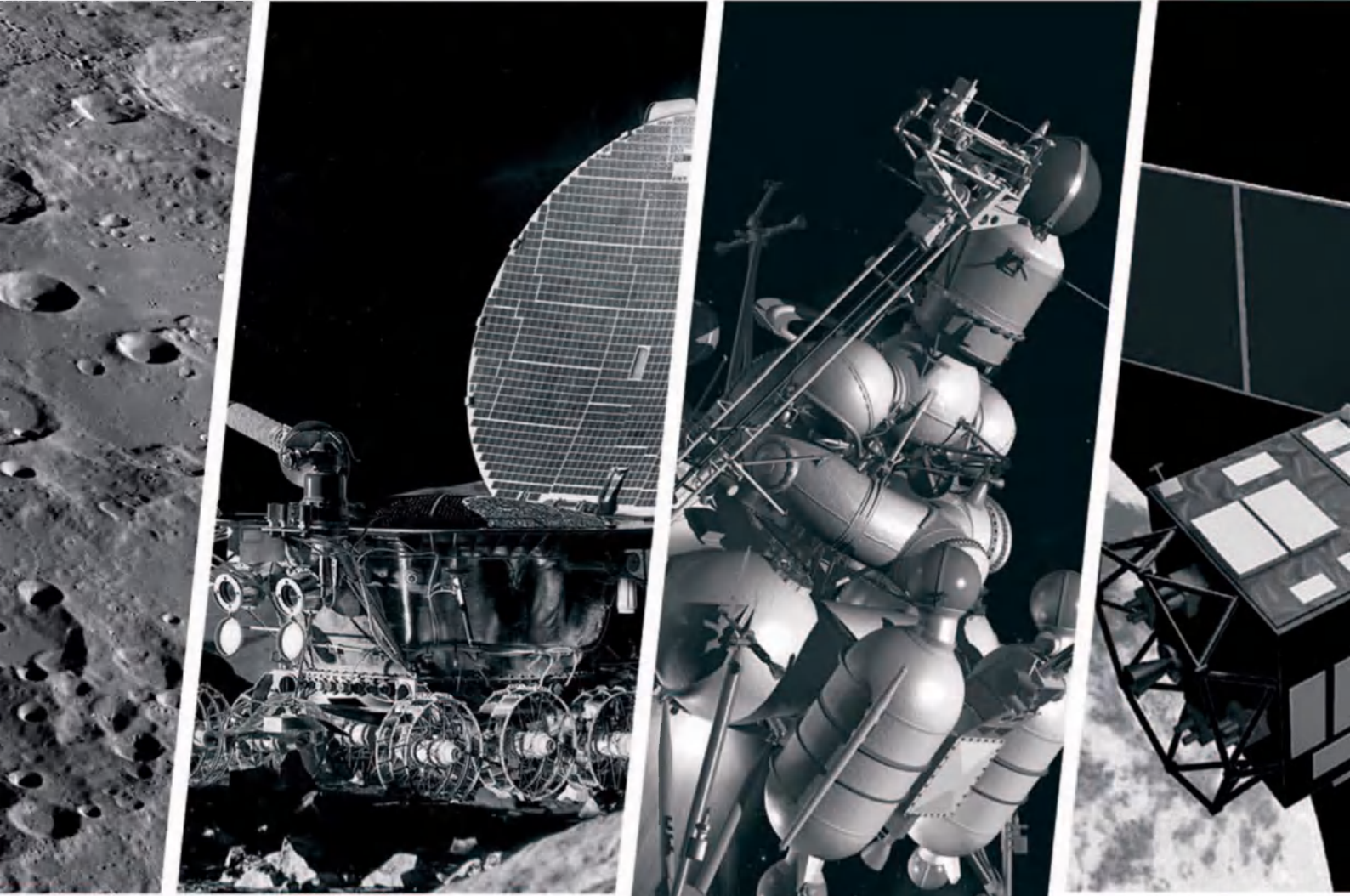




НПО ТЕХНОМАШ  
ИМ. С.А. АФАНАСЬЕВА



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# ВЕСТНИК «НПО «ТЕХНОМАШ»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ  
ВЕСТНИК «НПО «ТЕХНОМАШ»

Учредитель: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ТЕХНОМАШ»

И.о. генерального директора Ю.В. Власов  
Первый заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе А.И. Кузин  
Заместитель генерального директора по специальным технологиям А.В. Бараев

*Редакционная коллегия:*

Д.А. Мургазин  
И.С. Рубцов  
О.Д. Бакланов  
Г.Г. Райкунов  
В.Г. Бещеков  
Ю.М. Должанский  
Т.В. Наумов

*Экспертная комиссия №1:*

А.Н. Михайлов  
К.Г. Данилова

*Выпускающий редактор*

Г.А. Аношкина  
Научный редактор  
М.А. Прусаков

*Верстка и дизайн*

М.Е. Боброва (обложка)

Номер свидетельства	ПИ № ТУ 50 - 02894
Дата регистрации	31.01.2020
Статус свидетельства	действующее
Наименование СМИ	Научно-технический журнал вестник «НПО «Техномаш»
Форма распространения	печатное СМИ журнал
Территория распространения	г. Москва
Учредители	федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Техномаш»
Адрес редакции	127018, Москва г., проезд Марьиной Рощи 3-й, д. 40
Языки	русский

На сайте ФГУП «НПО «Техномаш» <http://www.tnpro.ru> в открытом доступе представлены:  
электронная версия, содержание, аннотации и необходимая информация об авторах

Адрес: 127018, г. Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, дом 40, ФГУП «НПО «Техномаш»  
Телефон: +7 (495) 689-95-04, факс: +7 (495) 689-73-45  
E-mail: [info@tnpro.ru](mailto:info@tnpro.ru), web-site: <http://www.tnpro.ru>

Тираж: не более 999 экз.



## ✦ ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЯМ

Уважаемые коллеги!

Представляем вашему вниманию новый номер научно-технического журнала «Вестник «НПО «Техномаш», вышедший в новом формате – журнал прошел регистрацию как СМИ в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещаемую на платформе «Научной электронной библиотеки» на сайте <http://www.elibrary.ru>, публикуется на официальном сайте ФГУП «НПО «Техномаш».

Наш журнал в новом статусе становится более открытым, и мы приглашаем авторов из организаций ракетно-космической промышленности и смежных отраслей, а также профильных вузов страны к публикации своих статей. На страницах журнала авторы продолжают дискутировать на актуальные отраслевые темы, обсуждать важнейшие проблемы, обмениваться опытом и мнениями.

Не останавливаясь на достигнутом, мы ставим перед собой новую цель – включение журнала в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». Для этого мы планируем расширить рубрику, привлечь к публикациям научных работников и ученых ведущих профильных вузов страны, размещать на страницах журнала научные работы Совета главных технологов предприятий РКП, Совета главных метрологов и др. Включение Вестника «НПО «Техномаш» в перечень рецензируемых научных изданий (ВАК) позволит молодым ученым и специалистам отработать навыки ведения научно-исследовательской работы.

Полвека назад «Луноход», разработанный учеными СССР, прилунился на поверхность естественного спутника Земли, и первый выпуск обновленного журнала содержит аналитические статьи, посвященные Программе исследования и освоения Луны, а также современному состоянию и перспективам развития производственной системы Госкорпорации «Роскосмос», перспективам ее дальнейшего развития.

И. о. генерального директора  
ФГУП «НПО «Техномаш»

Ю.В. Власов





## СОДЕРЖАНИЕ

### ✦ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ

*Бараев А.В., Должанский Ю.М., Жарков Д.Е., Илингина А.В.*

Проект «Луна-Грунт» – очередной этап российской программы исследования и освоения Луны ..... 3

### ✦ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

*Власов Ю.В.*

Современное состояние и перспективы развития производственной системы Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» ..... 6

*Бараев А.В.*

Ключевые направления развития технологий производства изделий ракетно-космической техники ..... 16

### ✦ НАНОТЕХНОЛОГИИ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Агуреев Л.Е., Колюкова К.С., Иванов А.В., Бармин А.А., Ризаханов Р.Н., Кузин А.И.*

Разработка технологий создания лёгких наноструктурных материалов и получение высокочистых наноразмерных порошков алюмомагниевого шпинели для изготовления конструкций и аппаратуры космического назначения ..... 24

*Власов Ю.В., Кузин А.И., Семенов В.В., Егоров А.В., Мазуркевич А.Н., Ахмедов Ф.А., Быков А.А., Кондратенко А.А., Ризаханов Р.Н., Кинжагулов И.Ю., Малеев Н.А.*

Результаты научно-технической программы Союзного государства Россия-Беларусь «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СГ») ..... 28

### ✦ ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Вайцехович С.М., Кузин А.И., Мысливец Е.А.*

Легирование сталей аустенитно-мартенситного класса наноразмерными порошковыми модификаторами ..... 56

*Бецеков В.Г., Сиякова Т.И., Бочаров Ю.А.*

Эффект сферодинамики – научный инструментальный изменения структуры металла заготовок с использованием бесприводного источника деформирования в технологических процессах изготовления нового поколения деталей агрегатов изделий РКТ ..... 69

### ✦ ЭЛЕКТРОННАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

*Бараев А.В., Должанский Ю.М., Дядьков К.С., Илингина А.В.,*

*Картузов Н.О., Степанов В.В., Фомичёв А.О.*

Информационные электронные паспорта на технологии и специальное оборудование, разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2019 году ..... 75

## ✦ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ

УДК 629.7

*Бараев А.В., Должанский Ю.М., Жарков Д.Е., Илингина А.В.*

(ФГУП «НПО «Техномаш»)

### Проект «Луна-Грунт» – очередной этап российской программы исследования и освоения Луны

В статье приведены общие сведения о проекте «Луна-Грунт» на этапе экспертизы технического предложения и соответствующее заключение ФГУП «НПО «Техномаш».

**Ключевые слова:** космический аппарат, исследование Луны, лунный грунт.

В 2013 г. подписано соглашение между ФКА Российской Федерации и Европейским Космическим Агентством (ЕКА) о сотрудничестве в исследовании тел Солнечной системы робототехническими средствами, а обменным письмом ЕКА и Госкорпорации «Роскосмос» в 2015-м закреплено «Сотрудничество между ЕКА и Роскосмосом в области освоения Луны – начальный этап».

Реализацией такого сотрудничества является, в частности, техническое предложение на разработку ракетного космического комплекса (РКК), полезной нагрузкой которого станет космический аппарат «Луна-Грунт» (КА-ЛГ).

Основные задачи научной программы РКК «Луна-Грунт»:

- запуск и мягкая посадка КА-ЛГ на поверхность Луны в околополярной её области;
- забор образцов лунного грунта (ЛГ) с глубины до 2-х метров;
- загрузка проб грунта в бортовые научные приборы и изучение проб непосредственно на борту КА;
- капсуляция образцов грунта с различных глубин забора с сохранением в образцах воды и летучих веществ грунта;
- загрузка капсул в специальный приёмный контейнер возвращаемого модуля КА;
- доставка образцов ЛГ на Землю в заданный район РФ;
- изъятие, сохранение и последующее всестороннее исследование доставленных образцов ЛГ.

В задачи КА-ЛГ входит также проведение научных исследований с помощью размещенного в спускаемом модуле лунохода.

В состав разрабатываемой комплексной структуры кроме РКК войдут:

- наземный комплекс управления (НКУ-ЛГР);

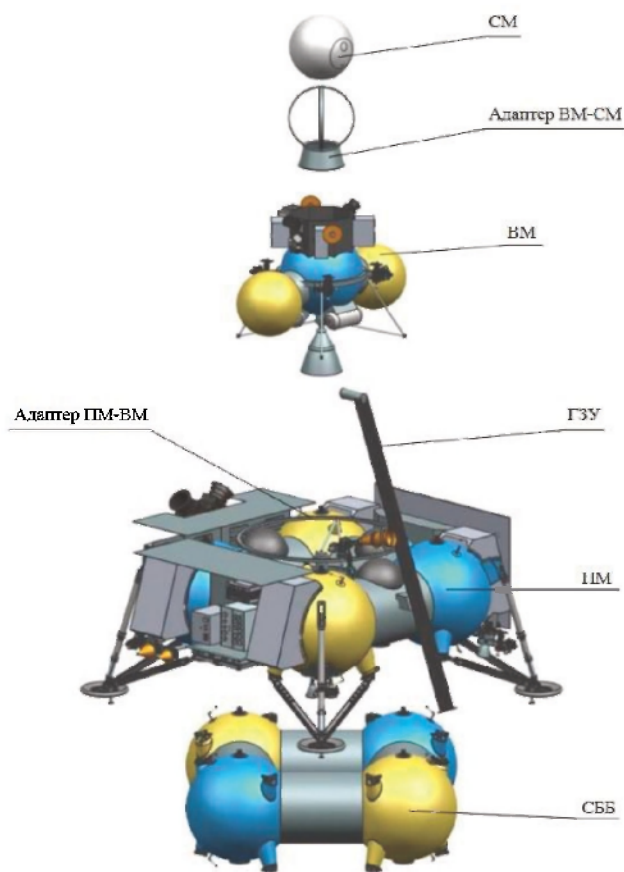


Рис. 1. Основные сборочные единицы КА «Луна-Грунт»<sup>1</sup>

<sup>1</sup> все приведенные в статье рисунки заимствованы из представленных ФГУП «НПО «Техномаш» на экспертизу открытых материалов ТП

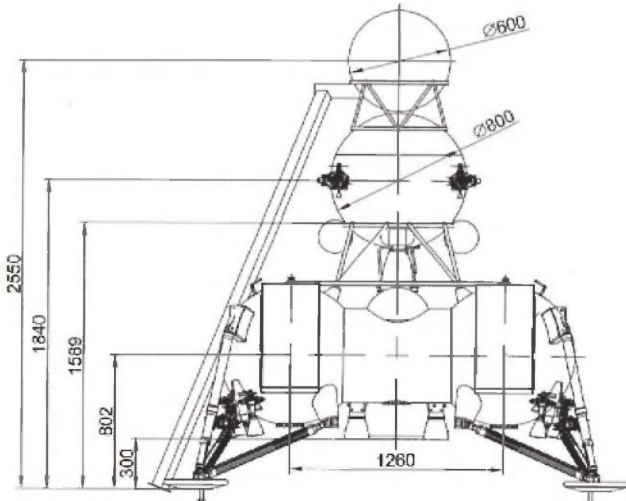


Рис.2. Предполагаемые габариты  
КА «Луна-Грунт» в сборе

- наземный научный комплекс (ННК-ЛГР);
- поисково-спасательный комплекс (ПСК);
- а обсуждаемыми вариантами средств выведения КА «Луна-Грунт» рассматриваются:
  - РН «Союз-2.1б» с РБ «Фрегат» (вариант 1);
  - РН «Союз-5» с РБ «Фрегат-СБУ» (вариант 2);
  - РН «Ангара-А5» из состава КРК «Амур» с РБ ДМ-03 (вариант 3) при этом основным предполагается вариант 3.

