

На правах рукописи
УДК 621.914

Зайцев Алексей Михайлович

РАЗРАБОТКА НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА
ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Специальности:

05.02.07- Технологии и оборудование механической и физико-технической
обработки

05.02.08- Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель:

Доктор технических наук, доцент
Сергей Витальевич Грубый

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
кафедры высокоэффективных технологий,
МГТУ «СТАНКИН»
МАСЛОВ Андрей Руффович

Кандидат технических наук,
начальник технологического отдела
ремонтного производства ПАО «НЛМК»
РУБАХИН Алексей Игоревич

Ведущая организация – ФГУП «НПО «Техномаш»

Защита состоится _____ 20 ____ г. в _____ час. на заседании
диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я
Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на реферат в одном экземпляре, заверенный печатью
организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на сайте www.bmstu.ru.
Телефон для справок: 8(499)267-09-63.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.т.н., доцент



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Мировой рынок космических изделий характеризуется устойчивой конкуренцией между основными производителями ракетно-космической техники (РКТ). В связи с этим конкурентоспособность отечественной ракетно-космической промышленности в значительной степени определяется задачами модернизации технологической базы, методами и средствами планирования и управления производством.

Актуальность работы определяется задачами, стоящими перед ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия» (ЗАО «ЗЭМ») как к головному предприятию на ближайшие 5 лет, а именно помимо производства серийных кораблей это изготовление перспективных изделий РКТ, таких как новые модули международной космической станции, космический корабль нового поколения и другие.

Космический корабль нового поколения, а также другие перспективные космические системы, будут иметь принципиально новые конструктивные решения, такие как вафельная конструкция обечайки (ВКО) корпуса, применение высокопрочных алюминиевых сплавов. Проведение технической подготовки производства изделий предполагается в едином информационном пространстве с помощью 3-D моделирования в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Необходимость обеспечения жестких сроков на подготовку производства и изготовление изделий РКТ в сочетании с новым конструктивом требует использования эффективных организационно-технических решений и внедрения прогрессивных технологий.

Поскольку производство изделий РКТ является единичным или мелкосерийным, то в общем цикле создания изделия значительную часть занимает технологическая подготовка производства (ТПП).

Поэтому работа, направленная на повышение эффективности технологической подготовки производства изделий РКТ, является актуальной.

Цель работы. Минимизация трудоемкости ТПП по ключевым направлениям изготовления деталей и узлов перспективных изделий РКТ.

Задачи работы:

1. Определить ключевые направления ТПП и пути повышения ее эффективности при изготовлении перспективных изделий РКТ.
2. Повысить эффективность ТПП за счет автоматизации разработки и согласования технологической документации (ТД).
3. Повысить эффективность ТПП в части проектирования средств технологического оснащения (СТО) за счет применения аддитивных технологий.
4. Разработать методику проведения ТПП для изготовления крупногабаритных корпусных деталей с вафельной конструкцией обечайки.

5. Определить шероховатость, усилия резания и стойкость инструмента при фрезеровании перспективных высокопрочных алюминиевых сплавов.
6. Определить допустимые режимы резания при фрезеровании для исключения деформации дна кармана ВКО крупногабаритного корпуса.

Научная новизна:

1. Разработана методика проведения ТПП сложного технического объекта – корпусной детали с ВКО, включающая управление ТПП, анализ технологичности конструкции, выбор оптимальной стратегии обработки типового элемента ВКО, оптимизацию режимов обработки с учетом исключения деформации элементов ВКО.
2. Доказана возможность применения аддитивных технологий для повышения эффективности проектирования СТО.
3. Получены новые результаты в области резания высокопрочных алюминиевых сплавов: значения шероховатости и силы резания при фрезеровании, экспериментальные данные по стойкости инструмента.
4. Доказана эффективность взаимодействия нескольких инженерных групп в различных САПР и PDM-системе при электронном согласовании ТД.

Практическая ценность работы:

1. Разработан и внедрен алгоритм согласования ТД в электронном виде.
2. Получены практические зависимости в области фрезерной обработки высокопрочных алюминиевых сплавов.
3. Разработана и утверждена инструкция по ТПП деталей с ВКО, основные положения подтверждены практической апробацией при разработке технологического процесса изготовления сегмента корпуса нового корабля и других типовых деталей.
4. Разработана технология изготовления пучка трубопроводов с применением метода селективного лазерного спекания (СЛС).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика решения задачи обеспечения эффективности ТПП сложного технического объекта – корпусной детали с ВКО, включая анализ технологичности конструкции, выбор стратегий и оптимизацию режимов обработки с учетом исключения деформации дна и стенок кармана.
2. Информационное обеспечение для решения задачи повышения эффективности, включая:
 - значения шероховатости поверхности и стойкости инструмента при фрезеровании высокопрочных алюминиевых сплавов;

- влияние выбора стратегий врезания на силы, действующие на дно кармана;
- зависимости результирующей силы резания при сравнительной обработке 3-х марок перспективных алюминиевых сплавов.

3. Доказательство возможности построения эффективного алгоритма согласования и утверждения ТД в электронном виде.

Методы исследования. Работа включает в себя теоретические и экспериментальные методы исследования и моделирование на ЭВМ. Используются основные положения технологии машиностроения, теории резания, методов математического моделирования и программирования. Исследование деформации обечайки с вафельной конструкцией проводилось на ЭВМ на основе метода конечных элементов (МКЭ) с использованием полученных расчетных и экспериментальных данных. Экспериментальные исследования обрабатываемости высокопрочных алюминиевых сплавов и влияния режимов резания на показатели качества обработанных поверхностей выполнены как на экспериментальных установках, так и в реальных производственных условиях при обработке сегмента корпуса с ВКО.

