной области, и на границе системы “деталь-покрытие” а также глубина проникновения остаточных напряжений в детали.

При варьировании напыляемых материалов и условий напыления найдены независимые безразмерные комплексные величины, независимые от выборов материалов, в том числе, безразмерные компоненты напряжений и глубина проникновения напряжения в деталь. Аналитические зависимости остаточных напряжений с высокой точностью соответствуют результатам численного расчета.

Численное исследование формирования остаточных напряжений в системе “деталь-покрытие” позволило обосновать и уточнить аналитические зависимости для оценки компонент остаточных напряжений; на основе численной оценки остаточных напряжений в покрытии указана возможность управления ими путем изменения технологических режимов плазменного напыления.

### УСЛОВИЯ БЕЗДЕФЕКТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ КЕРАМИК

*В.Б.Чуйкова*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Применение лазерного луча для обработки керамических материалов стало объектом пристального внимания благодаря уникальным возможностям этой технологии. Однако до сих пор широкое внедрение этой прогрессивной технологии сдерживается отсутствием надёжного лазерного оборудования, систематизированных данных по влиянию на результаты обработки параметров лазерного луча, свойств и состояния обрабатываемой керамики, технология системы обработки и т. д.

Лазерная обработка оказывает мощное термическое воздействие, приводящее к возникновению поля термоупругих напряжений и формированию специфического микрорельефа поверхности. Поэтому физические явления, происходящие при лазерной обработке, оказывают существенное влияние на показатели качества керамических деталей.

Для решения проблемы по лазерной бездефектной обработке деталей из конструкционных керамик необходимо разработать инженерные методики определения технологических режимов бездефектной лазерной обработки неметаллов. Основу данных методик составляет определение такого режима лазерного воздействия на материал детали, при котором глубина изменений поверхностного слоя пренебрежимо мала по сравнению с диаметром лазерного луча. Итогом методики является получение критерия бездефектной обработки. Данный критерий с учетом статистического распределения исходных дефектов позволит с вероятностных позиций определить режимы бездефектной обработки неметаллических материалов.

Следовательно, построение эмпирической зависимости концентрации дефектов от их величины (функции распределения экстремальных величин)  $C=f(L)$ , а также определение влияния концентрации дефектов различной величины на вероятностную прочность изделий из керамических материалов, является актуальным вопросом.

Наиболее эффективным средством определения зависимости  $C=f(L)$  для поверхностного слоя образцов, обработанных на заданных режимах, является метод акустической эмиссии (АЭ). В этом случае поверхность образца подвергается эталонному локальному нагружению (воздействию индентора, лазерному нагреву и т.д.). При этом фиксируется момент возникновения трещины. Зная топографию действующих напряжений, рассчитывается величина критического дефекта. При повторении данной процедуры (сканировании поверхности) определяется концентрация поверхностных дефектов и тем самым конкретизируется количественно зависимость  $C=f(L)$ .

В практическом отношении предлагаемый подход обеспечивает также оценку пригодности керамической детали к эксплуатации по результатам анализа сигналов АЭ. Для решения данной задачи необходимо найти вероятность развития трещин в бездефектном образце, принятом условно за эталон, а затем сравнить полученное значение вероятности разрушения испытываемых деталей, причем законы изменения прикладываемых напряжений (механических, термоупругих) в обоих случаях должны быть идентичны.

**ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ  
ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В СОТОВЫХ  
ПАНЕЛЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

*А.Н.Королёв, В.А.Тарасов, Ю.В.Герасимов, В.Д.Баскаков  
(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Работа посвящена актуальной проблеме повышения качества и надёжности многослойных конструкций, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике на базе спектрального радиоволнового неразрушающего контроля.

В работе приведена классификация характерных дефектов многослойных панелей, проанализированы достоинства и недостатки применяемых методов и средств их обнаружения. С учётом проведенного анализа для исследования дефектов многослойных панелей была разработана новая схема спектрального радиоволнового неразрушающего контроля. Данная схема основана на регистрации сканирующим приёмником спектра радиоволнового излучения и последующем анализе этого спектра на персональном компьютере. Излучение возникает после прохождения высокочастотной электромагнитной волны через объект контроля, являющийся частью электрического колебательного контура и помещённый между обкладками электрической ёмкости.

Предлагаемый метод контроля качества многослойных панелей был опробован в лабораторных условиях при анализе наличия непрочности сотовых панелей двух типов: из углепластиковых обшивок и алюминиевых сот, из алюминиевых обшивок и алюминиевых сот. В методе осуществляется сравнение спектра эталонной (бездефектной) панели и идентифицируемой панели.

Преимущества контроля предложенным методом возрастает на металлоклеевых панелях, поскольку: а) контроль известными методами (с помощью тепловизоров; ультразвукового метода) здесь не применим, что связано с конструктивными особенностями панели; б) предложенный метод контроля может применяться на всех стадиях изготовления КА (контроль панели; контроль изделия в сборе после вакуумных, динамических и термовакуумных испытаний).

На основе предложенного метода разработан предварительный вариант технологического процесса контроля качества склейки сотовых панелей, включающий следующие операции: регистрация радиоволнового образа сотовой панели, сравнение полученного радиоволнового образа с образцами бездефектных панелей и панелей с типовыми дефектами, принятие решения о годности панели и печать протокола контроля.

---

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ  
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ РАКЕТНО – КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
ИЗ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ**

***В.В.Сабельников, Д.А.Каминский***  
*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

В настоящее время в авиакосмической и ракетной технике все большее распространение получают детали из оксидной и нитридной керамики. Эти детали отличаются высокой прочностью и износостойкостью, способностью работать в условиях повышенных температур и агрессивных сред. Поэтому техническая керамика успешно применяется для изготовления силовых вкладышей, керамических фильтров, лопаток турбин, деталей двигательной установки.