Основным источником задела для КА «Луна-грунт» являются космические аппараты АО «НПО Лавочкина» для исследования Луны, создаваемые в целях выполнения Федеральной космической программы 2015–2025 годов.

На сегодняшний день разработано и проходит экспертизу Техническое Предложение (ТП) на указанный проект, вновь разрабатываемым элементом которого является непосредственно «лунник» – КА «Луна-Грунт». Его основными конструктивно-функциональными сборочными единицами являются (рис. 1):

- спускаемый модуль (СМ);
- возвратный модуль (ВМ);
- грунтозаборное устройство (ГЗУ);
- перелётный модуль (ПМ);
- сбрасываемый блок баков (СББ);
- адаптеры ПМ-ВМ и ВМ-СМ с устройствами разделения;
- и не показанные на схеме:
  - бортовой радиокомплекс (БРК);

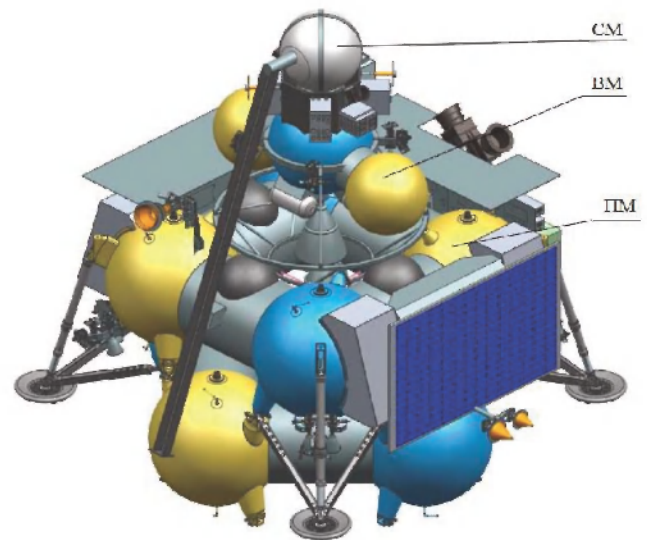


Рис. 3. 3D-компоновка ПМ КА «Луна-Грунт»

- луноход с системой съезда на поверхность Луны;
- бортовая кабельная сеть (БКС);
- комплекс научной аппаратуры (КНА), включающий:
  - элементы КНА, размещаемые на ПМ;
  - элементы КНА, размещаемые на луноходе;
  - элементы КНА, размещаемые на СМ;
  - малый автономный исследовательский комплекс (МАИМ).

Принятые на сегодня габаритные размеры одного из наиболее вероятных вариантов КА и его 3D-компоновка приведены на рис. 2 и 3.

Все конструктивные и функциональные элементы КА «Луна-Грунт» (за исключением парашютной системы приземления спускаемого модуля, блока управления и химических источников тепла) будут разрабатываться и изготавливаться АО «НПО Лавочкина».

В качестве задела для разработки КА «Луна-грунт» предполагается использовать космические аппараты «Луна-25» («Луна-Глоб»), «Луна 26» («Луна-Ресурс-1» ОА, «Луна-27» («Луна-Ресурс-1» ПА) и др., разрабатываемые АО «НПО Лавочкина» для исследования Луны в рамках НИОКР Федеральной космической программы России на 2015–2025 годы.

На рис. 4 показано назначение основных функциональных узлов КА «Луна-Грунт» на этапах его перелета к Луне (а) и возвращения на Землю (б).

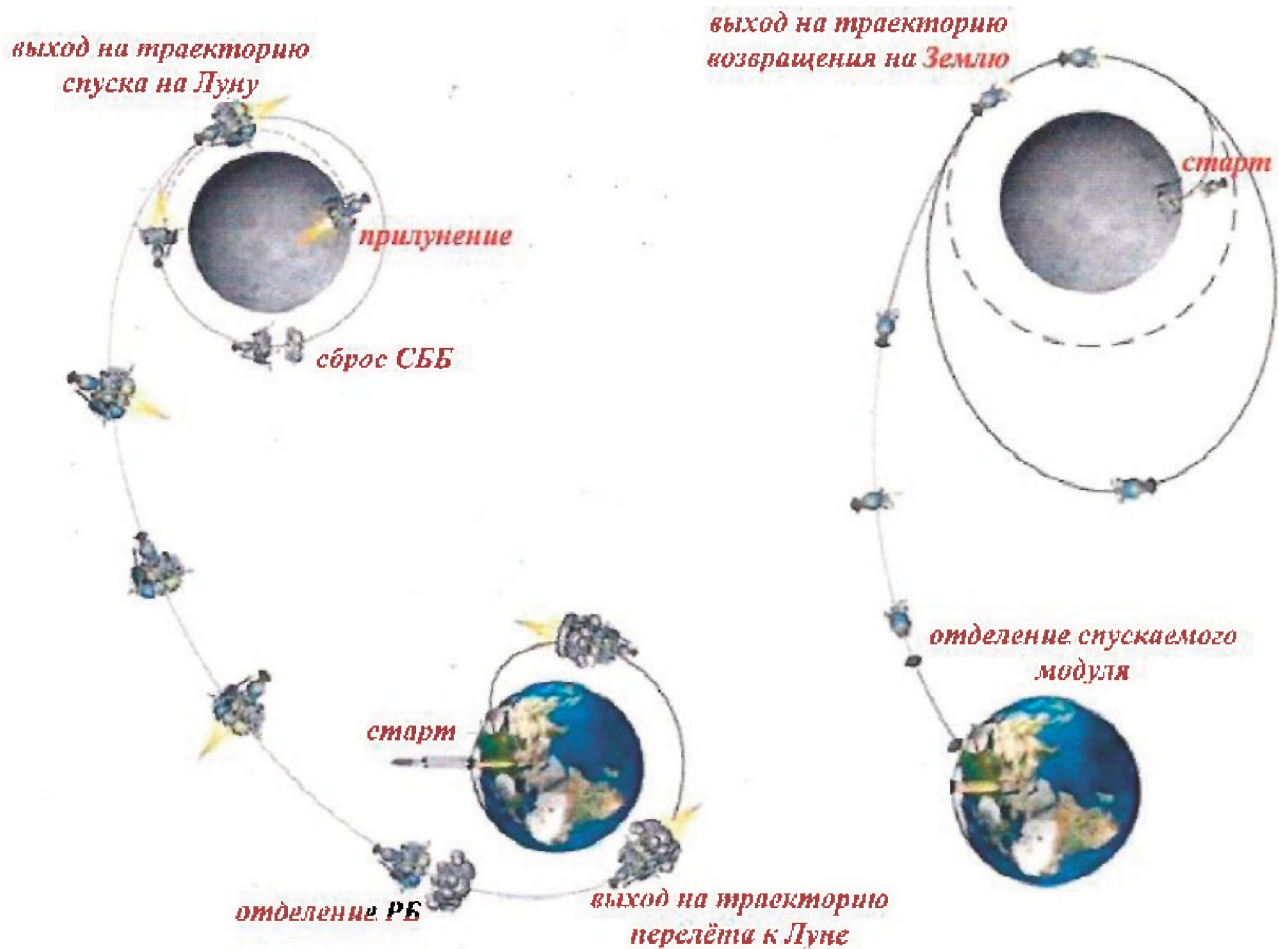


Рис. 4. Работа основных функциональных узлов КА «Луна-Грунт» на этапах его перелетов «Земля-Луна» и «Луна-Земля»: а) перелёт КА «Луна-Грунт» на Луну; б) перелёт возвращаемого модуля КА «Луна-Грунт» на Землю

Проект «Луна-Грунт» является важным этапом подготовки проектов по пилотируемой экспедиции на южный полюс Луны.

Анализ материалов ТП на разработку космического комплекса для доставки лунного грунта на Землю показал, что основной элемент проекта – многофункциональный космический аппарат – может быть изготовлен на существующих производственно-технологических мощностях предприятий отрасли и не потребует разработки новых технологий, методов контроля и испытаний.

Вместе с тем рекомендовано включить в состав ТП:

- предложения по проектам директивной технологической документации, прежде всего, на критические технологии изделия;
- проекты планов основных мероприятий по технологической подготовке производства изделия.

В целом предложено одобрить представленные на экспертизу материалы технического

предложения по созданию космического комплекса для доставки лунного грунта на Землю (СЧ ОКР «Луна-Грунт» (ТП); доработать с учётом замечаний ФГУП «НПО «Техномаш», и представить доработанный вариант ТП в Госкорпорацию «Роскосмос» для принятия решений о целесообразности продолжения и сроках выполнения последующих этапов реализации проекта.

В заключение следует отметить, что полученные в ходе реализации проекта данные могут представлять интерес для учёного сообщества западных партнёров России, в том числе, специалистов Китая, ЕКА и США.

Учитывая данный факт и успешный опыт сотрудничества Госкорпорации «Роскосмос» с NASA по международной программе МКС, можно предположить, что соответствующие структуры стран могут принять заинтересованное участие в реализации проекта и анализе его результатов.

## ✦ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

УДК 629.7

*Власов Ю.В.*

(ФГУП «НПО «Техномаш»)

### Современное состояние и перспективы развития производственной системы Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос»

В условиях системного кризиса ракетно-космической отрасли страны главной задачей является создание новой научно-производственной системы Госкорпорации «Роскосмос». Рассмотрены проблемы выхода предприятий отрасли на показатели, установленные Стратегией развития Госкорпорации «Роскосмос» до 2030 г. Предложены направления реорганизации производственных систем в отрасли при головной роли ФГУП «НПО «Техномаш», начиная с формирования системного проекта по научно-производственной системе Госкорпорации «Роскосмос».

**Ключевые слова:** ракетно-космическая отрасль, стратегия научно-технологического развития, научно-производственная система, системный проект.

Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642 утверждена и введена в действие Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, в которой подчеркнуто, что мы сегодня имеем отставание от ведущих мировых стран в области технологического развития. Данная Стратегия направлена на обеспечение технологического развития ведущих отраслей нашей страны. В качестве механизма для реализации Стратегии предусматриваются механизм стратегии, разрабатываемой в Госкорпорации «Роскосмос», планы инновационного развития в интегрированных структурах.

Системный кризис отрасли характеризуется ситуацией, когда практически все головные организации находятся в тяжелом финансовом состоянии, когда мы потеряли очень серьезный сегмент на ключевых рынках и имеем фактически десятикратное отставание по выработке продукции на одного человека по сравнению с ракетно-космической промышленностью (РКП) США, а также потерю привлекательности молодежи для работы в отрасли с точки зрения работодателя. Ключи кризиса в отрасли находятся в развале, который произошел в 90-е гг. – годы распада СССР, мы до сих пор из него выходим. В 90-е произошло сокращение финансирования по некоторым направлениям развития отрасли

в 15–20 раз. К концу 90-х годов российская орбитальная группировка составляла 42 КА, из них более 80% находилось за пределами гарантийного срока активного существования.

Начиная с 2000 г., ракетно-космическая отрасль получает стабильное и возрастающее финансирование. В этом заслуга наших предшественников – сотрудников Министерства общего машиностроения, которых мы называем «Школа С.А. Афанасьева». РКП России к 2005 г. выходит на темпы роста товарной продукции 13%, и эти темпы держатся до 2012 г. (в 2009 г. даже был всплеск до 21%). В данном периоде РКП и космонавтика России берут 40% мирового рынка коммерческих запусков. Например, в период 2005–2008 гг. наша страна сделала 102 запуска и запустила 150 аппаратов, из которых половина – зарубежного производства. В 2009 г. мы запустили 35 КА, и такой результат повторяется ежегодно: например, в 2012 г. запущено 32 КА. О каком кризисе в РКП России идет речь?

Что происходит в США в это время? У них точно также идут резкие сокращения заказов по линии Министерства обороны, а после 2004 г. и катастрофы «Спейс Шаттла» РКП США попадает в период дикого спада и начинает реформироваться. Первыми годами, когда начинается фиксироваться первый положительный выход РКП США из спада, считаются





Рис. 1. Основные структурные элементы производственной системы

2009–2010 гг., когда показано 6% роста. Но за это время РКП США проводит очень серьезную реструктуризацию. Она ставит перед собой единственную главную практическую задачу – слияние и поглощение всех промышленных компаний и корпораций в части создания специализированных центров и специализированных производств, выполняющих заказы Министерства обороны США. Сегодня РКП США – это семь ключевых корпораций, 90 тысяч работающих и номенклатура выпускаемой продукции, которую составляют не только КА, ракеты-носители и межконтинентальные баллистические ракеты, но и всё, что связано с системами противоракетной и противовоздушной обороны, зенитными и авиационными ракетами.

В России в 2009 г. Федеральное космическое агентство принимает решение о создании сначала шести (затем семи) интегрированных структур. Начинается реформирование по принципу «арифметического сложения», потому что все предприятия начинают присоединяться

к головным предприятиям на правах филиалов. Начинается жесткая борьба за финансовые потоки и заказы. Никаких разговоров о реструктуризации, оптимизации производства не происходит, и, в конечном счете, мы получили жесткую «войну» между генеральными директорами предприятий, которая фактически прекращена в районе 2011–2012 гг. Определённых людей заменили, но промышленность уже находилась в состоянии падения, которое продолжается по сегодняшний день.