Реализация результатов работы. Результаты работы реализованы в разработанных и внедренных в производство технологических процессах механической обработки сегмента нового корабля и сборки трубопроводов на ЗАО "ЗЭМ", а согласование ТД по механической обработке проводится по алгоритму, разработанному в рамках данной работы. Полученные в работе рекомендации по отработке на технологичность, стратегиям врезания и обработки, а также режимам резания при изготовлении деталей с ВКО использованы в выпущенной и внедренной в производство на ЗАО «ЗЭМ» технологической инструкции.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждены на 24-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». Пенза, 2011; 19-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 50-летию первого полета человека в космос. Королев, МО, 2011; 3-ей и 4-той Всероссийской научно-технической конференции «Будущее машиностроения России». Москва, 2010 - 2011; городской конференции «Инновации в жизнь». Королев, МО, 2012; научных семинарах кафедры инструментальной техники и технологий» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2010 - 2015.

Публикации. По содержанию работы и основным результатам исследований опубликовано 11 научных работ, в том числе один патент на изобретение и пять статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, общим объемом – 5,15 п.л.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 165 страницах текста и содержит 81 рисунок, 20 таблиц, список литературы из 71 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние и определены ключевые направления ТПП изделий РКТ, проведен анализ существующих решений для повышения эффективности ТПП в области применения технологий механической обработки, аддитивных технологий, информационных технологий. Рассмотрены способы расчета сил резания и пример применения МКЭ для определения деформации элементов конструкции под действием режущего инструмента.

Выполнен обзор работ авторов, внесших большой вклад в решение проблемных вопросов повышения производительности процессов резания, а также в разработку методик расчета режимов и сил резания при мехобработке. Это в том числе работы: Г.И. Грановского, В.А. Гречишникова, А.Е. Древаля, С.В. Грубого, В.Н. Подураева, В.Ф. Боброва, В.К. Старкова, Y. Altintas; R.P.H. Faassen и др.

Проведен обзор работ по автоматизации технологической подготовки производства, выполненных В.И. Аверченковым, А.С. Васильевым, А.М. Дальским, А.И. Кондаковым, А.Ф. Колчиным, А.Г. Суловым и др.

Рассмотрены результаты работ по применению метода селективного лазерного спекания в производстве (Pratt&Whitney, GE Aviation, EADS, Boeing, ОАО «Авиадвигатель», ОАО «НПО Сатурн» и др.) и МКЭ для оценки деформаций при фрезеровании (Кугаевский С.С., Казимиров А.А. и др).

Определены ключевые направления ТПП и пути повышения ее эффективности на примере основного изделия базового предприятия. Проведен анализ трудоемкости отдельных технологий при изготовлении основного изделия базового предприятия, который показал, что технологии механической обработки, сборки (сварки) и испытаний в сумме составляют более 70% от общей трудоемкости изделия.

Объем и содержание технологической подготовки по этим направлениям несколько отличается, но тенденции схожи. Предприятие изготавливает модернизированные и новые изделия РКТ, проводя ТПП силами определенного количества специалистов по направлениям. Исходя из этого анализа, а также из условия готовности предприятия к производству корабля нового поколения, основную часть общей ТПП составляет трудоемкость технологической подготовки процессов мехобработки, сборки, испытаний, а также проектирование СТО и отработка на технологичность, которые в сумме составляют более 80% от всей трудоемкости подготовки изделия (Рис. 1). Есть все основания полагать, что такой расклад в целом сохранится и при изготовлении перспективных изделий РКТ.

Таким образом, для повышения эффективности ТПП перспективных изделий РКТ в первую очередь необходимо работать над повышением эффективности подготовки 5 ключевых направлений – механической обработки, сборки, испытаний, проектирование оснастки и отработки на технологичность, а также над внедрением информационных и аддитивных технологий.

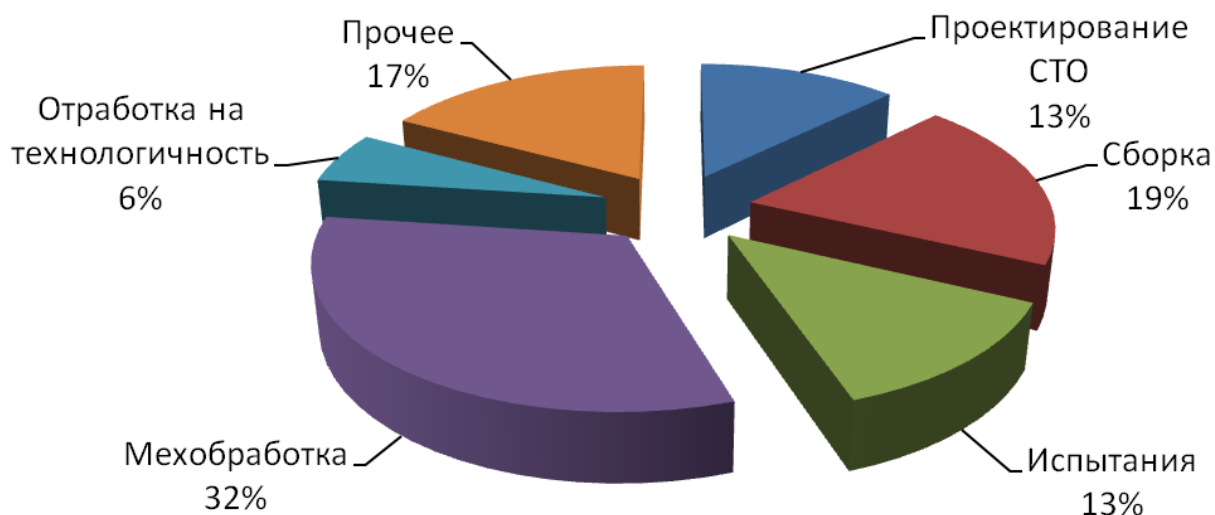


Рис. 1. Доля составляющих в общей трудоемкости технологической подготовки производства космического корабля

Во второй главе разработаны направления повышения эффективности ТПП за счет внедрения прогрессивных технологий.