К подобным деталям традиционно предъявляются чрезвычайно жесткие требования по точности изготовления размеров (на уровне нескольких микрометров) и шероховатости обработанной поверхности в пределах 9 -10-го классов.

В связи с высокой прочностью керамических деталей они практически не подвергаются традиционным методам лезвийной обработки, в том числе с использованием алмазного инструмента. Поэтому формообразование деталей из технической керамики осуществляется в настоящее время преимущественно физико – химическими способами обработки, к числу которых следует прежде всего отнести ультразвуковую обработку.

Исследования, выполненные в МГТУ им. Н.Э. Баумана показали перспективность использования при ультразвуковой обработке оксидной керамики марки ВК 94 4%-го раствора борной кислоты в качестве технической среды.

Эксперименты в этом направлении были продолжены на экспериментальной установке, созданной на базе фрезерного станка модели 676. Установка состоит из специальной вращающейся головки (в диапазоне изменения частот вращения инструмента от 0 до 7000 об/мин), питающейся от двух выпрямителей ВС – 5 и ультразвукового генератора модели УЗГ1–1. При помощи специально изготовленного стола обеспечивалось постоянное усилие прижатия инструмента к обрабатываемой детали в пределах от 10Н до 70Н. Обработка производилась трепанирующими алмазными сверлами.

Эксперименты показали повышение в 1.5 - 1.6 раза производительности обработки по сравнению с обычной ультразвуковой обработкой деталей из керамики, при сохранении прежней величины износа инструмента и достигаемого уровня шероховатости обработанной поверхности.

**ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРОСТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ**

*Д.А.Смирнов, К.Е.Сидельников*  
(*Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана*)

В настоящее время в России и за ее пределами остро стоит проблема безопасной утилизации различных образцов военной техники. Актуальность проблемы обусловлена прежде всего обязательностью выполнения международных соглашений по конверсионным программам; ограниченностью срока эксплуатации и хранения военной техники, за пределами которого они становятся опасными в использовании, обращении и хранении; появлением значительных накоплений невостребованных боеприпасов в результате создания новых, модернизации и одновременного снятия с вооружения устаревших образцов.

Традиционная утилизация требует больших затрат на обеспечение пожаро-, взрывобезопасности при проведении работ. Гидроструйная технология, нашедшая достаточно широкое применение в различных отраслях промышленности, обеспечивает низкотемпературную резку материалов, не нарушая при этом структуры материала, что фактически гарантирует пожаробезопасность, т.к. температура в зоне резания не превышает 90-95 °С.

Струйная технология основана на использовании в качестве режущего инструмента абразивно-жидкостных струй, при давлении до 500 МПа и диаметром струеформирующих сопел – 0,1-1,0 мм. Струя может быть различного состава: жидкостная, абразивно-жидкостная, жидкостная с добавками водорастворимых полимеров. Тип струи, а так же применение того или иного абразива существенно влияют на производительность процесса резки. Так, при использовании в качестве абразива карбида кремния зеленого производительность повысилась на 20-25% по сравнению с кварцевым песком. Однако при этом существенно увеличился износ струйной головки. Поэтому одним из приоритетных направлений в этой сфере является проблема правильного выбора абразива, особенно при решении ряда специфических проблем расснаряжения отдельных видов боеприпасов.

Данная технология позволяет обеспечить разрезку корпусов боеприпасов для удаления ВВ, включая толстостенные и крупнокалиберные, снаряженные “невыплавляемыми” ВВ (миноторпедные, авиационные и ракетные БП); вымывание (вырезка) ВВ из камеры боеприпаса; резка ТТРД и удаление из них топлива; разделка летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, и т.п.); разрезка корпусов бронетехники и кораблей;

разрезка корпусов АПЛ, удаление с них резиновых покрытий и металлоконструкций активной зоны ЯР. Сравнительные испытания по разрезке листовых материалов применяемых в корпусных изделиях боевой техники были проведены не так давно и также показали высокую эффективность струйной технологии.

Таким образом данная штатная технология формообразования деталей РКТ находит все более широкое применение при утилизации военной техники.

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПАНЕЛЕЙ КОРПУСА И ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ СПУТНИКОВ СВЯЗИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

*В.А.Романенков, С.Я.Костенко, Р.В.Чифуров  
(РКК «Энергия»)*

Клеенные каркасно-сотовые конструкции с несущими слоями и элементами каркаса из алюминиевых сплавов состоят из двух несущих слоев, изготовленных из листового материала, разнесенных на некоторое расстояние сотовым наполнителем и элементами каркаса.

Условия эксплуатации спутников предъявляют к панелям следующие требования: а) строгую параллельность тепловых труб (отклонение от параллельности относительно базовой оси не более 0,5 мм); б) высокую точность габаритных размеров и координат расположения закладных элементов (более 500 шт.), устанавливаемых в панель; в) идеальную плоскостность панелей (отклонение от плоскостности не более 0,2 мм); г) высокую надежность панелей, обуславливаемую качеством и прочностью клеевых соединений элементов конструкции.

Изготовление панелей производится вакуумным способом на основе технологии склеивания с применением полимерных клеевых композиций в жидком состоянии и в виде пленок.

Изготовление панелей производится в 3 этапа:

I этап. Приклейка закладных элементов (бобышек, вкладышей, фланцев) и тепловых труб к листу базовой поверхности.

II этап. Приклейка каркаса и сотового наполнителя к листу базовой поверхности.

III этап. Приклейка второго листа к сотовому наполнителю, каркасу, тепловым трубам и закладным элементам.

Поэтапное склеивание позволило осуществлять постоянный контроль за качеством склеивания панели.

Данная технология позволяет клеивать дополнительные закладные элементы на любой стадии работы с панелью.