До тех пор, пока мы не поймем, что главная проблема и главная задача, которые мы должны решить, это создание новой научно-производственной системы Госкорпорации «Роскосмос», выхода у отрасли нет. Можно заявлять и предлагать какие угодно проекты, но они не дадут результата. Необходимо нынешнюю стратегию поменять с тактикой: мы ушли от советской РКП, но к российской так и не пришли. Выбито самое главное ключевое звено, которое должно играть определяющую роль в любой отрасли, – звено центральных научно-исследовательских инсти-

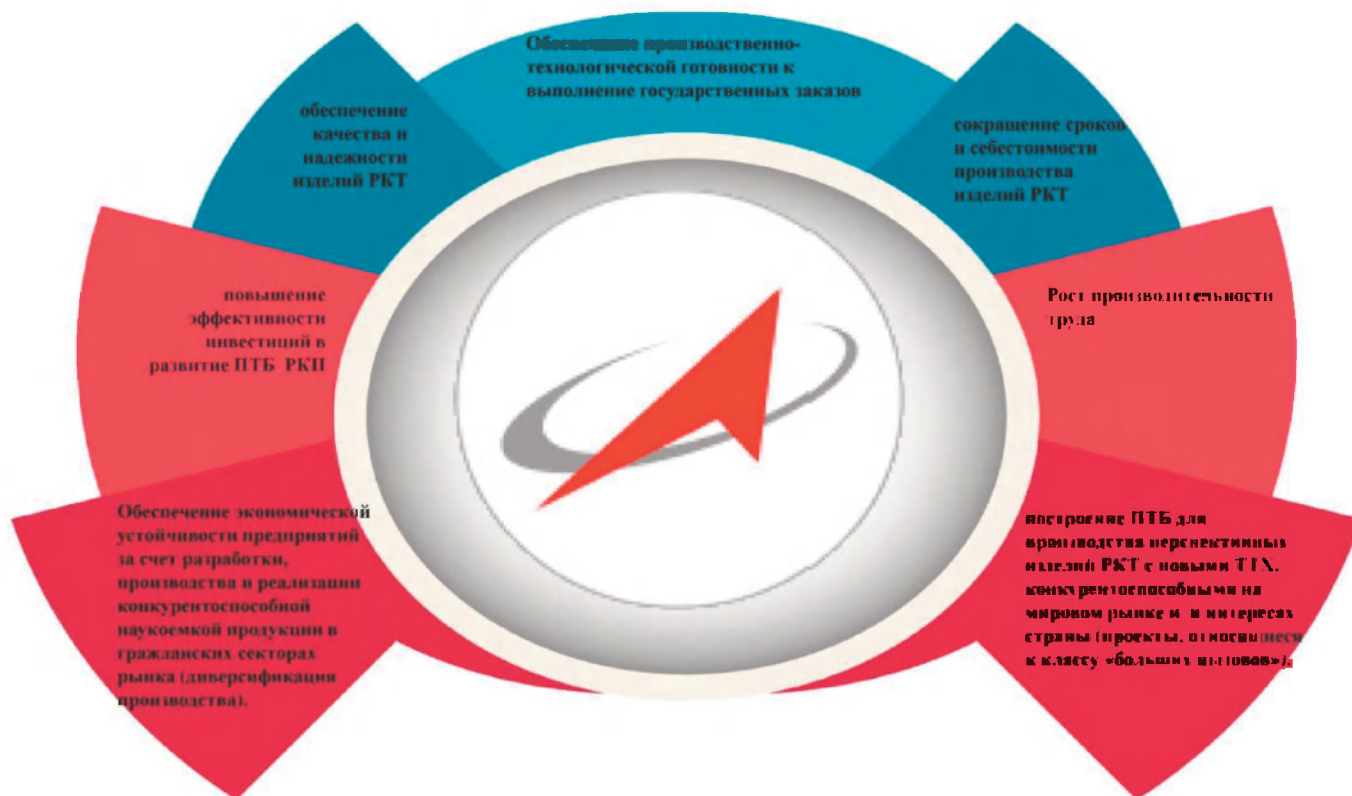


Рис. 2. Цели создания новой научно-производственной системы Госкорпорации «Роскосмос»

тутов – основных генераторов передового, целей и стратегий – того, куда мы должны двигаться и на что ориентироваться. Это звено сегодня, включая ФГУП «НПО «Техномаш», в определенной степени выбито – мы занимаемся текущими тактическими работами.

Задача создания новой научно-производственной системы Госкорпорации «Роскосмос» записана в Стратегии развития Госкорпорации «Роскосмос» до 2030 г. и утверждена Правительством Российской Федерации. Решение данной задачи должно возглавить ФГУП «НПО «Техномаш».

Цели создания новой научно-производственной системы Госкорпорации «Роскосмос» приведены на рис. 2.

На рис. 3 приведены показатели, которые должны быть достигнуты ракетно-космической отраслью в соответствии с утверждённой Стратегией развития Госкорпорации «Роскосмос» в 2020, 2025, 2030 гг.

На рис. 4 показано, что заданные Госкорпорацией «Роскосмос» параметры ни в одной из стратегий инновационного развития предприя-

тий отрасли не присутствуют, то есть предприятия себе такую задачу не ставят. Лишь записанный в планах развития НПК «СПП» показатель производительности труда соответствует Стратегии развития Госкорпорации «Роскосмос».

Технический уровень по видам производств по результатам технологического обследования, проведённого ФГУП «НПО «Техномаш», отражен на рис. 5 и 6. На диаграммах зеленой линией показан среднемировой технический уровень. Предприятия РКП выходят на этот уровень только по сборочному и электромонтажному производству. Практически по всем остальным производственным процессам мы находимся ниже среднемирового уровня.

Коэффициент загрузки оборудования при двусменной работе по предприятиям РКП показан на рис. 7. АО «ВНИИЭМ» находится на уровне примерно 67%, все остальные располагаются ниже. Так, на новейшем омском заводе «Полёт», построенном для выпуска РН «Ангара», количество единиц оборудования превышает количество работников.









№ п/п	Индикаторы	Значения показателей по годам				
		2016	2020	2025	2030	
					«Базовый»	«Целевой»
	Полнота решения задач государственной политики, решаемых задач, %	62,7	65,0	70,0	70,0	100,0
	Степень удовлетворения потребностей госструктур в результатах космической деятельности, %	45,0	60,0	70,0	75,0	100,0
	Доля инновационных товаров (работ, услуг) в общем объеме отгруженных товаров (работ, услуг) организациями Корпорации, %	0,6	2,0	5,0	20,0	15,0
	Сокращены производственные площади, %	-	10	20	25	20
	Сокращение парка металлорежущего оборудования (46000 ед. на 2016 г) , разы	1,0	1,3	1,6	1,9	1,9
	Доля оборудования возрастом менее 10 лет, %	19,9	28,0	40,0	56,0	56,0
	Производственная загрузка предприятий, %	55	60	65	80	70
	Увеличение объема выручки от непрофильной продукции в общем объеме выручки организациям Корпорации, %	10	15	20	25	25
	Сокращение сроков разработки РКТ, разы	1,0	1,3	1,6	2,0	2,0

Рис. 3. Целевые показатели действующей Стратегии развития Госкорпорации «Роскосмос»

№ п/п	(КПЭ) Показатели	Ед. изм.	Планируемые показатели "оптимизационный" сценарий			Показатели заводов к 2020 году согласно ПИР								
			2020 г.	2025 г.	2030 г.	АО "ИСС"	АО "НПО Энергомаш" (2019 год)	АО "ГРЦ Максеев"	АО "НПК "СПП"	ПАО "РКК "Энергия"	АО "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева"	АО "РКС"	АО "РКЦ "Прогресс"	АО "Корпорация "СПУ-ЦКБТМ"
1	Сокращение производственных площадей	%	10	20	20-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Сокращение парка металлорежущего оборудования	разы	1,3	1,6	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Сокращение сроков разработки РКТ	разы	1,3	1,6	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Доля оборудования возрастом менее 10 лет	%	28	40	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Доля внебюджетно составляемых в инвентидных	%	25	50	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Доля новых товаров, выпускаемых в рамках ОКР или находящихся в серии не более 3-х лет, в общем объеме отгруженных товаров организациями Корпорации	%	40	44	44	-	-	-	24,4%	-	-	-	-	-
7	Рост производительности труда	%	140	199	324	4%	к 2019г.	-	-	4,29% относительно 2011 г.	-	-	-	10,2%
8	Производительность труда	млн.руб/чел	3,23	4,61	7,48	-	-	-	4,07	-	2,7	-	1,746	-
9	Экспортная выручка*	млрд. руб.	72,9	125,0	169,9	47,612	15,54	-	-	5%	-	0,05%	-	-
10	Коммерческая выручка на внутреннем рынке*	млрд. руб.	27,6	58,7	72,1	2,6941	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Доля выручки на мировом доступном рынке	%	5,5	8,3	9,5	-	-	-	25,4%	-	-	-	-	-
12	Выручка Корпорации*	млрд. руб.	645	760	973	-	-	-	-	-	-	-	61,489	-
13	Рентабельность по чистой прибыли	%	6,3	6,6	6,8	-	-	-	1,76%	-	-	-	-	-
14	Численность работников РКП*	тыс. чел	200	165	130	13,817	-	-	1,76	-	-	-	19,8	-

	- данные показатели отсутствуют в ПИР предприятий
	- значение в целом по интегрированным структурам (без каскадирования КПЭ до интегрированных структур)
	- несоответствие показателю стратегии
	- несоответствие размерности показателю стратегии
	- соответствие показателю стратегии

Рис. 4. Анализ соответствия показателей программ инновационного развития Стратегии развития Госкорпорации «Роскосмос»

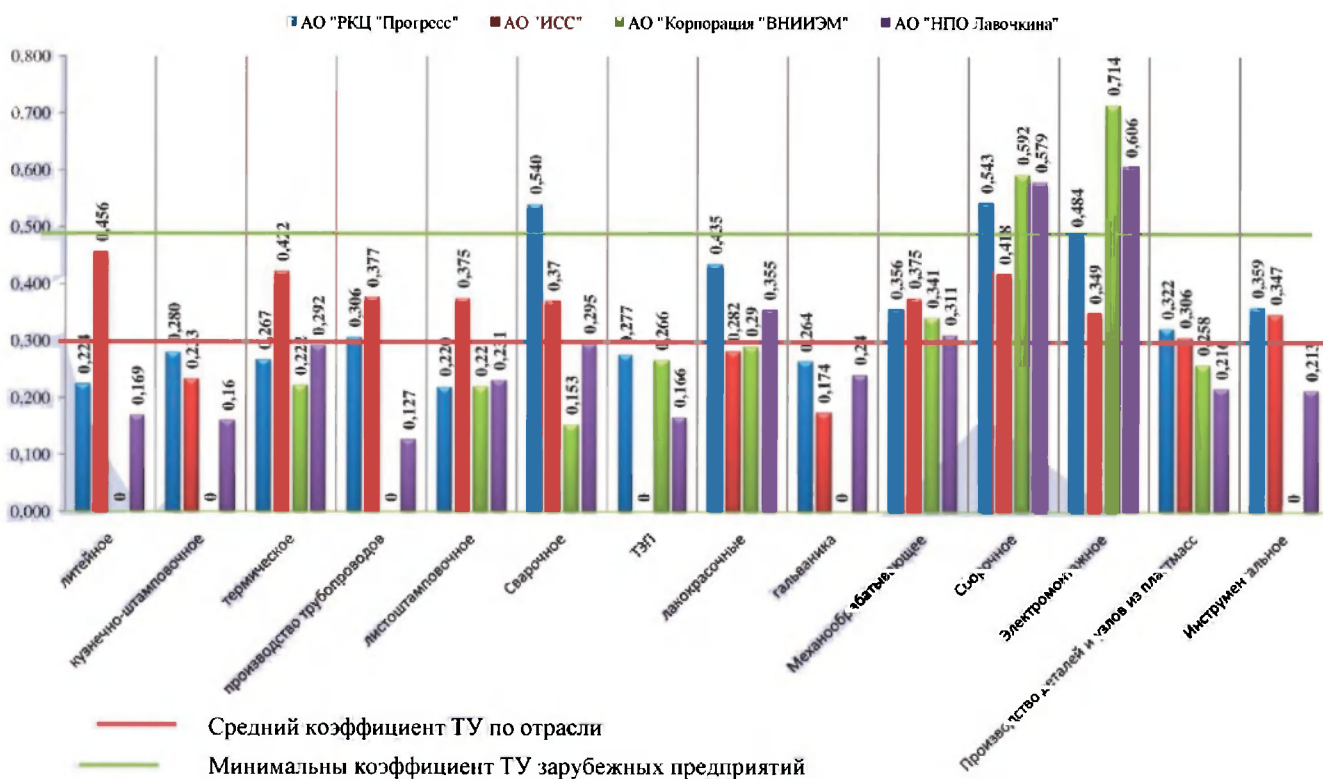


Рис. 5. Технический уровень по видам производств (технологическое обследование предприятий РКП в 2017–2018 гг.)

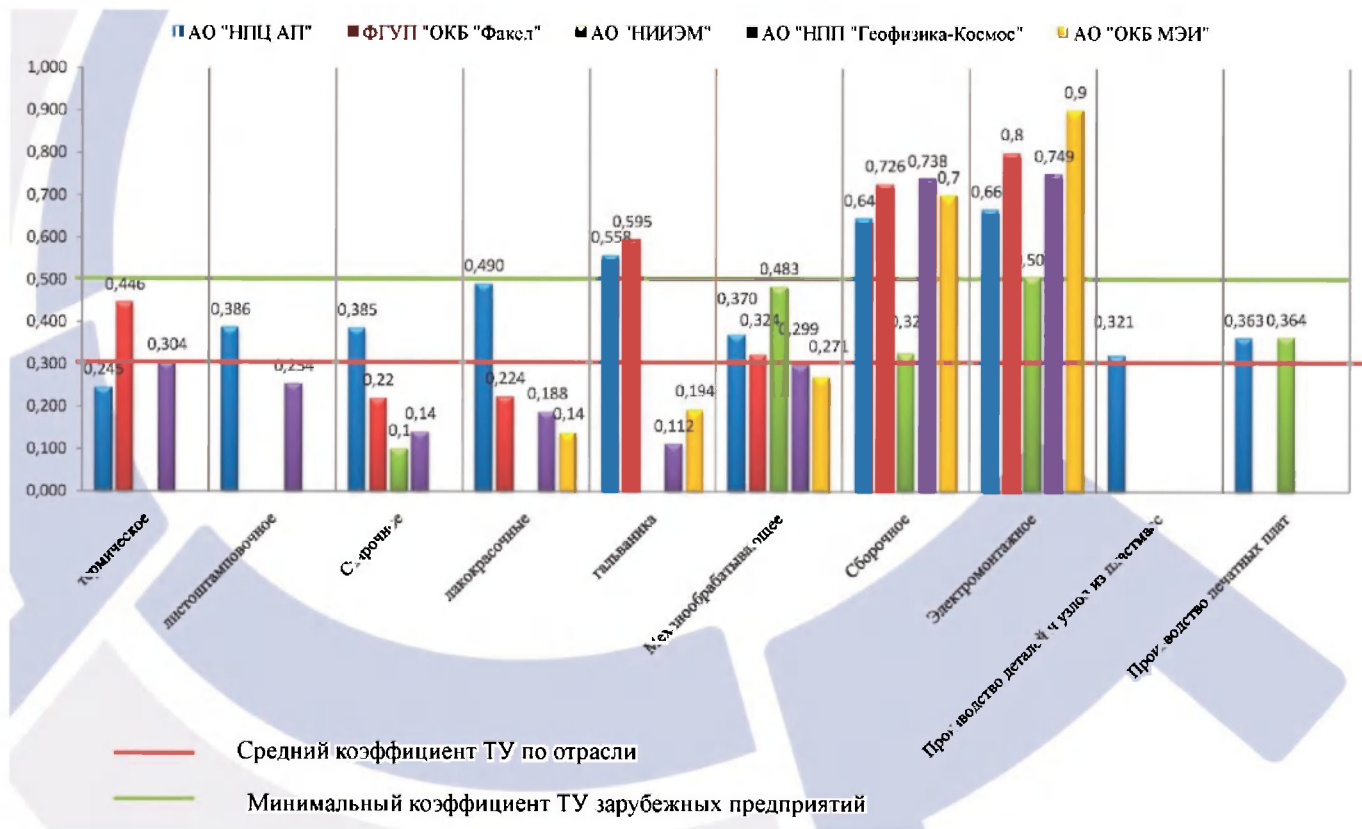


Рис. 6. Технический уровень по видам производств (технологическое обследование предприятий РКП в 2017–2018 гг.)