Выделено два направления прогрессивных технологий. В качестве примера прогрессивных технологий при разработке техпроцессов рассмотрены информационные технологии, а в качестве примера повышения эффективности проектирования СТО рассмотрено использование аддитивных технологий. В диссертационной работе к повышению эффективности ТПП за счет информационных технологий отнесена модернизация алгоритмов ТПП разного уровня, которые были реализованы на основе PDM «Windchill» и с применением САПР «ADEM» и САПР «Pro/Engineer». Повышение эффективности ТПП за счет аддитивных технологий выражено в применении метода СЛС для снижения трудоемкости проектирования и изготовления СТО.

Модернизация алгоритмов ТПП охватывает все ключевые направления ТПП, а также весь процесс подготовки в целом. Традиционный последовательный цикл создания изделия отвечает стандартизованным процедурам, сложившимся в рамках «бумажной» технологии. Главными недостатками являются длительность цикла, где почти каждый этап начинается после окончания предыдущего, а также повторное создание в электронном виде данных, ранее уже созданных на предыдущих этапах.

Для устранения отмеченных недостатков проведена модернизация алгоритма ТПП и предложено использовать сквозной параллельный цикл создания изделия. На Рис. 2 показана его общая схема, взаимные связи между

различными САПР и информационные потоки, реализованные и отработанные в рамках диссертационной работы.

При работе по такой схеме в единой информационной среде Windchill на этапе объемного моделирования параллельно технологами проводится отработка на технологичность конструкции изделия, а на этапе выпуска и утверждения КД ведется разработка технологической документации и проектирование оснастки по ключевым технологиям изготовления изделия.

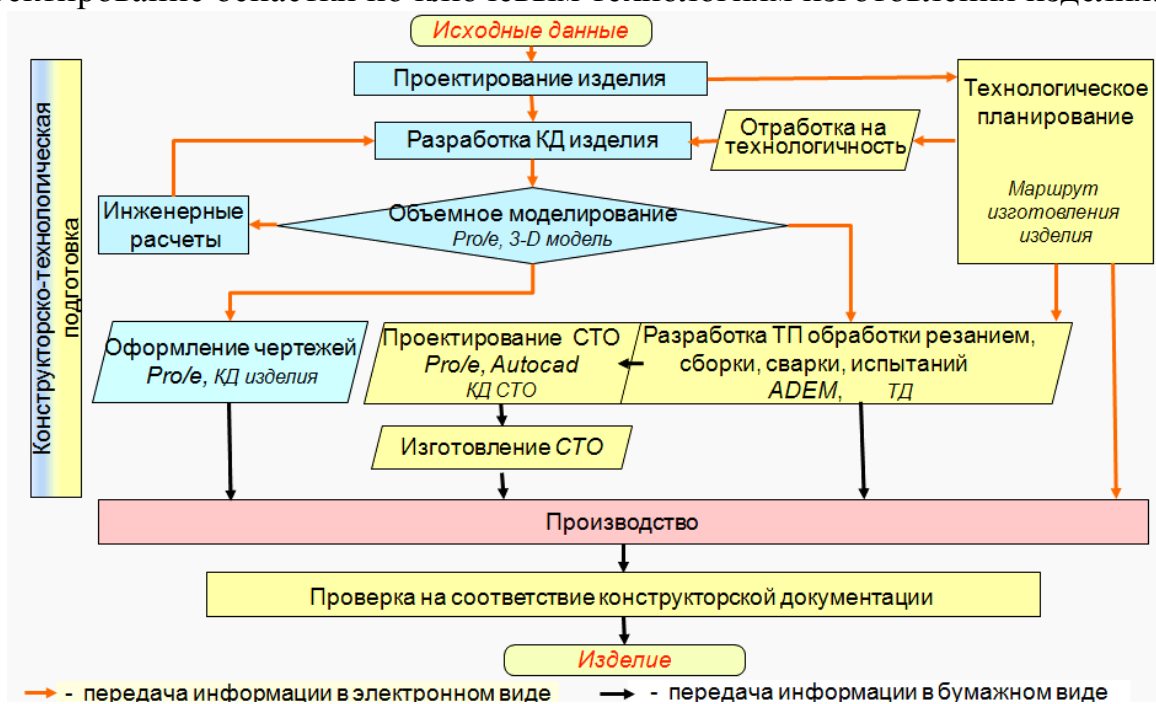


Рис. 2. Сквозной параллельный цикл создания изделия

В результате к моменту выпуска КД, ТПП в большей степени уже проведена, и цехи имеют возможность начать изготовление деталей и узлов изделия. В итоге достигнуто сокращение общей трудоемкости ТПП на 30% за счет автоматизации процесса в совокупности с модернизацией алгоритма ТПП.

При рассмотрении наиболее трудоемкой части ТПП, а именно разработки ТД на технологии мехобработки, сборки и испытаний (Рис. 2), зафиксированы недостатки, сложившиеся в рамках «бумажной технологии». С одной стороны, это высокая трудоемкость согласования ТД в бумажном виде, которое выполняет специалист высокой квалификации, с другой стороны - проблемы получения и архивирования ТД в электронном виде.

Для устранения этих недостатков алгоритм согласования был модернизирован и внедрен параллельный цикл согласования ТД в электронном виде на основе PDM «Windchill» и САПР ТП «ADEM». С целью конкретизации трудоемкости процесса разработана классификация деталей РКТ по трудоемкости согласования.

На Рис. 3 представлен модернизированный алгоритм. В рамках диссертационной работы алгоритм отработан на примере согласования технологического процесса мехобработки деталей 2-й и 3-й групп сложности. Несколько равнозначных этапов удалось запустить параллельно, а процесс

согласования выполнялся с АРМ технолога в электронном виде. За счет этого достигнуто сокращение времени согласования на 50%, при этом получена согласованная и утвержденная документация в электронном виде.