Изготовление углепластиковых панелей солнечных батарей для различных спутников связи и зондирования Земли «Ямал», «E-Star», ЕКС, космических кораблей «Союз», «Клипер» включает в себе иные, более жесткие требования: а) поверхности панелей, предназначенные для размещения ФЭП, должны быть неэлектропроводны; б) отклонение от плоскостности лицевой поверхности панели должно быть не более 0,15 мм на любом участке поверхности диаметром 50 мм; в) отклонение от плоскостности тыльной поверхности панели должно быть не более 0,3 мм на любом участке поверхности диаметром 50 мм.

Сборка панелей производится за два приема вакуумным способом с использованием нижнего и верхнего вакуумметрических давлений.

За 1 прием формируется нижняя обшивка, являющаяся лицевой поверхностью панели, и силовые лонжероны.

Следующим этапом ведется подгонка сотового заполнителя с ячейкой 6 и 2,5, закладывание несущих узлов, примерка верхней замыкающей обшивки, сборка на режим.

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В СЛОЖНОКОНТУРНЫХ ПРОФИЛЯХ И СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ С МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ДЕФЕКТНОСТИ**

*В.А.Романенков (РКК «Энергия»),  
В.А.Тарасов (Московский государственный технический  
университет им. Н.Э.Баумана)*

Целью работы является исследование причин и механизмов образования дефектов в сложноконтурных профилях из сложных композиционных материалов и разработка эффективных технологических способов, препятствующих образованию дефектов на различных стадиях технологического процесса изготовления профилей.

Опыт производства и испытания изделий из слоистых композиционных материалов показывает, что особенную роль в нестабильности эксплуатационных характеристик играет структурно-физическое несовершенство – дефекты в материалах, которые значительно снижают прочность реального композиционного материала по сравнению с материалом расчетной структуры.

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние на снижение механических характеристик многослойных композиционных

материалов оказывают дефекты, представляющие собой глубокие поверхностные складки, искривления армирующих слоев в виде волнистости – гофров и разориентации структурных элементов арматуры в слоях, т. е. дефекты армирования.

В основе образования данных дефектов лежат два процесса: образование дефектов на стадии выкладки заготовок материала на жесткой поверхности инструмента и в процессе воздействия на материал технологических факторов формования – давления, температуры и времени.

Созданная технология выкладки материала позволяет оптимально учитывать указанные факторы и проводить процесс воздействия на материал при постоянном контроле с целенаправленным приложением усилий и при определенной температуре. Поэтому протяженных дефектов в виде значительных искривлений арматуры не допускается.

Структура и свойства профиля, сформированные на стадии выкладки, далеки от завершения и несут потенциальные возможности образования и развития дефектов армирования на следующих стадиях изготовления, а именно процесса прессования.

Природа композитов предопределяет необходимость воздействия на материал внешних физических факторов – механического силового поля и конверсионного теплового для окончательного формирования изделия.

Экспериментально установлено, что наилучшие результаты достигаются, когда в процессе формования механическая работа по деформированию исходной структуры материала и формированию заданных геометрических характеристик изделия совершается эластичным формирующим элементом (ЭФЭ). Разработанная и внедренная в производство технология отличается тем, что позволяет передавать механическое воздействие на формируемый материал по заданной схеме – оптимальной для получения слоистых структур с минимальным уровнем дефектности.

### **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ СЛОЖНОКОНТУРНЫХ КОРПУСНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ**

***В.А.Романенков, И.Л.Аккуратов, Е.В.Чертовских  
(РКК «Энергия»)***

Уникальным применением композиционных материалов является создание на основе стеклопластика корпуса бустерного насосного агрегата (БТНА) подачи жидкого кислорода энергоустановки работающей при криогенных температурах.

Насыщенность корпуса металлической арматурой, наличие ребер жесткости и сложных переходов поверхностей, а также наличие различного вида сборочных напряжений приводит к сложной системе напряженно-деформированного состояния корпуса, что при температурных нагрузках, в основном при захлаживании, может привести к росту имеющихся внутренних микротрещин, приводящему, как следствие, к негерметичности корпуса.

Широкие интервалы значений технологических параметров дают возможность и указывают на необходимость теоретически и экспериментально определять оптимальные режимы переработки материалов, исходя из требований предъявляемых к изделию и общих закономерностях процесса прессования материала.

Анализ технологических свойств стеклопластика ДСВ-2-О ГОСТ 17478-95, параметров прессования и технологических факторов производственного процесса, определяющих герметичность и прочность изделий из стеклопластиков для криогенной техники показал:

1. Исходную неоднородность материала ДСВ-2-О, не устраняемую в процессе переработки и создающую анизотропию свойств, неравновесную структуру, высокий уровень напряженно-деформированного состояния отвержденного материала.

2. Температурно-временные эффекты, развивающиеся в стеклопластиках, приводят к снижению механических характеристик не только в процессе эксплуатации, но и при хранении готовых изделий.

3. Необходимость учета изначальной микродефектности материала при выполнении последующих технологических операций, проводимых с корпусом.

4. Обеспечение качества и надежности подобного изделия из композиционных материалов определяется уровнем и эффективностью создаваемых технологий по переработке материалов.

По результатам проведенных исследований:

1. Определены технологические факторы, влияющие на формирование структуры стеклопластика с минимальным уровнем дефектности, обеспечивающие заданную прочность и герметичность изделия.

2. Найдены оптимальные режимы подготовки к формированию дозированного стекловолокна на основе комплексных стеклянных нитей, пропитанных модифицированным фенолоформальдегидным связующим.

3. Разработаны технологические способы и приемы, обеспечивающие получение бездефектных деталей, и внедрены в производство.

**ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,  
РАСКРОЯ, АРМИРОВАНИЯ ВОЛЬФРАМОВОГО СЕТЕПОЛОТНА  
ДЛЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ  
РАЗВЕРТЫВАЕМЫХ РЕФЛЕКТОРОВ**

*В.А.Романенков, Е.Н.Мамьянова, Е.В.Чертовских  
(РКК «Энергия»)*

Большой разворачиваемый рефлектор состоит из центрального узла, комплекта лепестков, силового кольца, каркаса, отражающей поверхности, комплекта элементов СУО. Более 80% элементов изготавливаются из композиционных материалов.