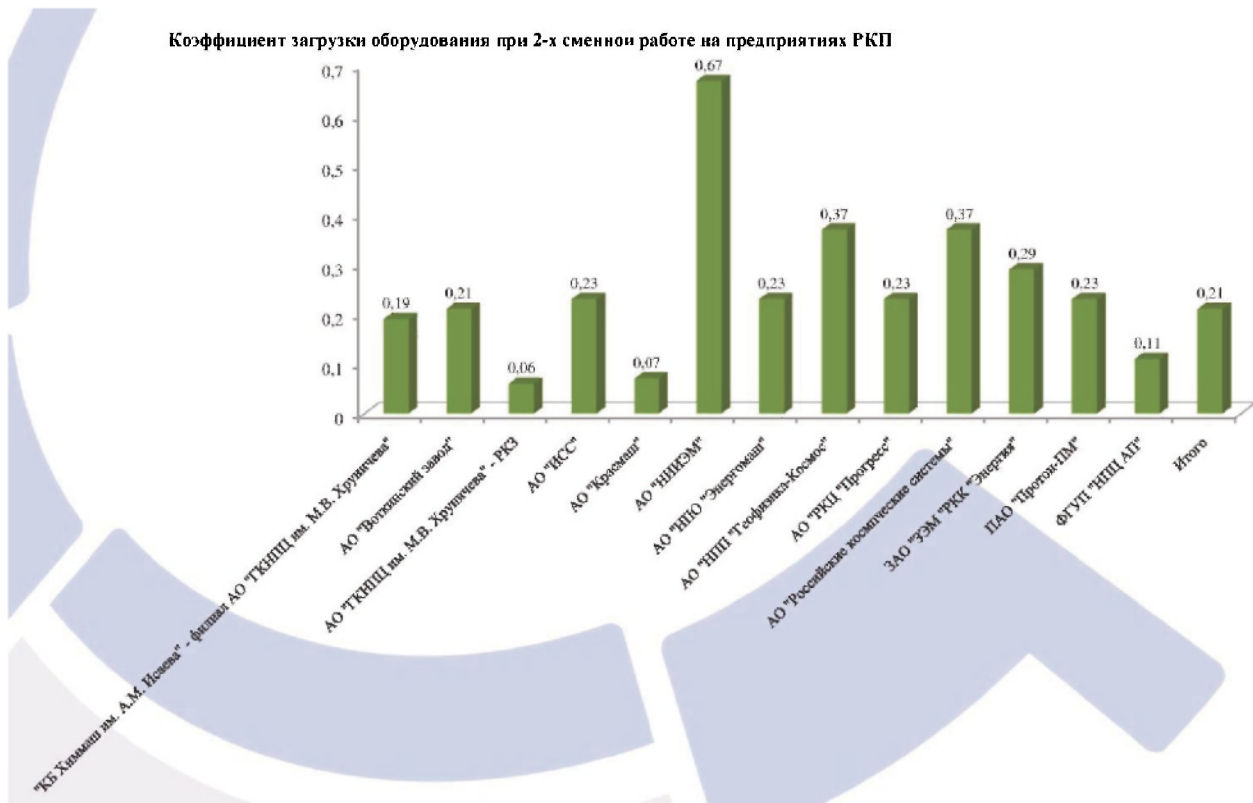


Рис. 7. Распределение загрузки оборудования по предприятиям РКП

Предприятия отрасли используют различное оборудование, принадлежащее разным поколениям, но и при таких условиях нет требуемого показателя загрузки.

Уровни внедрения цифровых технологий представлены на рис.8.

Присутствует полная разноречивость, на разных предприятиях – абсолютно разные программные комплексы. Если их наложить на неоднородный

состав технологического оборудования разных поколений, которое стоит на наших предприятиях и работает с разными программными продуктами, возникает вопрос: о какой Индустрии 4.0 мы сейчас можем говорить? Такое оборудование невозможно завязать в одну информационно-управляющую систему, так как оно работает на принципиально разном программном обеспечении.

### Системные проблемы

В отрасли отсутствует единая техническая политика, налицо тенденция снижения уровня производственной системы и по конструкции, и по технологии, и по производству, и, как следствие, снижение научно-технического уровня, уровня качества и надёжности, рост трудоёмкости, себестоимости изделий РКТ и т.д. Так, РН «Союз-5», которая должна выйти на рынок как коммерческая ракета, так как РН «Ангара» получилась очень дорогой по своей себестоимости, выходит еще дороже, чем РН «Ангара», и это всё определяется нашими возможностями.

Основные направления реорганизации производственных систем приведены на рис. 10.

Наша задача – в конце 2019 г. или в 2020 г. выйти на разработку системного проекта по научно-производственной системе Госкорпорации «Роскосмос», результатом реализации которого должен стать тот облик отрасли, к которому мы дальше пойдем в течение некоего программного периода, который будет определяться ресурсами, которые сможем получить от государства. ФГУП «НПО «Техномаш» придется много потрудиться над данным системным проектом. Необходимо выбрать два ключевых направления:

Предприятие	CAD-системы (разработка БД)	CAM-системы (Разработка УП)	САПР ТП	АСУ цеха, ОКП	Мониторинг работы оборудования	Электронная паспортная ДСЕ	Диагностика в ремонт оборудования	ERP/PLM/PDM
ПАО "Протон-ПМ"	NX, Компас	NX	Teamcenter	SAP	NAVIMAN	SAP	SAP	SAP R/3/Teamcenter
АО "Корпорация "ВНИИЭМ"	Компас, ZWCAD, Solidworks	SpriteCAM	СПРУТ-ТП	СПРУТ-ОКП		Ручной ввод в БД		Solidworks PDM, Логман PLM
АО "РКЦ "Прогресс"	Creo Parametric, Компас	CGTech Vericut, PTC «Creo Parametric»	АСКОН "Вертикаль"	АСУ Материально-технического снабжения (МТС), АСУ Оперативного планирования (ОП), АСУ Технологической подготовки производства (ТПП)	АИС "Диспетчер"	Windchill PDMLink	АСУ Ремонт	АСУ ресурсами предприятия/Windchill PDMLink
АО "ИСС"	CATIA	CATIA EdgeCAM	Техкол Про. Вертикаль, САПР ТП собственной разработки	АСУ собственной разработки	Внедряется на отдельные единицы станков с ЧПУ	Внедряется в отдельных случаях (штрих-кодирование)		Корпоративная система управления. Разработка КА ведется в электронном виде. Внедрен электронный документооборот
ФГУП "ОКБ "Фазас"	Компас, Creo	Creo	САПР ТП Вертикаль	АСКП/MS Project		Ручной ввод в БД		1С ERP/Логман
ПАО "РКЦ "Энергия" (ЗЭМ)	Creo	ADEM, CRGO	ADEM, WindChill	1С				1С/WindChill/WindChill
АО "НПО "Энергомаш"	Siemens NX CAD	Siemens NX CAM	Siemens Teamcenter Manufacturing	Галактика АММ	Naviman			Siemens Teamcenter, Галактика ERP
ФГУП "НПЦАП"	Siemens NX CAD	Siemens NX CAM	ADEM					Siemens Teamcenter
АО "ТКНПЦ имени М.В.Хруничева" (РКЗ)	Компас			АСУ (месяцесовое планирование)		ПМ "Электронный технологический паспорт"		

	- внедрено
	- в процессе внедрения
	- планируемое к внедрению
	- отсутствует

Рис. 8. Уровень внедрения информационных технологий (цифрового производства) предприятий РКП

– развитие научно-технического и производственного потенциала научно-производственной системы;

– институциональные преобразования в целях оптимизации всех производственных систем.

Во главе целевой структуры новой производственной системы (рис. 11) должны стоять научно-производственные центры, отраслевые институты, которые должны специализироваться по конструкторско-технологическим заделам, технологиям, испытаниям, паспортизации и т.д. Далее следует уровень сборочных предприятий и т.д. Это позволит прийти к производственной системе, которая обеспечит сокращение сроков и трудоёмкости, снижение себестоимости продукции, позволит выйти на новый технологический уровень. Работу предлагается провести в два этапа (рис. 12).

В 2020 г. планируется сделать системный проект (рис. 13). Это важный срок, так как в 2020 г. будет формирование новой программы на 2021–2030 гг. По тем планам, которые существуют, предполагается объединить все программы ракетно-космической отрасли в одну программу развития РКП. После защиты системного проекта, через пилотные проекты, выйти на технологии, которые будут распространяться на всю отрасль. И во всем этом мы видим, безусловно, главную роль ФГУП «НПО «Техномаш» с точки зрения эффективной реализации инженеринговой, технологической, промышленной стратегии развития РКП. ФГУП «НПО «Техномаш» выступает здесь как головная научно-исследовательская организация, на которую возлагаются задачи, представленные на рис. 14.