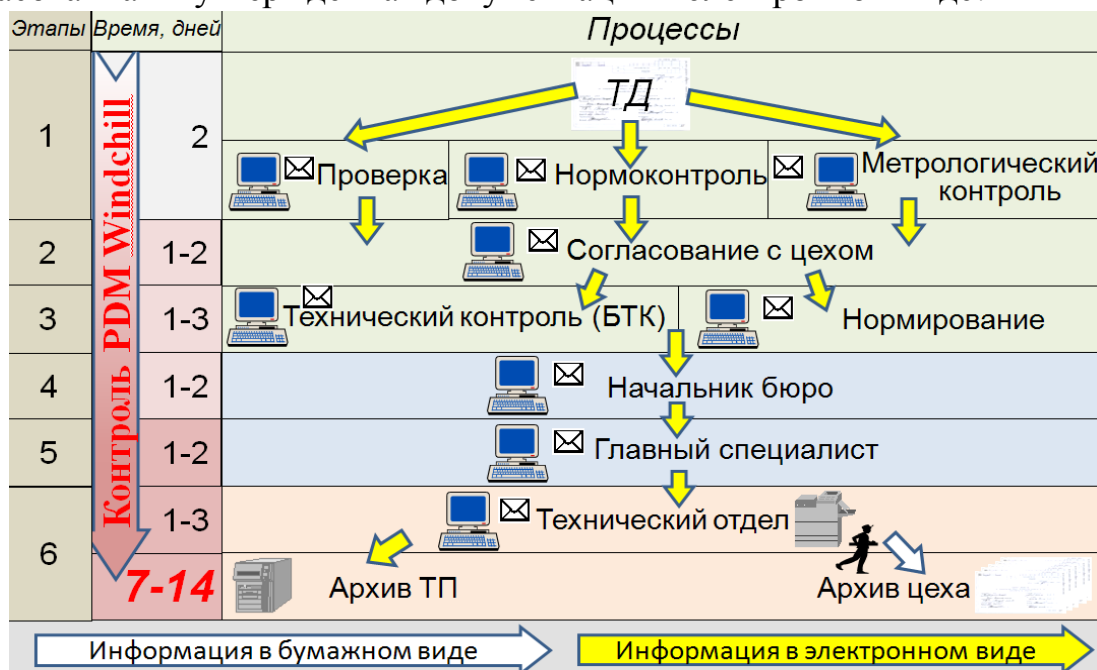


Рис. 3. Параллельный цикл согласования ТД в электронном виде на примере детали 2 группы сложности

По второму направлению прогрессивных технологий в рамках диссертационной работы предложен способ снижения трудоемкости проектирования СТО (составляющей 13% общей трудоемкости ТПП) за счет применения аддитивных технологий, в частности, за счет применения метода СЛС. Метод представляет собой процесс «выращивания» изделия по 3-д модели посредством ее спекания слой за слоем. Наиболее показательным примером применения этого метода для снижения трудоемкости проектирования СТО является сборка пучка трубопроводов.

Пучок трубопроводов представляет собой набор изогнутых в пространстве и собранных (спаянных) вместе в определенном положении отдельных трубопроводов, имеющих по краям законцовки для последующей стыковки. Для изготовления такого пучка в соответствии с электронной моделью изделия (ЭМИ) требуется спроектировать универсально-сборное приспособление (УСП) с большим количеством спецдеталей (или специального приспособления), его сборка и контроль на соответствие ЭМИ на контрольно-измерительной машине (КИМ). Затем производится установка отдельных трубопроводов в приспособление и их сборка в пучок. При таком алгоритме следует отметить высокую трудоемкость проектирования и изготовления СТО. Для снижения трудоемкости проектирования СТО и изготовления пучка в целом разработан алгоритм с применением метода СЛС. На основе конструкторской ЭМИ разрабатывается ЭМИ прототипа, при этом для повышения жесткости пучка трубки целиком заполняются, вводятся перемычки между трубками.

После этого на основе ЭМИ прототипа разрабатывается технологическая модель прототипа: модель переводится в формат *.stl и тестируется на наличие ошибок. Далее в соответствии с загруженной в установку СЛС моделью выполняется выращивание этой модели и некоторые другие технологические переходы, необходимые для получения прототипа методом селективного лазерного спекания. На следующем этапе «выращенный» прототип устанавливается на УСП, которое при помощи универсальных поворотных элементов настраивается для установки и сборки пучка. После установки всех поворотных элементов в соответствии с положением законцовок они фиксируются, и выращенный прототип снимается с УСП. На последнем этапе отдельные трубопроводы устанавливаются на УСП в соответствии с заданным положением, и после фиксации осуществляется их сборка-пайка в пучок.

В результате внедрения технологии (Рис. 4) по этому алгоритму трудоемкость проектирования СТО снижена на 73%. Достигнуто снижение трудоемкости цикла ТПП пучка на 60%, а снижение трудоемкости изготовления пучка трубопроводов составляет 65% (со 170 до 110 н/ч).

На способ изготовления пучка трубопроводов по данному алгоритму получен патент РФ №2507432.