Комплект лепестков большого разворачиваемого рефлектора является переходным, формирующим геометрию отражающей поверхности крупногабаритным элементом конструкции, задачей которого является сохранять свою работоспособность в условиях эксплуатации рефлектора и собираться в кольцо малого диаметра.

Лепестки представляют собой супертонкие упругие ленты из углепластика, изготовленные намоткой на технологическую оправку углеродного жгута, пропитанного полимерным связующим.

Намотанные заготовки подвергаются термообработке, механически обрабатываются и собираются в лепесток заданной длины в термостабильных условиях, включающий элементы крепления лепестка на силовом каркасе и углепластиковые стойки – опорные точки силового каркаса, предназначенные для формирования геометрии и крепления отражающей поверхности.

Основным требованием, предъявляемым к отражающей поверхности больших разворачиваемых рефлекторов, является обеспечение точности положения опорных точек отражающей поверхности и их принадлежность теоретической поверхности.

Известные на сегодняшний день технические решения изготовления радиоантенн имеют ограничение по габаритам изготавливаемых антенн, по фокусному расстоянию, и точности изготовления отражающей поверхности.

Разработанная технология изготовления отражающей поверхности для крупногабаритных разворачиваемых рефлекторов включает в себя следующие операции:

1. предварительное натяжение полотна трикотажного плетения;
2. выкраивание из него фрагментов отражающей поверхности;
3. соединение фрагментов в заготовку отражающей поверхности;
4. армирование и разметку опорных точек для монтажа отражающей поверхности на опорных стойках силового каркаса.

Отличительной особенностью данной технологии, является то, что разметка опорных точек производится на заготовке отражающей поверхности за счет:

- переноса расположения опорных точек с силового каркаса на регулируемые по высоте узлы устройства формирования криволинейной поверхности (УФКП) рефлектора;
- натяжения заготовки отражающей поверхности на УФКП;
- переноса расположения опорных точек с регулируемых по высоте узлов устройства на заготовку отражающей поверхности.

Техническим результатом является возможность изготовления рефлекторов диаметром от 6 до 18 и более метров.

#### **МЕХАНИЗМЫ НАСЛЕДСТВЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ СБОРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

*Ю.А.Цебро, В.А.Тарасов*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

В современных условиях производства и эксплуатации ракетно-космической техники, при широкой кооперации между предприятиями и постоянно расширяющемся международном сотрудничестве, одним из важнейших показателей качества маложестких узлов и агрегатов является их собираемость в изделие без проведения дополнительных работ по регулированию и компенсации погрешностей выходных геометрических параметров и взаимного положения присоединительных элементов. В связи с этим, весьма актуальным становится вопрос обеспечения (прогнозирования) конечной точности изготовления маложестких конструкций.

Для процесса формирования погрешностей выходных параметров сборочных единиц определяющими факторами являются первичные погрешности комплектующих, их случайная векторная природа, а также переменная в процессе создания соединений жесткость конструкции. Такие факторы определяют наследственность конструкции. Наиболее перспективным инструментом их исследования является математическое моделирование.

В работе основное внимание уделено математическому моделированию операции сборки ответственных элементов конструкции, позволяющему количественно оценить показатели точности сборки. В его основе лежит численное моделирование процесса деформирования конструкции методом конечных элементов с помощью универсального программного - математического комплекса MSC.NASTRAN.

В рамках данной работы построена конечно-элементная модель разгонного блока ДМ-SL, учитывающая специфические особенности мало жестких конструкций ракетно-космической техники. Разработана методика исследования наследственного характера формирования погрешностей выходных геометрических параметров при сборке стыков конструкций РКТ с исходными погрешностями баз комплектующих элементов. Проведен расчет деформаций стыковочного шпангоута разгонного блока, возникающих в процессе сборки его промежуточного стыка – присоединения сферического бака к сборочной единице “верхний переходник – ферма” при наличии случайного первичного зазора между базами ферм и бака. Показана зависимость формирования геометрических параметров стыковочного шпангоута от последовательности формирования соединений в сборочных площадках промежуточного стыка. Это показывает возможность применения конечно-элементных моделей как для анализа наследственных процессов при сборке, так и для широкого круга других исследований.

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ ФОРМО- И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ**

*А.Л.Галиновский*

*(Московский государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана)*

Анализируя проблемы математического моделирования технологической наследственности (ТН), следует отметить, что одним из наиболее устойчивых факторов наследования является фактор вероятностного влияния геометрических параметров (габаритов) заготовки на величину погрешности формо- и структурообразования изготавливаемой детали (МФ). Однако, изучение литературных источников показало, что в настоящий момент вопросы вероятностного влияния геометрических параметров изучаемых объектов на величину погрешностей их изготовления или сборки практически не изучены.

Таким образом, представляется практически перспективной и научно значимой разработка математической модели позволяющей прогнозировать влияние масштабного фактора технологической наследственности формо- и структурообразования на параметры качества изделий машиностроения.

К объектом исследования может быть отнесен достаточно широкий круг идентичных и/или близких технологических процессов изготовления подобных и/или близких к геометрическому подобию деталей типа валов, втулок, подшипниковых узлов, лопаток и дисков газотурбинных двигателей, стволов стрелково-пушечного вооружения, корпусов артиллерийских снарядов и т.д.

Для построения и анализа обобщенной и частных математических моделей, позволяющих прогнозировать влияние масштабного фактора технологической наследственности формо- и структурообразования на параметры качества изделий машиностроения, было решено несколько основных задач. Во-первых, разработаны основные технологические принципы повышения качества изготовления деталей на основе анализа масштабного фактора. Во-вторых, создана вероятностная модель влияния масштабного фактора на основные показатели качества деталей.

Перечисленные задачи были решены автором в 2003-2004 гг. в рамках работ, выполненных на средства гранта на проведение молодыми учеными научных исследований в ведущих научно-педагогических коллективах Минобразования.