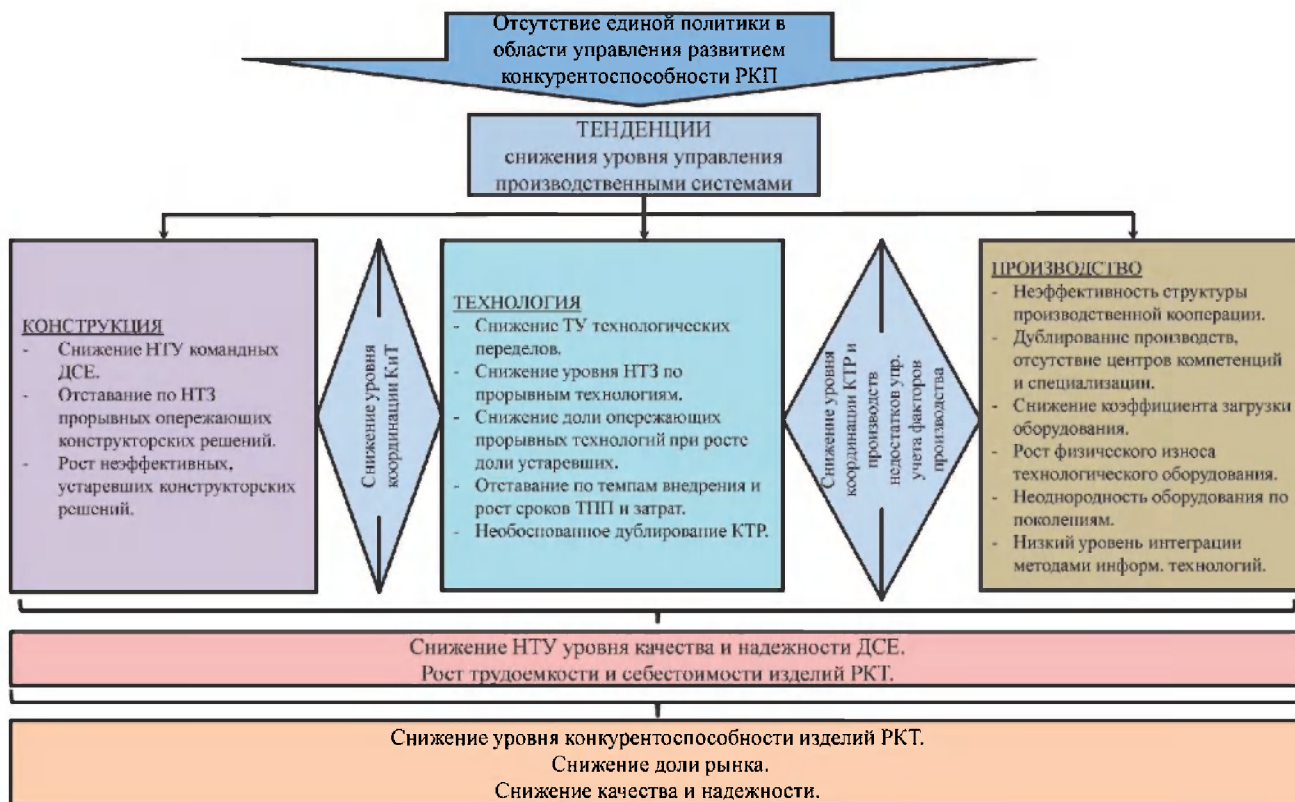


Рис. 9. Текущее состояние РКП

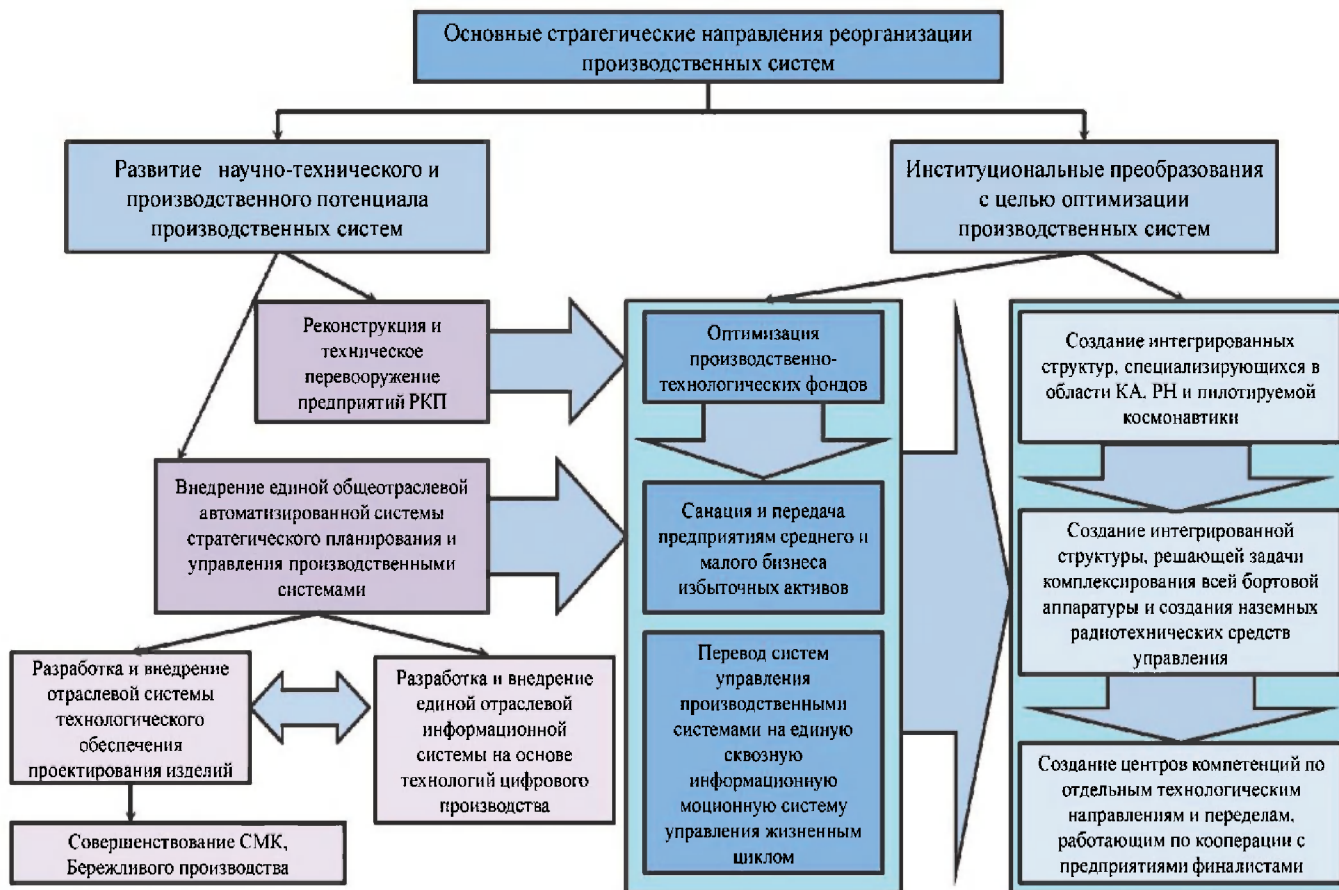


Рис. 10. Основные стратегические направления реорганизации производственных систем

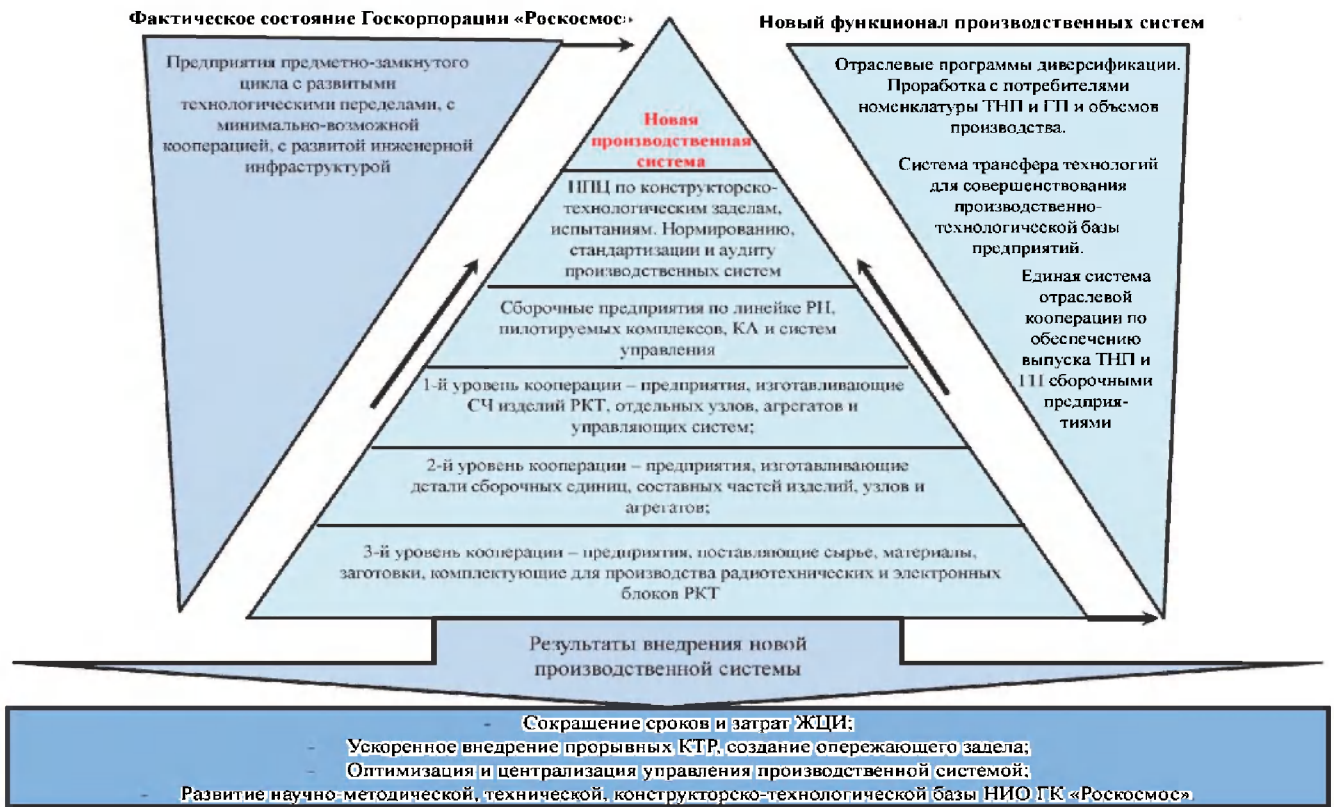


Рис. 11. Целевая структура новой производственной системы

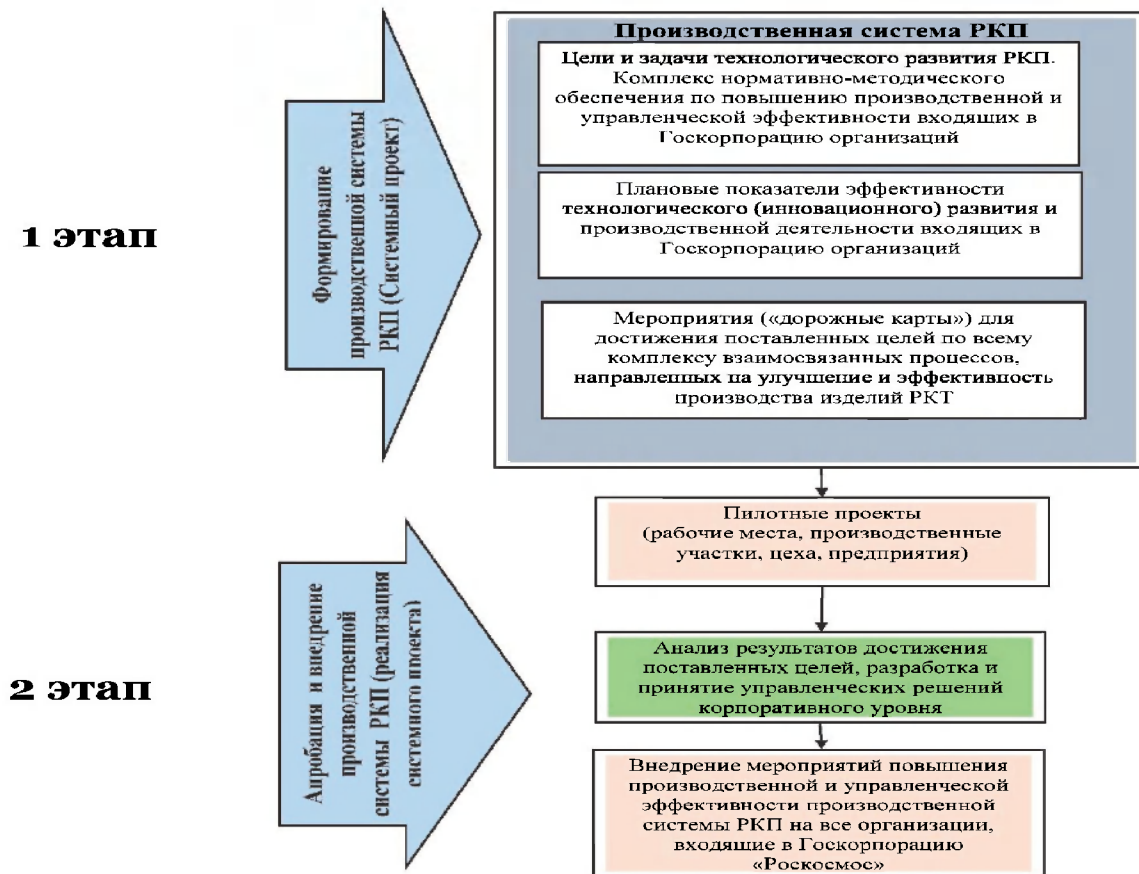


Рис. 12. Этапы реорганизации производственной системы РКП



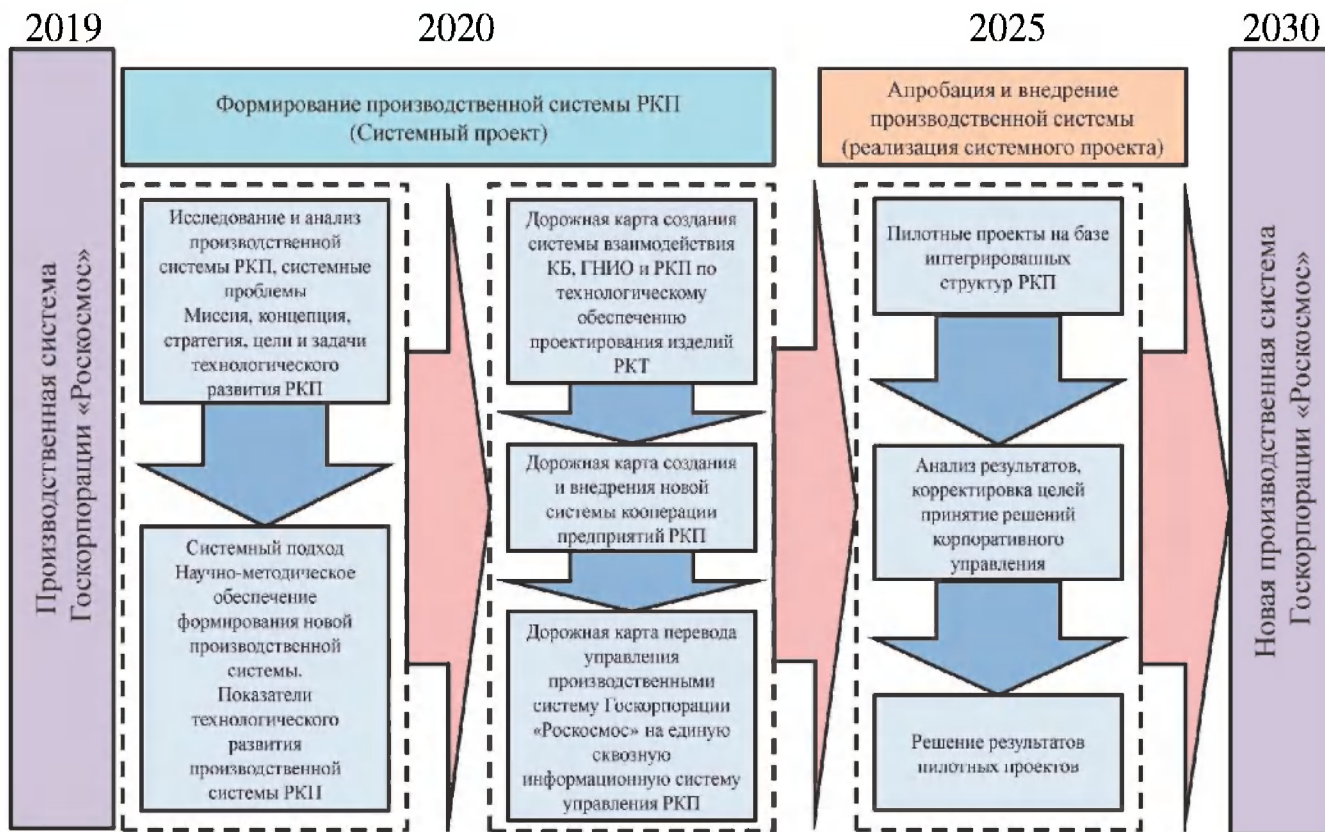


Рис. 13. Создание производственной системы

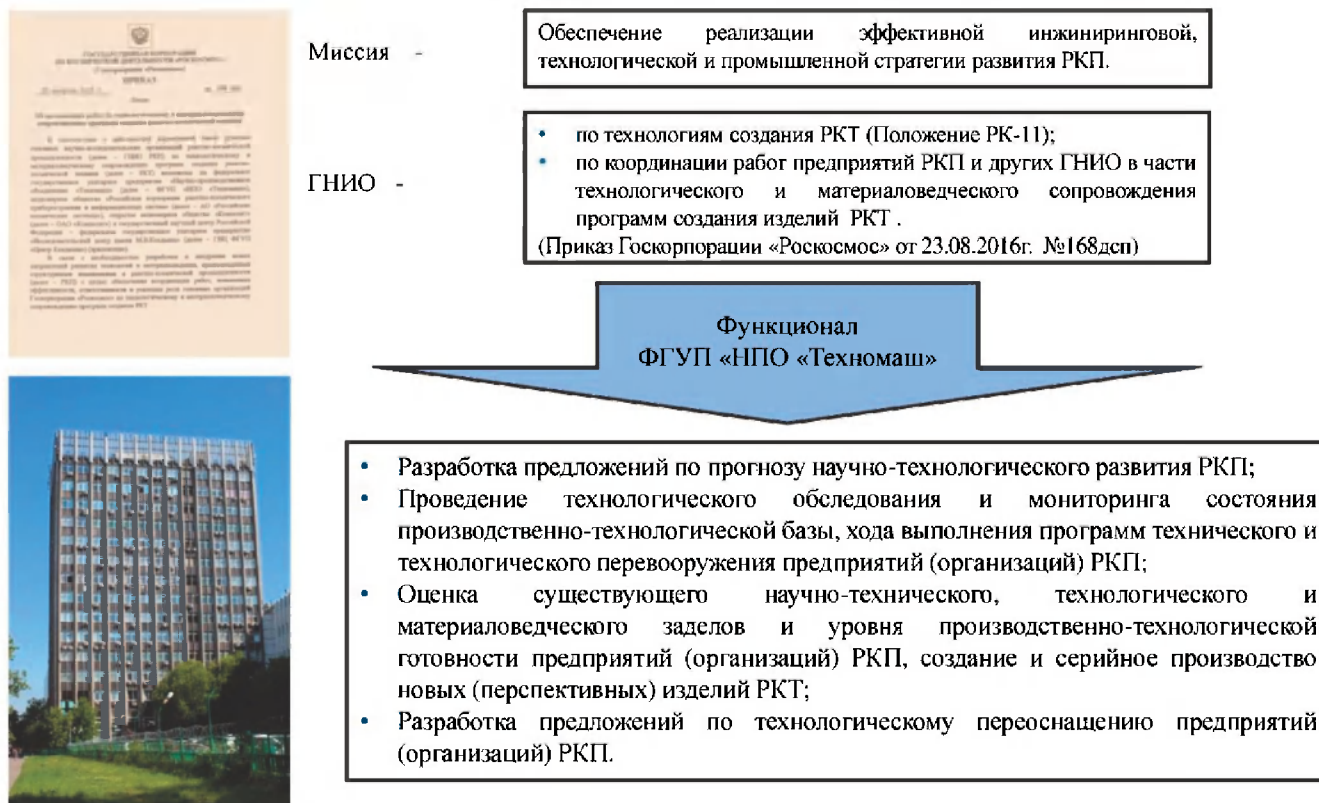


Рис. 14. Главная роль ФГУП «НПО «Техномаш» в обеспечении реализации стратегии реорганизации производственной системы Госкорпорации «Роскосмос»

УДК 629.78

Бараев А.В.