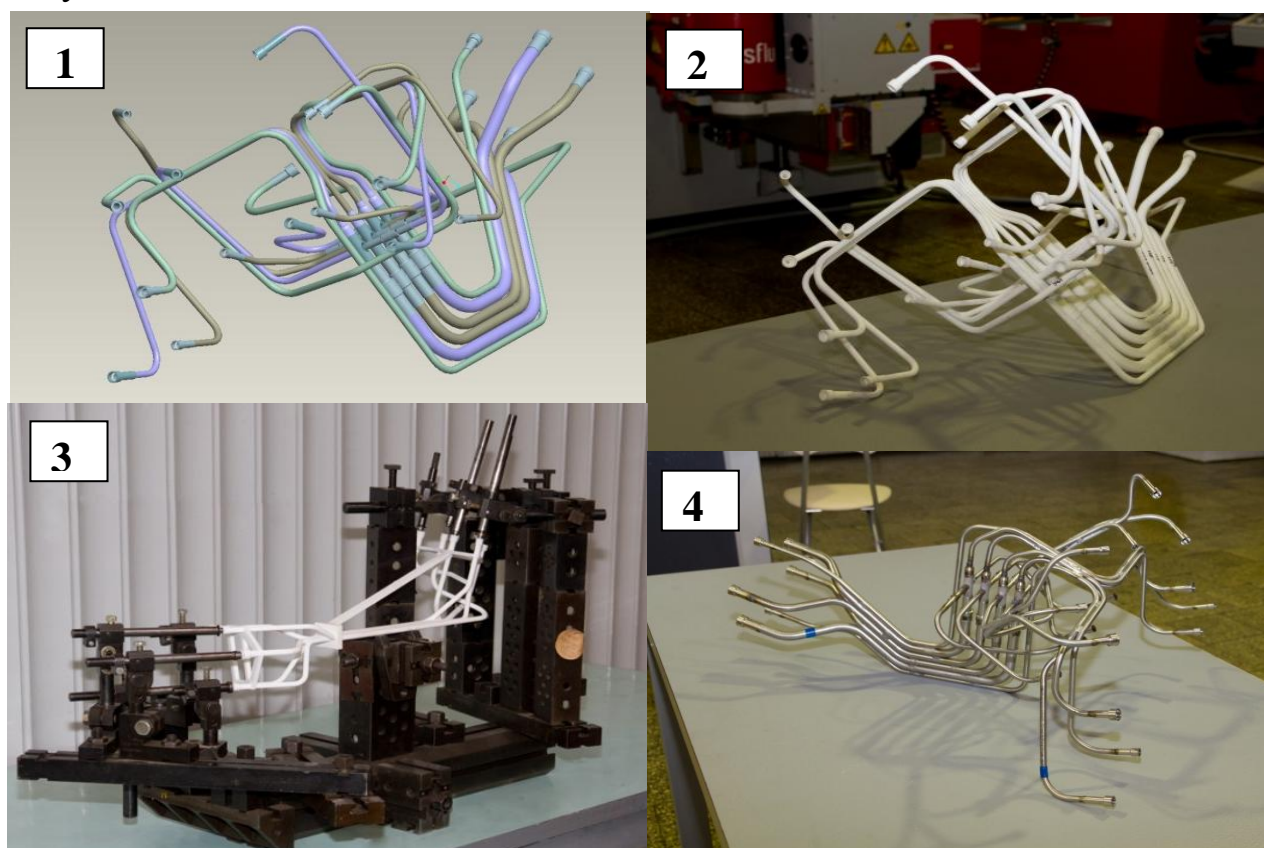


Рис. 4. Технология сборки пучка с применением метода СЛС:
1 - ЭМД. 2 - прототип СЛС. 3 - настройка УСП. 4 - собранный узел

В третьей главе приведены результаты оптимизации ТПП корпусной детали перспективного изделия, имеющего ВКО из высокопрочного алюминий-скандиевого сплава 01570С. Корпус с ВКО представляет собой тонкостенную оболочку с продольными и поперечными ребрами, обеспечивающими

повышенную жесткость на изгиб и устойчивость конструкции при осевом сжатии. Поэтому основной задачей отработки на технологичность при изготовлении является определение возможности механической обработки корпуса с ВКО в соответствии с заданными параметрами, без деформаций дна и стенок конструкции.

Исходя из условий эксплуатации корпуса с ВКО, одним из ограничений является ограничение по шероховатости обработанных поверхностей дна и стенок карманов. Результаты экспериментальных исследований по шероховатости при фрезеровании заготовок из сплава 01570С приведены в главе 4.

Из технологических условий обработки рассматриваемой в работе ВКО следуют и рассмотрены ограничения по силе и режимам резания. Ограничение по силе резания связано с малой жесткостью ВКО при обеспечении допуска на толщину дна кармана. Ограничение по режимам резания связано с тем, что обработка корпуса предполагается на крупногабаритном обрабатывающем центре с фрезерной головкой мощностью 20 кВт и максимальной частотой вращения шпинделя 10000 об/мин. При этом величина подачи ограничена в пределах 2000 мм/мин в связи с обработкой относительно небольших по размерам карманов ВКО на крупногабаритной детали, которая подразумевает частую смену направления обработки и торможения в углах траектории.

Анализ корпусных деталей с ВКО показывает, что технологичность этих деталей при механической обработке определяется материалом M для ее изготовления в совокупности с ее геометрическими размерами G , их допусками IT и шероховатостью поверхностей Ra :

$$T = F(M, G, IT, Ra) \quad (1)$$

В работе предложено технологичность деталей с ВКО при мехобработке определять коэффициентом ребра K_p (2) и коэффициентом дна K_d (3), представляющими собой отношения геометрических параметров кармана:

$$K_p = H_p / S_p, \quad (2)$$

$$K_d = L_d / S_d, \quad (3)$$

где H_p – высота ребра; S_p – толщина ребра; L_d – меньшая длина кармана; S_d – толщина дна.

В таблице 1 приведены результаты анализа на технологичность ВКО в зависимости от значений коэффициентов ребра и дна. Значения получены на основе результатов нагружения 12-ти электронных моделей обечаек с соответствующими коэффициентами K_d и K_p силами, действующими в процессе резания, с помощью метода конечных элементов в САПР «CATIA».

Таблица 1

Технологичность Коэффициент	Технологична (конструктивные размеры не влияют на получение ее параметров)	Ограниченно технологична (имеются ограничения по режимам обработки)	Нетехнологична (изготовление с заданными параметрами нецелесообразно)
K_p	< 15	$15 - 30$	> 30
K_d	< 40	$40 - 60$	> 60

По результатам расчета для корпуса с ВКО нового корабля получены следующие коэффициенты: $K_p=7$, $K_d=50$. Таким образом, корпус отнесен к категории «условно технологичного» по значению коэффициента K_d , что говорит о необходимости оптимизации последовательности и режимов при чистовой обработке дна с целью исключения деформаций и выхода размера по толщине за пределы допуска.