Следует отметить, что вообще в технологии изготовления и сборки многих деталей и узлов в скрытом виде присутствует влияние МФ. На примере технологии изготовления высокоточных прецизионных деталей разработаем для макро уровня вероятностную модель ТН с учетом влияния МФ формо- и структурообразования. Применительно к анализу точности под МФ будем понимать влияние (в вероятностном смысле) геометрических параметров (размеров) изучаемого объекта, в первую очередь площади обработанной поверхности и площади поверхностей, по которым осуществляется базирование на величину геометрических погрешностей, возникающих при изготовлении и сборке данного объекта (детали, узла). Другими словами, МФ определяет влияние задействованных в процессе формообразования или при сборке площадей на выходные параметры (точность) этого процесса.

Кроме того, влияние МФ было прослежено при проведении экспериментальных исследований по определению уровня шумовой нагрузки создаваемой отрезными дисками различного диаметра. Полученные результаты подтвердили выводы, сделанные в теоретической части работы и доказали целесообразность учета МФ, в первую очередь с точки зрения экономии материально-финансовых средств на проведение дорогостоящих экспериментальных исследований.

---

**РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ  
ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО  
ГАЗОВОГО ПОТОКА**

*В.А.Барвинок, В.И.Богданович, И.А.Докукина, Е.А.Ананьева  
(Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П.Королева)*

Ряд деталей авиационных и ракетных двигателей подвержен воздействию высокотемпературного газового потока. Проблема защиты поверхностей деталей, находящихся в потоке продуктов сгорания топлива, может быть решена нанесением на их поверхность теплозащитных покрытий.

В настоящее время нами разработаны и успешно применяются при производстве газотурбинных и ракетных двигателей теплозащитные покрытия системы металл-керамика. Покрытия наносятся методом плазменного напыления на внутренние поверхности камер сгорания, жаровых труб, на наружные поверхности форсунок, турбинных лопаток. В зависимости от условий работы покрытия, они имеют различный состав и толщину металлического и керамического слоев.

В связи с тем, что большинство напыляемых деталей имеют сложную геометрическую форму и нанесение покрытия производится на их внутреннюю поверхность, разработанная технология предусматривает использование специального малогабаритного оборудования, манипуляторов и системы программного обеспечения процесса напыления под каждый из типов деталей. Разработанные технологии позволяют получить равномерный слой покрытия на сложных внутренних и наружных поверхностях в соответствии с техническим заданием.

Применение покрытий толщиной 0,2-0,25 мм позволяет снизить стационарный тепловой поток, воздействующий на поверхности деталей, примерно на 100 градусов, что дает возможность повышать температуру газового потока, удельную тягу, экономичность и другие характеристики двигателей.

**МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА В ПРОИЗВОДСТВЕ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

*В.А.Барвинок, А.Н.Кирилин, В.П.Самохвалов  
(Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П.Королева и Государственный научно-  
производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»)*

Актуальным направлением совершенствования технологий создания изделий ракетно-космической техники является использование технологических методов изготовления деталей, позволяющих обеспечить заданные свойства и заданный ресурс деталей. Одним из перспективных технологических методов пластического деформирования металлов является магнитно-импульсная штамповка.

Специфическое воздействие импульсного магнитного поля связано с его концентрацией на внутренних неоднородностях структуры материала. Вместе с джоулевым нагревом и пондеромоторным действием поля это дает возможность значительно интенсифицировать восстановление пластичности обрабатываемых материалов как в процессе деформирования, так и после него.

Работы по опытно-промышленной отработке технологических процессов проведены на заводе «Прогресс», где освоены и внедрены в производство более 300 наименований промышленных деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, коррозионно-стойких и специальных сталей и сплавов.

При решении задачи оптимизации точностных возможностей процесса, использовалась методика корреляционного и регрессионного анализа и методика математического планирования экспериментов.

Для технологического обеспечения высокой точности получаемых деталей с заданными эксплуатационными свойствами разработаны математические модели расчета параметров процессов обработки, базирующиеся на современных положениях механики сплошных сред.

Результаты работы позволили: снизить энергозатраты на 30%, сократить сроки подготовки производства и материальные затраты в 2-3 раза, повысить коэффициент использования материала с 0,3 до 0,6, а также уменьшить трудоемкость изготовления деталей в 1,5-2 раза, а точнее позволили обеспечить надёжность систем трубопроводов в блоках и изделиях за счёт увеличения эксплуатационных свойств элементов трубопроводов по прочности на 18-20%, по усталостной прочности на 12-18%. Изготовление элементов трубопроводных систем по разработанным технологиям позволило обеспечить безотказные пуски ракет-носителей с

минимальной стоимостью 1 кг полезного груза, выводимого на околоземную орбиту.

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ  
«ВКЛАДЫШ – ТРЕХСЛОЙНАЯ КОНСТРУКЦИЯ»  
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛА**

*Ю.А.Ващуков*

*(Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П.Королева)*

Наиболее распространенными технологическими способами образования соединения «вкладыш - трехслойная конструкция» в производстве летательных аппаратов (ЛА) являются заливка крепежного элемента грунтовкой, а также получение с помощью телескопического соединения.

Вместе с тем, соединения, полученные этими способами, обладают повышенной массой за счет наличия грунтовки и более толстых (в два раза) стенок вкладышей при телескопической конструкции крепежного элемента.

Кроме того, в отличие от телескопического соединения, способ заливки крепежного элемента грунтовкой относится к средненагруженным видам соединения, которые не позволяют полностью использовать прочностные характеристики материала обшивок и заполнителя сотовой панели при статическом и знакопеременном нагружении.

С целью устранения указанных недостатков нами разработан и исследован способ образования соединения «вкладыш - трехслойная конструкция», заключающийся в запрессовке крепежного элемента и образовании по его внешнему контуру тороидальной поверхности. Сформированная тороидальная поверхность закрепляет вкладыш между обшивками трехслойной панели.