(ФГУП «НПО «Техномаш»)

## Ключевые направления развития технологий производства изделий ракетно-космической техники

На примере производства компонентов ракет-носителей показаны технологические мероприятия, которые реализуются в ракетно-космической промышленности в целях создания новой производственной системы Госкорпорации «Роскосмос». В качестве перспективных направлений рассмотрено использование композиционных материалов, внедрение аддитивных технологий, переход на цифровое производство.

**Ключевые слова:** ракетно-космическая промышленность, ракета-носитель, разгонный блок, ракетный двигатель, камера сгорания, промышленная технология, технологическое оборудование, аддитивные технологии, композиционные материалы, цифровое производство, конструктивно-технологическое решение, технологическая компетенция, автоматизированная система контроля производства, мониторинг технологической стабильности.

По аналогии со стадиями создания изделий ракетно-космической техники (РКТ) мы используем понятия промышленных технологий – существующих, перспективных и прорывных (рис. 1).

Что даёт эта трактовка? Это, по сути, три составляющие, которые показывают, как эти технологии создаются (рис. 2). Первое – это, в основном, инвестиционные проекты, второе и третье – опытно-конструкторские работы (ОКР)



**Применение «существующих» технологий**, основанных на принципах совершенствования конструкции технологического оборудования, внедрение которых не требует изменения конструкции изделий – для производства серийных изделий (РН семейства «Союз-2», «Ангара-5 (1.2)», РБ «Фрегат»)



**Внедрение «перспективных» технологий**, в основном требующих адаптации применительно к конкретной конструкции изделия – внедряется на стадии модернизации и создания изделий (Ангара-5П (В), РН «СК ПГ», «СТК», РБ «ДМ», КВТК)



**Создание «прорывных» технологий**, требующих проведения научных исследований подтверждающих возможность получения необходимых технических характеристик – разрабатываются как научно-технический задел для перспективных изделий

Рис.1. Основные стадии развития промышленных технологий – стадии создания изделий РКТ

	Сроки создания/ эксплуатации	Источник финансирования	Задачи мероприятий	Результат работ
существующие	Внедрение до 3 лет Применение - до 15 лет	Проекты реконструкции и технического перевооружения Мероприятия технического перевооружения	Обеспечение технологической стабильности производства и/или необходимой мощности	Обеспечение технологической стабильности производства и/или необходимой мощности
перспективные	Внедрение 3÷5 лет Применение – до 30 лет	ОКР по созданию технологии СЧ ОКР по созданию изделий	Обеспечение готовности опытного производства	Прошедшие квалификационные испытания стендовые изделия
прорывные	Создание 5÷7 лет	НИОКР по созданию технологий СЧ НИР по созданию изделий	Экспериментальное подтверждение достигаемого эффекта от внедрения технологии на макетах	Прошедшие квалификационные испытания макетов элементов конструкции изделия

Рис. 2. Описание видов технологий

по созданию этих технологий. Это является совокупностью тех мероприятий, которые позволяют создавать и развивать облик новой ракетно-космической промышленности (РКП).

Сегодня в рамках инвестиционных проектов развивается всё производство. Однако низкая средняя загрузка оборудования (40 % по отрасли) говорит о неэффективном использовании производственных мощностей, которые продолжаем развивать, оставляя те же параметры на месте. Необходимо перейти к пониманию центров компетенции, к пониманию правильной загрузки и к пониманию правильной кооперации. Например, производство камер сгорания в будущем целесообразно базировать на единой производственной площадке ВМЗ и КБХА (рис. 3).

Три основных направления создания перспективных и прорывных технологий:

**1. Развитие технологий изготовления конструкций из композиционных материалов** – создание производства ракетного блока с максимальным использованием в конструкции композиционных материалов (КМ).

**2. Развитие области применения аддитивных технологий** – создание производства жидкостных ракетных двигателей без использования ряда технологических переделов (литье, штамповка, механическая обработка, электроэрозионная обработка, пайка).

**3. Развитие автоматизированных систем обеспечения производства (цифровое производство)** – реализация комплекса мероприятий по созданию «цифрового производства».

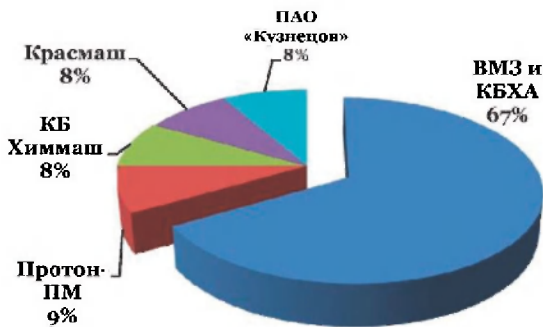
Основные направления внедрения конструкций из КМ:

- изготовление корпусов баков средств выведения;
- изготовление трубопроводов;
- изготовление силовых элементов конструкции методом плетения;
- получение (совершенствование) новых КМ и связующих;
- сопутствующие технологии – обеспечение герметизации и защиты от влияния компонентов топлива корпусов на материал конструкции, неразрушающий контроль элементов и КМ, получение неразъемных герметичных соединений разнородных материалов (металл + КМ), обеспечение чистоты внутренних полостей корпусов топливных баков, нанесение многофункциональных покрытий.

Если посмотреть на их состав, то будет понятно, что в итоге мы приходим к ключевой задаче в качестве ракеты-носителя – созданию по сути композитного бака целиком (рис. 4).

Что это нам дает? Для чего мы это делаем? Если рассмотреть существующее сегодня производство баков (рис. 5), можно увидеть огром-

1. Создание центров компетенций с целью повышения экономической эффективности производства и концентрации ресурсов для его развития.



### Например:

ВМЗ и КБХА производят 67% камер сгорания ЖРД, целесообразно там создание соответствующего центра компетенций

2. Обеспечение технологической стабильности производства посредством внедрения оборудования с автоматизированными системами контроля и регулирования технологических параметров.

Рис. 3. Ключевые направления внедрения «существующих» технологий



Рис. 4. Производство композитного топливного бака

ное количество применяемых технологических переделов, рождающее большое количество необходимых компетенций в области разных технологий, производственного персонала и содержания соответствующей инфраструктуры.

Что будет, если перейти к новому виду конструктивно-технологического решения? Это,

по сути, совершенно принципиальное новое производство, которое состоит из минимального количества технологических компетенций, связанных с одной технологией (рис. 6). Соответственно, во много раз уменьшается инфраструктура и, как следствие, сокращаются расходы на её содержание.



**Не отражены участки обеспечивающие:**

- изготовление поковок;
- механическая обработка фланцев, ...
- участок изготовления трубопроводов
- гальванический участок

**Трудоемкость производства –**  
14,9 тыс. н. час ÷  
36,7 тыс. н. час

**Характеристика производства:**

- кол-во технологий – 17
- кол-во типов оборудования – 32
- необходимая производственная площадь – 12 000 м<sup>2</sup>
- численность ОПП – 50 чел.

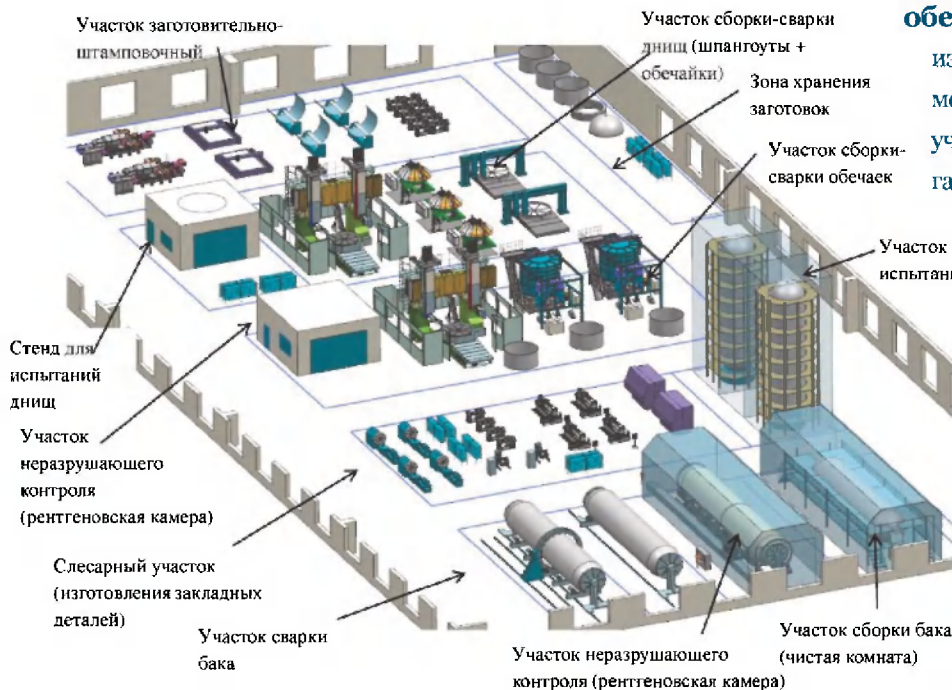
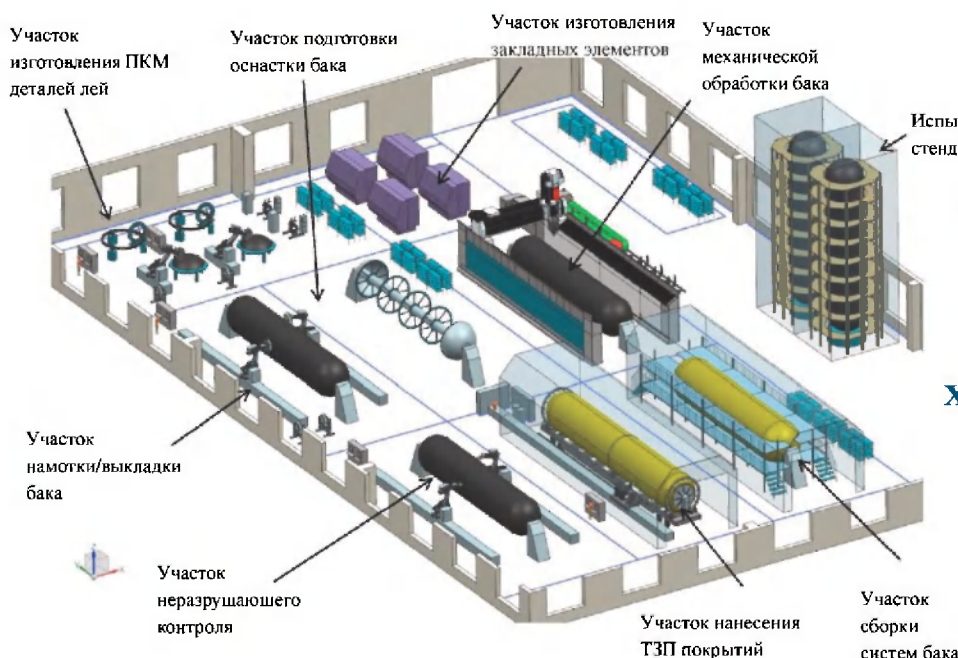


Рис. 5. Существующая технология изготовления корпусов баков РН и РБ



**Трудоемкость производства –**  
6,7 тыс. н. час ÷  
16,5 тыс. н. час

**Хар-ка производства:**

- кол-во технологий – 8
- кол-во типов оборудования – 12
- необходимая производственная площадь – 8 000 м<sup>2</sup>
- численность ОПП – 25 чел.

Рис. 6. Перспективная технология изготовления корпусов баков РН и РБ

Таким образом, топливный бак как ключевой элемент ракеты-носителя со всеми входящими системами становится дешевле. Приблизительная оценка экономического эффекта представлена на рис. 7.