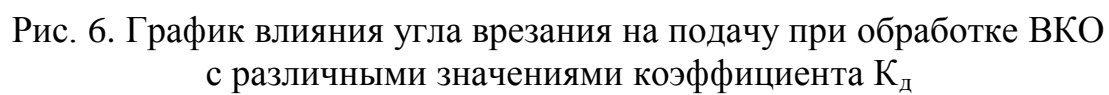
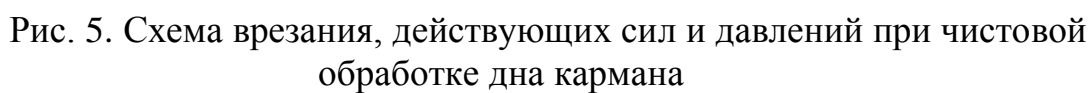
С целью определения оптимальной последовательности обработки кармана ВКО корпуса нового корабля проведено моделирование стратегий врезания и обработки в САПР «ADEM».

Показателями при выборе последовательности обработки кармана приняты трудоемкость и условия работы фрезы. Ограничениями являются предельное значение подачи, а при врезании – сила, действующая на дно кармана.

На основании проведенного моделирования оптимальной последовательностью обработки кармана приняты стратегия врезания «спиральное по контуру» и стратегия обработки «спираль».

Для оптимизации режимов резания с учетом исключения деформаций элементов ВКО рассчитаны силы, действующие при фрезеровании кармана. В основе расчета использована методика, разработанная на кафедре МТ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, но отличительной особенностью выполненного расчета в диссертации является определение сил и давлений от торцевых кромок фрезы. На Рис. 5 показано положение фрезы при врезании под углом τ для чистового фрезерования дна кармана. Со стороны радиусной части кромки 23 и торцевых кромок 34, 56 на дно кармана действуют силы: P_{223} , P_{234} , P_{256} . Полная схема расчета и последовательность формул приведены в тексте работы. По разработанной расчетной программе произведен расчет сил, действующих на дно при врезании для различных значений подачи на зуб и угла врезания. При помощи САПР «САТИА» методом конечных элементов рассчитаны эквивалентные напряжения σ и деформации δ дна кармана в момент врезания.

По результатам расчета проведена оптимизация параметров, непосредственно влияющих на деформацию дна, а именно подачи на зуб S_z и угла врезания τ . Расчет проведен для различных диапазонов коэффициента дна K_d . На Рис. 6 приведены графики, иллюстрирующие результаты расчета.



Область допустимых параметров режима резания при обработке дна ВКО с $K_d < 40$ не ограничена ввиду отсутствия существенных деформаций дна. Область допустимых параметров при обработке дна ВКО для $40 < K_d < 60$ ограничена уравнением (4):

$$S_z = 1,92\tau^{-1,36} \quad (4)$$

Тогда при угле врезания $\tau = 9^\circ$ максимальная подача составляет $S_z = 0,1$ мм/зуб. На Рис. 6 также показано ограничение $S_z = 0,17$ мм/зуб, вызванное максимальной минутной подачей $S_m = 2000$ мм/мин в связи с инерционностью обработки крупногабаритной детали на станке с ЧПУ.

Таким образом, анализ технологичности корпуса с ВКО, выбор последовательности и оптимизация параметров обработки позволяют провести ТПП обечайки заданных конструктивных размеров.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований по обрабатываемости высокопрочных алюминиевых сплавов.

В лабораторных и производственных условиях исследованы шероховатость обработанной поверхности и силы резания при фрезеровании высокопрочных алюминий-литиевого и алюминий-скандиевого сплавов марок 01570С, В1469 в сравнении со стандартным алюминиевым сплавом АМгб в одинаковых условиях. Проведены исследования по определению стойкости твердосплавной фрезы при обработке высокопрочных алюминиевых сплавов.

Эксперименты по шероховатости обработанной поверхности проведены на ЗАО «ЗЭМ» на обрабатывающих центрах TOYODA UG550 и TOYODA FH550SX. Шероховатость поверхностей дна и стенок фрезерованных пазов и уступов измерена на портативном профилометре Mitutoyo Surftest SJ-301.

Для 3-х типовых фрез (цельные твердосплавные Walter и MasterCut, и сборная со сменными пластинами Iscar) с геометрией режущей части для обработки алюминиевых сплавов проведен однофакторный эксперимент по частоте вращения шпинделя (до 13000 об/мин) и подаче (до 0,2 мм/зуб). Установлено, что шероховатость поверхностей в исследованных диапазонах режимов резания при высокой жесткости технологической системы не превышает значений $R_a = 1$ мкм, что в 3 раза ниже, чем задано в КД корпуса.

Эксперименты по определению сил резания при фрезеровании заготовок из сплавов В-1469, 01570С и АМгб проведены на экспериментальной установке кафедры МТ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, состоящей из фрезерного станка с ЧПУ, динамометра УДМ-600 и ПЭВМ с преобразователем сигналов. Обработка выполнена цельными твердосплавными фрезами Walter и CM Tools.

На Рис. 7 приведены графики суммарной силы резания в зависимости от минутной подачи при чистовой обработке вертикальной плоскости с глубиной $t = 1,6$ мм и шириной $B = 8$ мм. Сила резания для высокопрочных алюминиевых сплавов (01570 и В-1469) в сравнении со сплавом АМгб выше в среднем на 13 и 27%, что практически соответствует соотношению прочности для этих сплавов.