Для исследования несущей способности проведены повторно-статические испытания по двум схемам нагружения.

Результаты повторно-статических испытаний показали, что несущая способность соединений с вкладышами, установленными по разработанной технологии, превышает аналогичные показатели соединений с вклеенными вкладышами.

При этом разрушение соединения, полученного разработанным способом, происходит в результате разрушения верхней обшивки. Это позволяет полностью реализовать прочностные характеристики материала обшивки и заполнителя.

**ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛОПАТКАХ ГТД ИЗ  
ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, УПРОЧНЕННЫХ  
ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*М.А.Вишняков*

*(Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П.Королева)*

Лопатки турбины и компрессора, имея тонкий ажурный профиль с кромками малой толщины, в процессе эксплуатации подвержены значительным знакопеременным нагрузкам, которые усиливаются негативным воздействием температурного фактора. Поскольку указанные детали в большой степени определяют ресурс всего газотурбинного двигателя, то создание в поверхностном слое пера лопатки благоприятных сжимающих остаточных напряжений, позволит увеличить их усталостную прочность и, как следствие, долговечность работы всего двигателя. Указанная проблема может быть решена путем применения методов упрочняющей технологии, в частности, термопластическим упрочнением (ТПУ).

Метод ТПУ состоит из двух этапов: прогрева детали до температуры начала термопластических деформаций и последующего интенсивного охлаждения ее поверхностей. Результатом этого является поле сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали. Особенностью метода является возможность создания необходимого уровня остаточных напряжений при малой величине пластических деформаций (до 1%). Последнее особенно важно для деталей, работающих в условиях повышенных температур.

Результаты исследования остаточных напряжений в образцах, вырезанных из пера рабочей лопатки турбины из сплава ЭИ598, показали, что их величины находятся в пределах  $\sigma_0 = -(370-570)$  МПа. Для лопаток из сплава ЭИ437Б эти величины составляют  $\sigma_0 = -(400-750)$  МПа. Меньшие значения напряжений относятся к образцам, расположенным в непосредственной близости от входной и выходной кромок.

При ТПУ возможность образования и величина сжимающих напряжений существенным образом определяются толщиной детали и физико-механическими свойствами ее материала.

Установлено, что в поверхностном слое тонких образцов, вырезанных из кромок рабочей лопатки компрессора из титанового сплава ВТ9, образуются растягивающие остаточные напряжения величиной до  $\sigma_0 = +300$  МПа. Указанная проблема может быть решена путем применения при ТПУ специальных приспособлений, обеспечивающих искусственное увеличение толщины детали и, как следствие, возможность получения по всему перу лопатки сжимающих остаточных напряжений величиной  $\sigma_0 = -(280-600)$  МПа.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОДКРЕПЛЕННЫХ СЕЧЕНИЙ ШТАМПОВКОЙ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ**

*А.Н.Дунаев, В.А.Барвинок, А.Д.Комаров, В.В.Шалавин  
(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева)*

В конструкциях летательных аппаратов (ЛА) широко применяются детали из прессованных профилей различных подкрепленных сечений (чаще всего Т-, Г-, П-образных с расположенным на периферии стенки или полки утолщением круглого сечения). Преимущество указанных профилей заключается в том, что они выдерживают больший изгибающий момент, чем профили равновеликого сечения без подкрепляющего элемента, так как моменты инерции  $I$  и сопротивления  $W$  профилей подкрепленных сечений больше. Кроме того, за счет меньшей, высоты стенки использование прессованных профилей подкрепленных сечений расширяет возможности конструкторских решений компоновки узлов и агрегатов ЛА.

Характерной особенностью деталей из прессованных профилей является многообразие их пространственных форм и размеров при большой номенклатуре форм и размеров поперечных сечений, что при использовании традиционных технологий приводит к большому количеству необходимого оборудования и технологической оснастки. Кроме того, профильные детали должны иметь высокую точность и качество, так как образуют каркас ЛА и обеспечивают точность его аэродинамических обводов.

С целью решения указанных задач нами разработана технология получения деталей из прессованных профилей подкрепленных сечений штамповкой эластичной средой в щелевых контейнерах высокого давления с применением гибких вкладышей принципиально новых конструкций, позволяющая за один ход гидравлического прессы осуществить гибку, малковку и подсечку профильной заготовки.

Основными достоинствами разработанной технологии, по сравнению с традиционными технологиями, являются: сокращение количества операций за счет совмещения в одну операцию гибки, малковки и подсечки; значительное сокращение, а в некоторых случаях ликвидация ручных доводочных работ; резкое уменьшение трудоемкости изготовления деталей; сокращение расхода материала за счет уменьшения, а в ряде случаев полной ликвидации технологических припусков; уменьшение количества необходимого оборудования и технологической оснастки; высвобождение производственных площадей и складских помещений;

сокращение сроков подготовки производства. При этом значительно уменьшается производственный шум и улучшаются условия труда.

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

*В.П.Самохвалов*

*(Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П.Королева)*

В трубопроводных системах летательных аппаратов для компенсации знакопеременных температурных деформаций и вибрационных нагрузок используются сильфоны – трубчатые элементы, выполненные из тонколистовых заготовок, изготовленные преимущественно гидроформовкой. Основной эксплуатационной характеристикой для сильфонов является жесткость, обеспечивающая компенсацию продольных и угловых деформаций в указанных техническими требованиями пределах.

Разброс механических характеристик применяемых материалов для изготовления сильфонов приводит к тому, что около 40% изготовленных деталей не соответствовали техническим требованиям.

Для обеспечения гарантированных свойств сильфонов по жесткости были проведены исследования, позволившие получить оптимальные режимы и параметры воздействия электромагнитного поля на материал обрабатываемой заготовки.