При внедрении аддитивных технологий (АТ) используется тот же подход. Если сегодня выполняется один узел по одной технологии, а раньше использовали для этого от трех до семи техно-

	Существующее	Композитное	
<b>Технические характеристики изделия</b>			
Масса корпуса бака, кг	1 800	1 150	< на 35%
<b>Характеристика производства</b>			
Кол-во технологий, ед.	17	8	< в 2,1 раза
Кол-во типов оборудования, шт.	32	12	< в 2,6 раза
Необходимая площадь, кв. м	12 000	8 000	< в 1,5 раза
Численность ОПП, чел	50	25	< в 2 раза
Трудоемкость изготовления, тыс. н. час	14,9-36,7	6,7 – 16,5	< на 55 %
<b>Стоимость содержания производства, млн. руб./в год</b>	181,4	90,7	< на 50%

Рис. 7. Эффект от внедрения конструкций из КМ

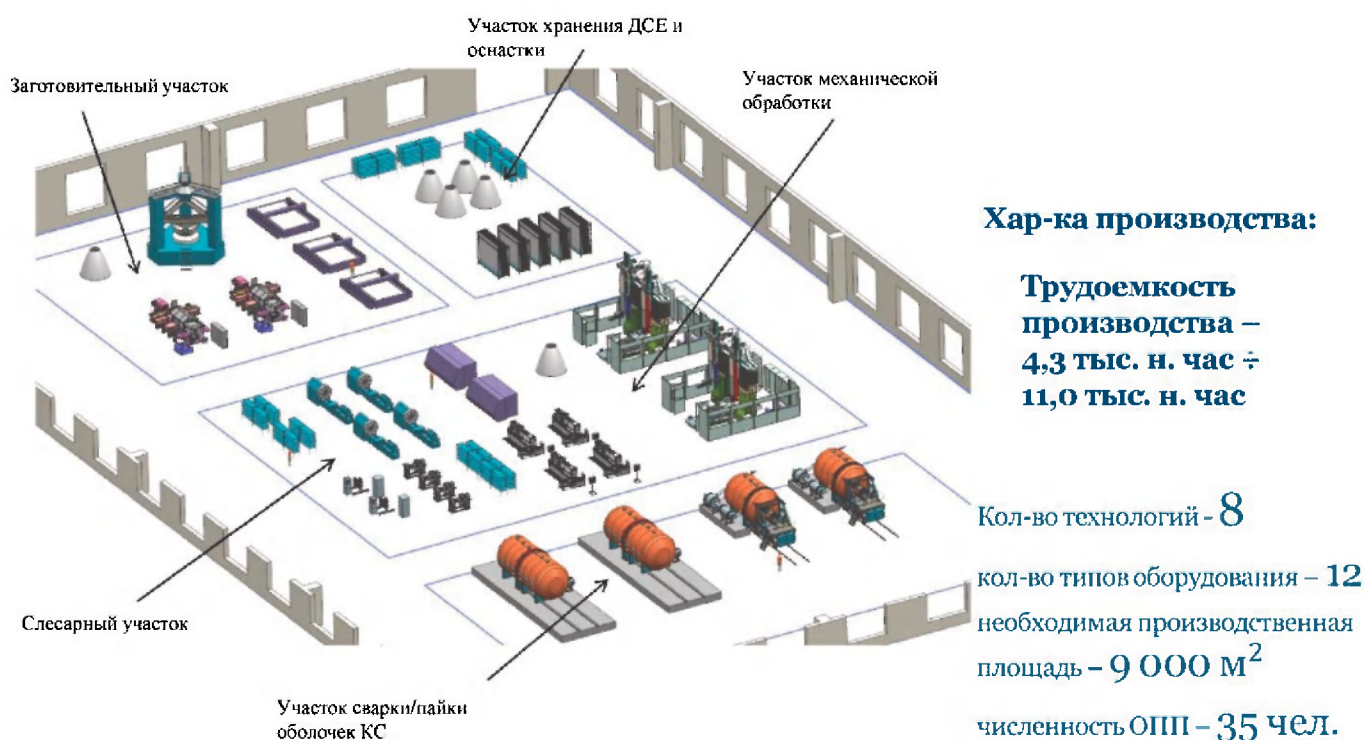


Рис. 8. Существующая технология изготовления камеры сгорания

логий, то соответственно исчезает целый ряд технологического оборудования, занимающего определенное количество квадратных метров производственной площади. Первый пилотный

проект приведен в части двигателестроения, потому что здесь сделан значительный шаг.

Основные направления внедрения конструкций из КМ:

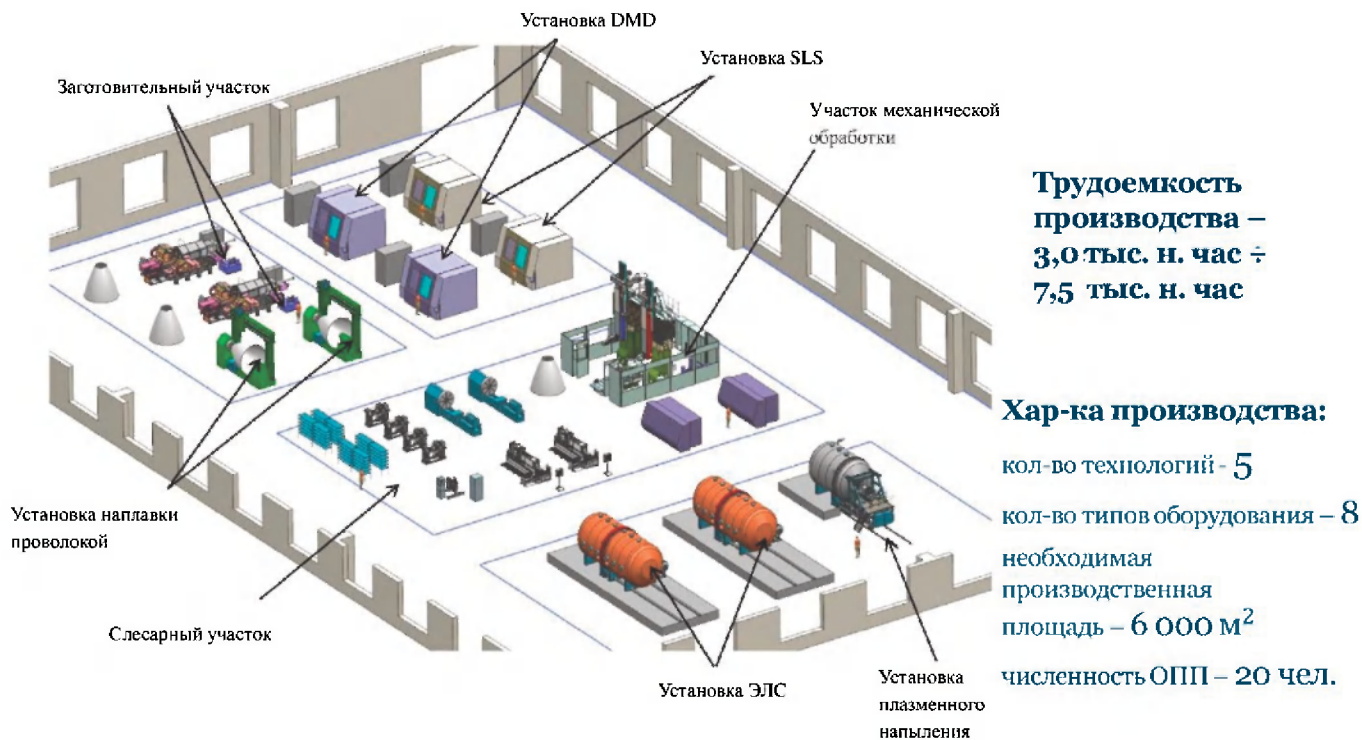


Рис. 9. Перспективная технология изготовления камеры сгорания

– изготовление корпусов узлов системы подачи, форсуночной головки, камеры жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРД МТ) по технологии селективного лазерного спекания (СЛС) из жаропрочных сталей;

– изготовление деталей полый конструкции с наружными элементами, расположенными в разных осях по технологии прямого лазерного выращивания;

– изготовление заготовок тел вращения больших габаритов методом наплавки (дуговой, электронно-лучевой) проволоки;

– изготовление биметаллических узлов (жаропрочная бронза+сталь) узлов камер сгорания;

– изготовление камер сгорания ЖРД МТ из керамических материалов методом плазменного напыления;

– сопутствующие технологии – технологии постобработки деталей, полученных методами АТ; получение неразъемных соединений деталей, полученных АТ, очистка внутренних полостей каналов деталей.

Сегодня, в рамках текущих технологических ОКР совместно с КБХА и КБ Химмаш мы можем добиться квалификации значительного количества номенклатур. В основном, это кос-

нется систем подачи топлива – порядка 20 номенклатур для двигателя 14Д23 (РД0124), примерно столько же номенклатур для производства двигателей КБ Химмаш.

Первый шаг сделан, надо двигаться дальше. Если предположить, к какому эффекту приведет создание нового производственного процесса изготовления камер сгорания, то картина абсолютно одинакова – точно такой же подход. На рис. 8 показано старое производство, на рис. 9 – новое производство.

Подсчитан приблизительный эффект: на 50% снижается себестоимость содержания производства. Обеспечив полную загрузку, получим 50% снижение стоимости самого двигателя (рис. 10).

Следующий элемент – автоматизированная система контроля производства. Основные направления:

– **система мониторинга технологической стабильности** – информационно-аналитическая система сбора данных фактических технологических параметров, мониторинга соответствия промышленных помещений классам промышленной чистоты, выходных и контрольных параметров изделий;

	Существующее	Аддитивное	
<b>Характеристика производства</b>			
Кол-во технологий, ед.	8	5	<b>&lt; в 1,6 раз</b>
Кол-во типов оборудования, шт.	12	8	<b>&lt; в 1,5 раза</b>
Необходимая площадь, кв. м	9 000	6 000	<b>&lt; в 1,5 раза</b>
Численность ОПП, чел	35	20	<b>&lt; в 1,7 раз</b>
Трудоемкость изготовления, тыс. н. час	4,3 – 11,0	3,0 – 7,5	<b>&lt; на 30%</b>
<b>Стоимость содержания производства, млн. руб./в год</b>	127,0	72,6	<b>&lt; на 40%</b>

Рис. 10. Эффект от внедрения получения конструкций методами аддитивных технологий

### Текущее состояние автоматизации производственных процессов

Автоматизированная регистрация выходных параметров изделия (сборочных единиц) – **73,3%**

Автоматизированная регистрация режимов технологических процессов – **34,1%**

Автоматизированная регистрация контролируемых параметров при проведении пневмо-гидроиспытаний – **29,4**

Использование автоматизированных средств контроля чистоты рабочих и контрольных сред – **47,2 %**

Провести мероприятия по 100% автоматизации производственных процессов



### Создание информационно-аналитической системы мониторинга распределение контролируемых параметров производственных процессов

Рис. 11. Система мониторинга технологической стабильности

– **система организации и контроля производственных процессов** – системы визуализации технологических процессов, мониторинг состояния выполнения заказов с использованием сканирования кодов и меток на разных стадиях.

Ключевая задача – создание цифровой информационно-аналитической системы управления производственным процессом.

Современное технологическое оборудование имеет огромный потенциал сбора и передачи информации. Термин «обеспечение технологической стабильности» подразумевает обеспечение стабильных параметров технологического процесса. Сегодня контролируем так: где-то есть системы с распечаткой и цифровой передачей информации, где-то стрелка прибора, человек и за-





Рис. 12. Система организации, контроля и управления производством

пись в журнале. Если мы создаем новое оборудование, изначально имеющее возможность цифрового выхода и передачи информации – мы можем его аккумулировать и, таким образом, отслеживать стабильность, динамику процесса и предугадывать возможное поведение технологического оборудования, что значительно повысит управляемость процесса, контроль и качество продукции (рис. 11).

Ракетно-космическая отрасль сделала большой шаг в данную сторону: автоматизированная регистрация выходных параметров по состоянию на 2018 год охватила более 73 % критических параметров, которые контролируются

в отрасли. База для развития системы мониторинга, по сути, создана.

Как мы сегодня отслеживаем ход движения производства? Это – журналы, выдача через накладные. Это – система огромной бухгалтерии, в которой занято достаточно большое количество людей. Переведа все на современные информационные технологии, которые существуют в отраслях народного хозяйства, сможем более качественно осуществлять планирование производственного процесса, тем самым сократив лишние цифры и время на загрузку и перезагрузку данных. Это один из элементов цифровой системы управления производством (рис. 12).

◆ **ДЛЯ ЗАМЕТОК**

---



---



---



---



---



---



---

## ♦ НАНОТЕХНОЛОГИИ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК629.78:620.9

*Агуреев Л.Е.<sup>1</sup>, Конюкова К.С.<sup>1</sup>, Иванов А.В.<sup>1</sup>, Бармин А.А.<sup>1</sup>,  
Ризаханов Р.Н.<sup>1</sup>, Кузин А.И.<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», <sup>2</sup>ФГУП «НПО «Техномаш» )

### **Разработка технологий создания лёгких наноструктурных материалов и получение высокочистых наноразмерных порошков алюмомагниевого шпинели для изготовления конструкций и аппаратуры космического назначения**

Разработана технология создания алюмокомиозитов на основе системы Al-Ni-Cu с вводом бора и модифицированием малыми добавками наночастиц оксида алюминия. Разработан метод получения высокочистых наноразмерных порошков алюмомагниевого шпинели, заключающийся в совместном осаждении гидроксидов Al и Mg из водного раствора солей, из которых синтезируется слабо агломерированный нанопорошок алюмомагниевого шпинели. Из синтезированных порошков получены керамические образцы, содержащие 100 %, 50 % и 0 % нанопорошков. Керамические образцы, состоящие только из нанопорошков алюмомагниевого шпинели, демонстрируют лучшие показатели, обладая пропусканием в видимом и ближнем инфракрасном излучении, более высокой прочностью и низкой пористостью.

**Ключевые слова:** упрочненные алюмокомпозиты, наноразмерные порошки, вакуумное спекание, метод соосаждения, прозрачная керамика, алюмомагниевого шпинель.

Разработка новых алюминиевых материалов, обладающих низкой массой, высокой жаропрочностью при умеренных температурах и высокой коррозионной стойкостью, является одной из важнейших задач современной металлургии и ракетно-космической промышленности [1–3]. Для обеспечения высокого уровня функциональных свойств, помимо легирующих компонентов, в алюминий вводят дисперсные добавки наноразмерного масштаба [4–6].

В рамках проведённой работы получены материалы на основе алюминия Al-3Ni-1Cu-0,5B-Nafen<sup>TM</sup> методом вакуумного спекания. Для упрочнения матрицы использовали нановолокна оксида алюминия типа Nafen<sup>TM</sup>[7].

Получение прозрачной керамики, характеризующейся широким диапазоном пропускания, очень актуально. Среди материалов-основ прозрачной керамики выделяется алюмомагниевого шпинель (АМШ, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), пропускающая от инфракрасного излучения (ИК) до ультрафиоле-

тового (УФ), имеющая высокую температуру плавления, твердость, химическую стойкость и прочность, сохраняющиеся при высоких температурах.

Высокая чувствительность свойств прозрачной керамики к свойствам порошкообразных прекурсоров делает важной стадией ее получения синтез слабоагломерированных нанопорошков АМШ с высокой степенью химической и фазовой чистоты [8]. В этих целях актуально использование низкотемпературных химических методов синтеза нанопорошков, а именно метод соосаждения [9, 10]. Особенностью нанопорошков является их склонность к агломерированию. Наличие агломератов препятствует получению керамики заданной структуры [11].