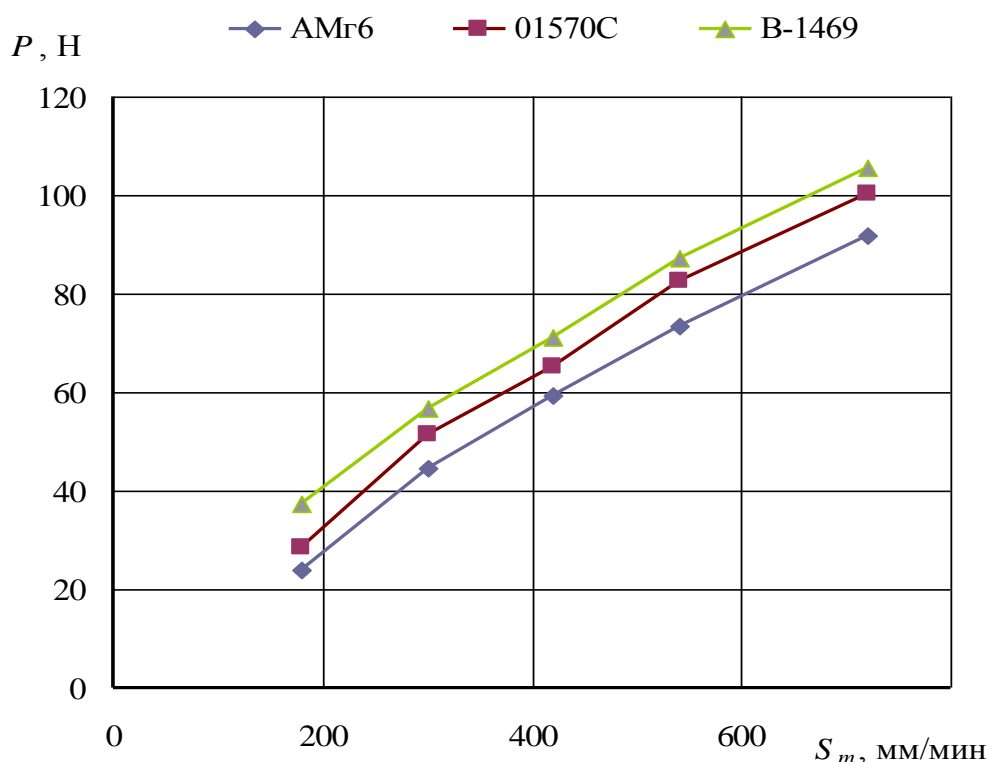


Рис. 7. Графики зависимости результирующей силы резания P от минутной подачи S_m для алюминиевых сплавов различных марок

Суммарное основное время фрезерования карманов в корпусной детали перспективного изделия на рекомендованных режимах составляет порядка 7800 минут. Поэтому для определения расчетной стойкости инструмента в производственных условиях ЗАО "ЗЭМ" был проведен стойкостной эксперимент, в рамках которого зафиксировано суммарное время работы $T = 498$ мин для цельной твердосплавной фрезы MasterCut $d = 16$ мм при обработке ряда заготовок и образцов из сплава 01570С. Проведено исследование износа фрезы на оптическом микроскопе с увеличением $200\times$ (Рис. 8):

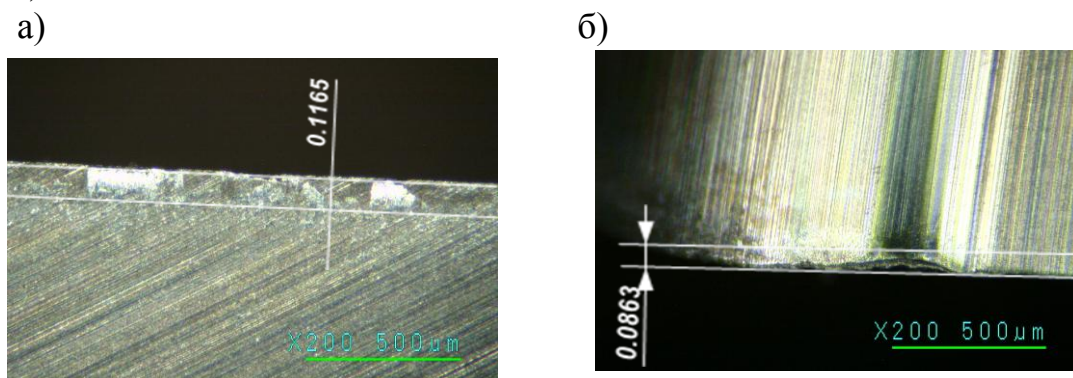


Рис. 8. Износ передней поверхности а) и задней поверхности б) зуба фрезы после 498 мин. работы

По результатам стойкостного эксперимента установлено, что твердосплавная фреза сохранила работоспособное состояние, максимальный

износ по передней поверхности составил 0,12 мм, по задней поверхности - 0,09 мм, присутствуют сколы и выкрашивания в пределах величины износа.

Таким образом, расчетное количество концевых твердосплавных фрез, достаточное для обработки карманов крупногабаритного корпуса изделия, при допустимом предельном износе $h_z=0,1$ мм и 20% коэффициенте запаса составляет не более 18 штук без учета возможности переточек.

Пятая глава посвящена апробации результатов исследований и разработке практических рекомендаций.

Опыт внедрения разработанного алгоритма согласования ТД в производственных условиях показал, что после адаптации системы и участников к процессу, предполагаемые результаты (глава 2) соответствуют результатам, полученным при внедрении.

Проведена экспериментальная проверка результатов выбора стратегии врезания, в рамках которой зафиксированы значения силы резания вдоль оси фрезы. Для стратегий врезания «спиральное по контуру», «спиральное», «вертикальное» - сила резания составила: 170, 240, 245 Н, соответственно.

Экспериментальная проверка результатов по шероховатости обработанных поверхностей подтвердила результаты исследований. При обработке на рекомендованных режимах тестовой детали «Элемент вафельной конструкции» и детали «Рамка» шероховатость обработанных поверхностей не превысила 1,5 мкм.

По результатам оптимизации параметров режима обработки ВКО и выбора последовательности обработки (Таблица 2) разработан технологический процесс и изготовлен сегмент с ВКО корпусной детали перспективного изделия (Рис. 9) в натуральную величину (1500x1700 мм).