В результате численных исследований установлено, что длительность воздействия ИМП должна находиться в диапазоне  $10^{-4} \leq \tau \leq 10^{-1}$  с и соответствовать удельным энергиям, вкладываемым в единицу объема  $10^7 \leq W \leq 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. Диссипация энергии в данном диапазоне воздействия может осуществляться за счет пропускания тока, а также за счет явления индукции.

Установлено, что однократное пропускание тока как непосредственно от МИУ, так и понижающего трансформатора с ПСЛТ-1200 приводит к увеличению относительного удлинения образцов на 30-36% при объемной энергии 3,6...3,8 Дж/мм<sup>3</sup>. Температура интегрального разогрева образцов составляла 520-540 °С.

Микронапряжения в материале деталей определялись при рентгеноструктурном анализе путем измерения межплоскостных расстояний в кристаллической решетке до деформирования, после деформирования и после воздействия импульсным магнитным полем в различных времен-

ных диапазонах. Максимальный эффект снятия внутренних напряжений наблюдался в диапазоне воздействия ( $10^{-4} \leq \tau \leq 10^{-2}$ ) с. при удельных энергиях ( $10^6 \leq W \leq 10^9$ ) Дж/м<sup>3</sup>.

После обработки высокоэнергетическим импульсным полем внутренние напряжения в материале заготовки уменьшались на 18-20%, что подтверждается увеличением пластических свойств материалов на 20-25%, соответственно.

### **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОШАГОВОЙ ФРАГМЕНТАРНОЙ ВЫРУБКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЛИННОМЕРНЫХ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ ЭЛАСТОПОЛИМЕРНОЙ СРЕДЫ**

*Ю.В. Федотов*

*(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева)*

В конструкциях летательных аппаратов используются длинномерные крупногабаритные листовые детали шириной от 500 до 1500 мм, длиной от 1000 до 5000 мм и более, толщиной 2...3 мм из алюминиевых сплавов и 0,5...1 мм из обычных и нержавеющей сталей и титановых сплавов. Изготовление таких деталей традиционно осуществляется фрезерованием, методами разделительной штамповки с применением инструментальных штампов, а иногда вырубкой давлением эластичной среды с помощью специализированного мощного прессового оборудования. Использование данных технологий требует больших материальных затрат, применения дорогостоящего прессового оборудования усилием до 10000 кН, большого объема ручных доводочных работ, металлоемкой штамповой оснастки.

С целью исключения данных недостатков сотрудниками кафедры ПЛА и УКМ СГАУ разработана высокоэффективная технология пошаговой фрагментарной вырубки – пробивки крупногабаритных листовых деталей давлением эластополимерной среды (полиуретана) при полужагнутом способе ее (его) воздействия на заготовку с использованием маломощного прессового оборудования. Для реализации разработанной технологии созданы универсальные средства технологического оснащения, на изготовление которых требуются минимальные затраты и сроки на подготовку производства.

Математическое моделирование, численные и экспериментальные исследования процесса фрагментарной вырубки позволили создать

научно–обоснованную методику управления давлением эластопolyмерной среды на площади ее контакта с заготовкой и обеспечить необходимый для вырубки - пробивки уровень рабочих давлений полиуретана в контактной зоне до 100...150 МПа. При этом за счет конструктивных особенностей и оптимизации параметров разработанного вырубного локализованного инструмента в очаге деформации заготовки создаются условия простого или чистого сдвига.

Разработанная технология обеспечивает повышение качества кромки среза по контуру разделения, минимальный припуск материала листовой заготовки, минимальные энергетические затраты, исключает ручные доводочные работы, сокращает сроки подготовки производства, металлоемкость и трудоемкость изготовления крупногабаритных деталей в десятки раз. Технология пошаговой фрагментарной штамповки – вырубки длинномерных листовых деталей прошла апробацию на базовых предприятиях Самарского региона.

#### **ЭКСПРЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

*А.В.Гуревский*

*(Московский государственный технический университет им.*

*Н.Э.Баумана)*

Ультразвуковая обработка (УЗО) является одним из заключительных технологических приемов, обеспечивающих требуемые точность и качество поверхностного слоя изделий из сверхтвердых материалов, например, моно- и поликристаллов алмаза, применяемых в кабельной промышленности для изготовления фильер. Вследствие дороговизны обрабатываемых и абразивных материалов ускоренное определение производительных режимов УЗО представляет научно и практически значимую задачу. Поэтому актуальна разработка универсальных методов выбора производительных технологических режимов и условий обработки, пригодных для производственных целей, как при подготовке производства, так и для активного контроля процесса УЗО. Среди известных методов диагностики технологических процессов особого внимания на наш взгляд заслуживает метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий непосредственно оценить высокочастотную динамику данного способа формообразования.

В результате проведения серии экспериментов при УЗО алмазных заготовок было установлено, что основным источником АЭ является удар инструмента по абразивным зернам. Установлено, что при УЗО в

обрабатываемом материале генерируются волны АЭ в широком диапазоне частот, причем наибольший вклад в широкополосный сигнал вносят гармоники  $\Delta f = 60 - 250$  кГц. Анализ связи сигнала АЭ с технологическими режимами показал, что с увеличением мощности ультразвукового излучения и длины инструмента амплитуда  $A$  и интенсивность  $N$  АЭ монотонно возрастают. Зависимость тех же параметров сигнала-отклика АЭ от  $P_{\text{ст}}$  носит асимптотический характер, а зависимость размаха амплитуды – экстремальный (max) характер. Эксперименты по УЗО образцов из технического стекла и твердого сплава ТТ10К8 с регистрацией сигнала-отклика АЭ и определением производительности обработки, позволили определить, что зависимости амплитуды АЭ и производительности УЗО от величины  $P_{\text{ст}}$  имеют нелинейный характер, причем при малых значениях  $P_{\text{ст}}$  указанные зависимости являются возрастающими. При последующем увеличении  $P_{\text{ст}}$  производительность УЗО обработки достигает максимума, которому соответствует максимум амплитуды АЭ.

Таким образом, регистрируя лишь параметры АЭ, можно ускоренно определять производительные режимы УЗО, а также осуществлять диагностику и активный контроль процесса УЗО в целом.

### **ПРИМЕНЕНИЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗДЕЛИЙ РКТ**

*П.В.Круглов*

*(Московский государственный технический университет им.*

*Н.Э.Баумана)*

Задача автоматизации проектирования технологических процессов изделий РКТ является актуальной вследствие необходимости уменьшения сроков подготовки производства. Большой объем разрабатываемой технологической документации требует наличия надежных и быстрых средств обработки и хранения информации. Наиболее удобным способом организации документооборота в настоящее время является работа с базой данных в условиях сети предприятия на основе технологий «клиент-сервер».

Использование в системах автоматизированного проектирования технологических процессов, размещенных в рамках сетей intranet (внутренних сетей), технологий internet (глобальных сетей) позволяет опера-

тивно передавать и получать информацию по прошлым и текущим проектам. Разграничение доступа к ресурсам сервера базы данных в этом случае обеспечивается встроенной авторизацией на сервере.

Применение web-технологий возможно в виде создания специальной системы автоматизированного проектирования, серверная часть которой обеспечивает разграничение доступа, проверку корректности заполняемых пользователями форм, и, в общем случае, реализует алгоритм документооборота предприятия. В клиентской части реализуется возможность заполнения форм, например, технологической документации, с последующей регистрацией на сервере. Также в клиентской части обеспечивается доступ к электронным справочникам, хранящимся на сервере в форматах языка html и его производных.

Таким образом, применение web-технологий в системах автоматизированного проектирования технологических процессов позволяет обеспечить:

- хранение большого объема технологической документации;
- авторизацию доступа, и на ее основе, поддержку «электронной подписи»;
- справочную поддержку работы технолога.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ (ВОЛС) В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

*М.П.Ананьев*  
(ГКНПЦ им. М.В. Хруничева)

Мировой опыт запусков космических аппаратов (КА) на геостационарные орбиты показывает, что стоимость доставки одного килограмма полезной нагрузки на эту орбиту составляет порядка 40000 \$. В связи с этим крайне актуальными являются работы по снижению веса средств выведения полезных грузов, к которым относятся ракеты-носители (РН) и разгонные блоки (РБ). Научные исследования в области совершенствования конструкций изделий, технологии их изготовления, применение композитных материалов позволяют значительно улучшить массовые характеристики изделий с учетом выполнения главной задачи: доставки на геостационарную орбиту полезной нагрузки в виде спутников связи. Математически решение этой задачи можно представить в виде оптимального описания и решения функционала во взаимосвязи с многими аргументами, среди которых рассмотрим следующие:

$$Ц=f(P, M1, M2, \dots, Mj, \text{Фэмс}, T, \dots)$$

где  $\Psi$  – функция выполнения целевой задачи,  
 $P$  – тяга двигателей РН и РБ,  
 $M_1, M_2, M_j$  – масса конструкций РН, РБ, КА,  
 $\Phi_{эмс}$  – устойчивость изделия к электромагнитной совместимости (ЭМС),  
 $T$  – точность выведения на целевую орбиту.

Рассмотрим в этом функционале вопросы, связанные с массой РН и РБ, образованной, в том числе, и наличием в составе изделий электрических приборов из состава системы управления, системы измерений, а также большим количеством электрических проводников и электросоединителей к ним. На сегодняшний день доля электрических систем на изделиях составляет до 30% от массы всего изделия. При этом масса проводников определяется:

$$P = m * L * S * N + n * P_c$$

где  $P$  – вес кабельной сети;  
 $m$  – удельная масса проводника;  
 $L$  – длина проводника;  
 $S$  – сечение проводника;  
 $N$  – количество проводников;  
 $n$  – количество электросоединителей;  
 $P_c$  – вес электросоединителей.

На пути снижения веса этих составляющих применяются следующие конструктивные и технологические решения:

- уменьшение сечения проводников (если позволяет сила тока и погрешность измерений),
- уменьшение веса экранирующих оплеток проводов с использованием арамидных нитей (со снижением их экранирующих свойств),
- уменьшение веса проводников из-за использования более легких сплавов и металлов (например: алюминия).

Все это в совокупности с применением в составе изделий композитных материалов существенно снижает устойчивость аппаратуры, установленной на РН, РБ, КА к электромагнитным помехам и воздействиям и соответственно резко снижает возможность выполнения целевой задачи по доставке полезной нагрузки на орбиту. Кардинальным решением проблемы: «Масса – электромагнитная совместимость» может служить применение на РН, РБ, КА волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с совокупностью физических оптических преобразователей и датчиков, а также оптических соединителей. Проработка новой конструкции РН, РБ с ВОЛС показывает снижение веса за счет отказа от максимального количества металлических проводников и электросоединителей к ним, а также технологических элементов их крепления на изделии, при этом уровень электромагнитной устойчивости систем резко возрастает. В рамках

реализации этой концепции на изделиях ракетно-космической техники необходима разработка новых перспективных технологий и конструкторских решений, среди которых можно отметить:

- разработка технологии установки ВОЛС на изделиях;
- разработка технологий установки, юстировки, стыковки, проверки оптических соединителей в составе изделия;
- разработка технологий изготовления и установки оптических физических преобразователей и датчиков на основе оптических волокон.

Тот факт, что многие фирмы приступили к работам в этом направлении, а также то что фирма с мировым именем Buel&Kjaer уже разрабатывает оптические датчики говорит о правильности внедрения технологии ВОЛС на изделиях ракетно-космической техники. В рамках создания ракетно-космического комплекса «Ангара» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева разрабатывает измерительную систему на основе ВОЛС, причем это техническое решение позволяет снизить массу измерительной системы в три раза против ныне существующих технологий и это только первый шаг в продвижении технологии ВОЛС для РН и РБ.

---