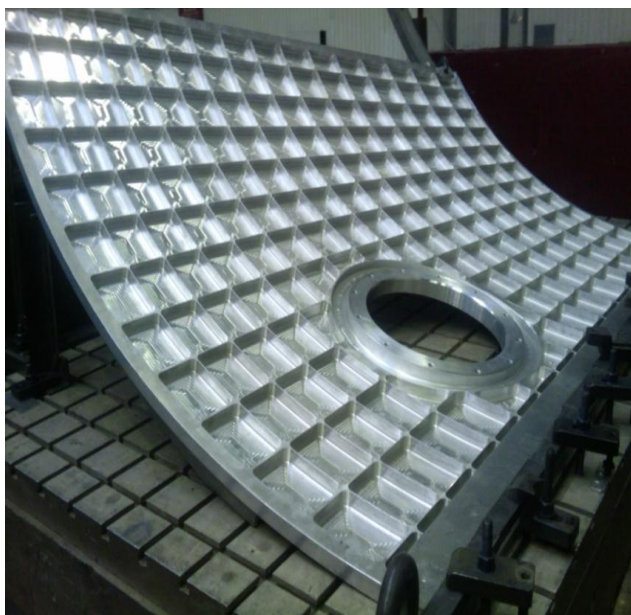


Рис. 9. Сегмент ВКО корабля нового поколения.

Таблица 2

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
K_p	7,5
K_d	50
<i>Стратегия обработки</i>	<i>Спираль</i>
n , об/мин	6000
S , мм/мин	1200
$B \times t$, мм	5.4x8
<i>Стратегия врезания</i>	<i>Спиральное по контуру</i>
n , об/мин	6000
S , мм/мин	1200
$B \times t$, мм	1x16
Угол врезания	9°
$T_{\text{маш}} = (171 \times 6,19) \times 1,05$	1112 мин
Расчетная сила давления фрезы на дно при врезании	322.7 Н
Расчетная деформация дна	0,14 мм

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определены ключевые направления для повышения эффективности ТПП при изготовлении перспективных изделий РКТ и выявлены их доли в общей трудоемкости ТПП: технологии механической обработки (32%), сборки (19%), испытаний (13%), проектирование СТО (13%), отработка КД на технологичность (6%), а также информационные и аддитивные технологии.

2. За счет разработанных и внедренных параллельных процессов и работе в едином информационном пространстве сроки проведения ТПП для новых изделий РКТ сокращены на 50%; практическая реализация процесса согласования и утверждения ТД показала сокращение сроков процесса на 40%.

3. Доказана возможность повышения эффективности ТПП в части проектирования СТО за счет применения метода селективного лазерного спекания: снижение трудоемкости ТПП при сборке трубопроводов составило 144 н/ч.

4. Разработанная методика проведения ТПП сложного технического объекта – корпусной детали с ВКО, включающая организацию ТПП, анализ технологичности конструкции, выбор оптимальной стратегии обработки типового элемента ВКО, оптимизацию режимов обработки с учетом исключения деформации элементов ВКО, позволяет проводить ТПП корпусной детали с ВКО произвольных размеров. Рекомендованы коэффициенты ребра ($K_p < 30$) и дна ($K_d < 60$), которые являются технологическим ограничением при проектировании деталей с ВКО.

5. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что оптимальной стратегией врезания, обеспечивающей минимальное воздействие на дно кармана ВКО при чистовой обработке, является стратегия врезания «спиральное по контуру».

6. Проведенные экспериментальные исследования позволили получить и использовать на практике новые результаты по шероховатости поверхности в пределах $Ra < 1$ мкм при обработке высокопрочных алюминиевых сплавов, определить стойкость (400 мин) и рассчитать необходимое количество твердосплавных фрез на обработку карманов крупногабаритного корпуса перспективного изделия.

7. Результаты диссертационной работы обеспечили разработку технологических процессов для обработки деталей с ВКО и сборки пучка трубопроводов. Согласование ТД по механической обработке проводится по алгоритму, разработанному в данной работе. Полученные в работе рекомендации по отработке на технологичность, стратегиям врезания и обработки, а также режимам резания при изготовлении деталей с ВКО использованы в выпущенной и внедренной в производство на ЗАО «ЗЭМ» технологической инструкции.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Зайцев А.М. Автоматизация технологической подготовки механической обработки деталей ракетно-космической техники // Справочник. Инженерный журнал. 2012. №12. С.19-22. (0,8 п.л.)
2. Грубый С.В., Зайцев А.М. Исследование концевых фрез при фрезеровании корпусных деталей из алюминиевых сплавов // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2013. №12. С.31-54. (2,5 п.л./1,25 п.л.)
3. Зайцев А.М., Шачнев С.Ю. Повышение эффективности обработки корпусных деталей из перспективных алюминиевых сплавов // Справочник. Инженерный журнал. 2014. №3. С.11-17. (2 п.л./1 п.л.)
4. Грубый С.В., Зайцев А.М. Обоснование условий фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2014. №5. С.12-30. (1,7 п.л./0,85 п.л.)
5. Грубый С.В., Зайцев А.М. Оптимизация режимных параметров фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2015. №7. С.44-65. (2,5 п.л./1,25 п.л.)

Патенты:

6. Способ изготовления пучка трубопроводов: патент на изобретение №2507432 РФ / А.М. Зайцев [и др]; заявл. 04.10.12; опубл. 20.02.2014.

В других научных изданиях:

7. Зайцев А.М., Шачнев С.Ю. Взаимодействие САПР CATIA, Pro/Engineer и ADEM в сквозном цикле создания изделия // САПР и графика. 2007. №3. С.41-44 .
8. Зайцев А.М. Повышение эффективности технологии фрезерной обработки деталей из перспективных алюминиевых сплавов на современном оборудовании с ЧПУ // Будущее машиностроения России: Сб. трудов 3-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 2010. С.20-21.
9. Зайцев А.М. Исследование обрабатываемости перспективных алюминиевых сплавов // Будущее машиностроения России: Сб. трудов 4-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 2011. С.18-19.
10. Шачнев С.Ю., Зайцев А.М. Селективное лазерное спекание как метод повышения эффективности подготовки производства // РИТМ. 2012. №6. С.34-36.
11. Зайцев А.М. Исследование обрабатываемости перспективных алюминиевых сплавов // Труды РКК «Энергия» им. С.П.Королева. Серия XII. Выпуск №1-2. Материалы XIX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов // Королев 2013. С.114-118.