Таким образом, при создании порошка АМШ для получения прозрачной керамики актуально применение модифицированного метода соосаждения, позволяющего получать неагломерированные порошки АМШ.

## 1. Разработка жаропрочного алюминиевого композиционного материала

При применении в ракетно-космической технике перспективными, с точки зрения жаропрочности, износостойкости и коррозионной стойкости, являются системы сплавов на основе системы Al-Ni-Cu с вводом бора и модифицированием малыми количествами оксидных наночастиц.

Технология создания экспериментальных образцов алюмокомпозитов заключалась в пресовании и спекании в вакууме подготовленной шихты из смесей порошков алюминия и легирующих компонентов. Рассев матричных порошков производился в вибросите, сушка порошков осуществлялась на воздухе при 60°C, смешение проводилось в планетарной мельнице со стальными шарами (5 мм) в течение 15 мин. в присутствии ПАВ. Ввод наночастиц в матрицу осуществлялся под действием ультразвука в жидкости (органический

растворитель) с одновременным перемешиванием при помощи верхнеприводной мешалки. Спекание проводилось в вакуумной печи при 620°C в течение 30 мин в вакууме 0,0001 мм рт. ст. Во всех полученных образцах зёрна имеют сферическую и близкую к сферической форму и равномерное распределение.

В результате исследования прочности спечённых образцов алюмокомпозитов выявилось сильное влияние нафена. При комнатной температуре испытаний прочность модифицированных образцов повысилась в среднем на 30%, а прочность при 300°C – на 5–30%, кроме образца с содержанием 0,1% нафена, для которого наблюдалось снижение прочности, возможно из-за высокой концентрации нафена и трудностей его равномерного распределения в матрице.

## 2. Основные результаты разработки технологии получения высокочистых наноразмерных порошков АМШ

В настоящей работе разработан модифицированный метод соосаждения на основе [11], заключающийся в совместном осаждении гидроксидов Al и Mg из водного раствора солей, из которых синтезируется слабоагломерированный нанопорошок АМШ. Метод отличается двухстадийностью отжига для синтеза нанопорошка: на первой стадии при низкой температуре происходил первичный синтез зародышей АМШ, на второй – формирование слабоагломерированных нанопорошков АМШ в среде расплавленной инертной соли KCl, препятствующей образованию агломератов. В работе использовались высокочистые порошки (содержание основного компонента выше 99%) водорастворимых солей алюминия и магния, дистиллированная вода, осадитель – NH<sub>4</sub>OH.

В результате синтеза образовались белые, мелкодисперсные порошки. Измерена величина удельной площади поверхности порошка методом БЭТ – 160 м<sup>2</sup>/г. Определение элементного состава порошка показало, что полученный порошок АМШ не содержит в своем составе примесей других элементов, содержание основного компонента составляет не менее 99,98 %. Мето-

дом РФА определен фазовый состав полученного порошка шпинели, согласно которому основная фаза полученного материала – высокодисперсная шпинель.

Из синтезированных порошков АМШ получены керамические образцы, содержащие 100% (1), 50 % (2) и 0 % (3) нанопорошка АМШ, с использованием ИПС при температуре 1500–1600°C и усилия пресования 20 kN. На рис. 1 представлен внешний вид образцов. Табл. 1 содержит сравнительные характеристики полученных образцов: пористость, твердость, прочность на изгиб и оптическое пропускание

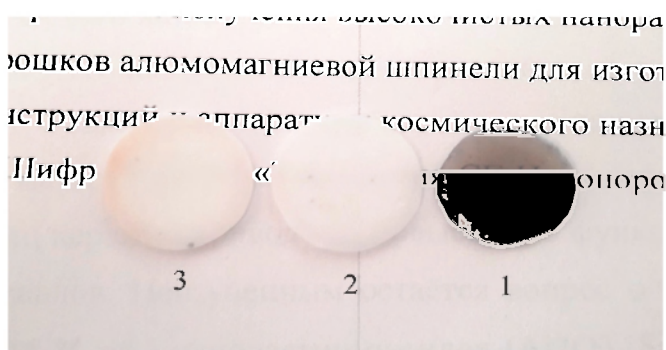


Рис. 1. Внешний вид керамических образцов с различным содержанием АМШ

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики полученных образцов АМШ

Образец	Пористость, %	Твердость, ГПа	Прочность на изгиб, МПа	Оптическое пропускание при 1050 нм, %	Оптическое пропускание при 800 нм, %
1	0,06	17	260	35	30
2	0,9	17,5	230	0	0
3	1,06	16,5	154	0	0

в видимом и ближнем ИК. Как видно, керамические образцы, состоящие только из нанопорошков АМШ, демонстрируют лучшие пока-

затели, обладая пропусканием в видимом и ближнем ИК более высокой прочностью и низкой пористостью.

### Заключение

1. Разработана технология создания алюмокомпозитов, упрочнённых малыми добавками наночастиц оксида алюминия, включающая методы классической порошковой металлургии (прессование, вакуумное спекание).

2. В результате исследования прочности на изгиб установлено, что при комнатной температуре испытаний образцы, содержащие 0,01 – 0,1% масс. Nafen™ имели прочность выше в среднем на 30%, чем матрица. Однако при испытаниях с температурой 300°C лучший результат показал образец с 0,01 % масс. наночастиц, прочность которого на 14% выше прочности матрицы.

3. Синтезированы модифицированным методом соосаждения и исследованы образцы

высокодисперсного особочистого порошка АМШ. Полученные порошки слабоагломерированы, содержание основного компонента составляет не менее 99,98 %; обладают высокой удельной площадью поверхности, составляющей 160 м<sup>2</sup>/г.

4. Исследованы сравнительные характеристики (оптические, прочностные и т.д.) конструкций, созданных с использованием высокочистых нанопорошков с конструкциями, в которых не содержатся наноразмерные порошки.

Публикуемые результаты получены в рамках выполнения программы Союзного государства «Технология-СТ».

### Список литературы

1. Полмеар Я. Лёгкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. М.: Техносфера, 2008. 464 с.

2. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: СамГТУ, 2013. 81 с.

3. Берлин А.А., Ассовский И.Г. Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007.

4. Agureev, L.E., Kostikov, V.I., Yeremeyeva, Z.V. et al. Powder aluminum composites of Al–Cu system with micro-additions of oxide nanoparticles// Inorganic Materials: Applied Research. 2016. Т. 7. № 6. С. 507-510.

5. Mironov, V.V., Agureev, L.E., Ereemeeva, Z.V., Kostikov, V.I. Effect of Small Additions of Alumina Nanoparticles on the Strength Characteristics of an

Aluminum Material// Doklady Physical Chemistry. 2018. 481(2), с. 110-113

6. Kostikov, V.I., Agureev, L.E., Ereemeeva, Z.V. Development of nanoparticle-reinforced alumocomposites for rocket-space engineering// Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. 56(3), с. 325-328.

7. Wu H., Koo J.H. Functionalized Nafen™ alumina nanofiber reinforced Polyamide 6 nanocomposites: mechanical, thermal and flame retardant properties. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. SAMPE Conference Proceedings. Baltimore, MD, May 18-21, 2015

8. Гольева Е.В., Михайлов М.Д., Дунаев А.А., Игнатенков Б.А. Влияние условий синтеза и структуры исходных нанокристаллических порошков на оптические свойства прозрачной ке-



рамики  $MgAl_2O_4$  // Оптический журнал. 2016. Т. 83. №2. С. 67–72.

9. D.W. Roy. History of Spinel Development // DARPA/ARL. – Transparent Armor Workshop. – Annapolis, MD. – 1998.

10. Файков, П.П. Синтез и спекаемость порошков в системе  $MgO-Al_2O_3$ , полученных

золь-гель методом: Дис. к.т.н. // РХТУ им. Д.И. Менделеева. М. 2007. 165 с.

11. Мамонова Д.В. Синтез и исследование свойств наночастиц сложных оксидов на примере алюмоиттриевого граната и феррита висмута: Дис. к.х.н. // Санкт-Петербургский государственный университет. СПб. 2015. 136 с.

**✦ ДЛЯ ЗАМЕТОК**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## УДК629.7

*Власов Ю.В.<sup>1</sup>, Кузин А.И.<sup>1</sup>, Семенов В.В.<sup>1</sup>, Егоров А.В.<sup>1</sup>, Мазуркевич А.Н.<sup>1</sup>,  
Ахмедов Ф.А.<sup>1</sup>, Быков А.А.<sup>1</sup>, Кондратенко А.А.<sup>1</sup>,  
Ризаханов Р.Н.<sup>2</sup>, Кинжагулов И.Ю.<sup>3</sup>, Малеев Н.А.<sup>4</sup>*

*(<sup>1</sup>ФГУП «НПО «Техномаш», <sup>2</sup>ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,  
<sup>3</sup> НТЦ «Эталон», <sup>4</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)*

**Результаты научно-технической программы Союзного государства  
Россия-Беларусь «Разработка комплексных технологий создания материалов,  
устройств и ключевых элементов космических средств  
и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СГ»)**

В работе изложены результаты разработок технологий создания новых материалов для средств космического назначения, в том числе результаты разработок технологий создания новых конструкционных наноматериалов для перспективных изделий ракетно-космической техники, разработок технологий нанесения многофункциональных покрытий на изделия ракетно-космической техники и создания неразборных соединений перспективных материалов, разработок технологий создания новых свойств материалов для покрытий элементов ракетно-космической техники.

**Ключевые слова:** нанокompозит, углеродные наноструктуры, модификатор, адгезивные композиции, нанопорошок, термопласты, алюмокомпозиты, алюмомагниева шпинель.

Научно-техническая программа «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» состоит из трех программных мероприятий. ФГУП «НПО «Техномаш» является головным исполнителем программного мероприятия 1 – **«Разработка технологий создания новых материалов для средств космического назначения».**

В настоящее время в рамках мероприятия 1 ФГУП «НПО «Техномаш» выполняет НИР **«Разработка технической документации, изготовление опытных образцов материалов, проведение лабораторных исследований»**, государственный контракт от 26.09.2017 №922-101СГ/17/176 – сроки выполнения 01.11.2017 – 25.11.2020. Второй этап охватывает период 01.11.2017 – 25.11.2019.

В соответствии с техническим заданием и календарным планом проведения работ в рамках вышеуказанного контракта выполняются работы по следующим темам:

1. Разработка технологии создания и получение опытной партии лёгких наноструктурных мате-

риалов (на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC) с заданным набором механических и теплофизических свойств для корпусов жидкостных ракетных двигателей.

2. Разработка технологии производства сплавов на основе использования композиций нанопорошков и воздействия на расплав акустических или вибрационных колебаний, обеспечивающих повышение предела прочности деталей двигательных установок РКТ на 15...20%, предела текучести – до 30%, твёрдости – в 1,5 раза, жаропрочности – на 15...20%.

3. Разработка технологических приемов формования типовых деталей РКТ из высокотемпературных термопластов, обеспечивающих снижение массы изделия РКТ на 20% и трудоёмкость их изготовления на 35%.

4. Разработка технологии получения высокочистых наноразмерных порошков из керамического материала для изготовления конструкций и аппаратуры космического назначения: технология получения алюмомагниева шпинели с содержанием основного вещества не менее 99,98% и удельной поверхностью до 160 м<sup>2</sup>/г.

5. Разработка технологии неразрушающего контроля качества сварных соединений, выпол-



ненных сваркой трением с перемешиванием, обеспечивающие снижение доли брака при изготовлении элементов РКТ на 15% за счёт выявляемости дефектов малого раскрытия (более 2 мкм).

6. Разработка технологии бездеформационного соединения оптических и конструктивных элементов аппаратуры оптико-электронных систем малых КА с использованием полимерных адгезивных композиций.

7. Разработка технологии газотермического нанесения функциональных электропроводных терморегулирующих покрытий на элементы конструкций РКТ, обеспечивающие в 1,5 раза сокращение цикла производства и затрат на нанесение покрытия, уменьшение массы покрытия на 15...20%, повышение защищенности от статического электричества в 6 раз, в том числе предложение о создании промышленной установки нанесения покрытий.

8. Разработка технологии изготовления силовых конструкций изделий РКТ из композиционных материалов с термопластичной матрицей, обеспечивающая снижение массы изготавливаемых деталей на 50% и трудоёмкости их изготовления на 20%.

9. Разработка технологии создания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона (до 60 ГГц) на подложках фосфида индия с мощностью до 1 Вт с 1 мм затвора.

10. Разработка технологии повышения прочности поверхности оптических элементов посредством нанесения углеродных наноструктур, образец зеркала с упрочняющей наноструктурой, позволяющей сохранить неискажённую поверхность главного входного зеркала оптической системы с предельными отклонениями формы поверхности не более 0,016...0,01 мкм и допустимой шероховатости поверхности 5...10 ангстрем (под воздействием факторов космического пространства в течение 7...10 лет).

**Основные результаты исследований и научно-технических разработок, проведенных в рамках 2 этапа:**

- *Разработки технологии создания лёгких наноструктурных материалов (на основе  $Al_2O_3$ ,  $SiC$ ) с заданным набором механических и теплофизических свойств.*



Рис.1. Плазмохимическая установка

Целью работы является разработка технологии создания легких наноструктурных алюмокомпозиатов для изготовления конструкций ракетно-космической техники (РКТ) с плотностью не более  $2,75 \text{ г/см}^3$  и прочностью не менее 280-300 МПа. В работе рассматривается технология получения образцов алюмокомпозиатов упрочненных микродобавками тугоплавких наночастиц, в частности наночастицами  $Al_2O_3$  и  $SiC$ . Композиты типа «алюминий – керамические частицы» имеют более низкий удельный вес, обладают оптимальным соотношением прочности и пластичности и достаточной коррозионной стойкостью в сочетании с высокими эксплуатационными механическими характеристиками [1]. Для получения нанодисперсных порошков оксида алюминия и карбида кремния размером частиц менее 0,1 мкм использовалась плазмохимическая установка [2], общий вид которой показан на рис. 1.

Микроструктуру образцов композиционного материала изучали на микроскопе FEI Quanta 600 FEG интегрированного с комплексной системой микроанализа EDAX TRIDENT XM 4. Нанопорошки  $Al_2O_3$ , синтезированные на плазмохимической установке, имели разброс по размерам от 20 до 100 нм (рис. 2), а порошки  $SiC$  оказались сильно агрегированными и состояли из первичных частиц с размерами 10–30 нм (рис.3).

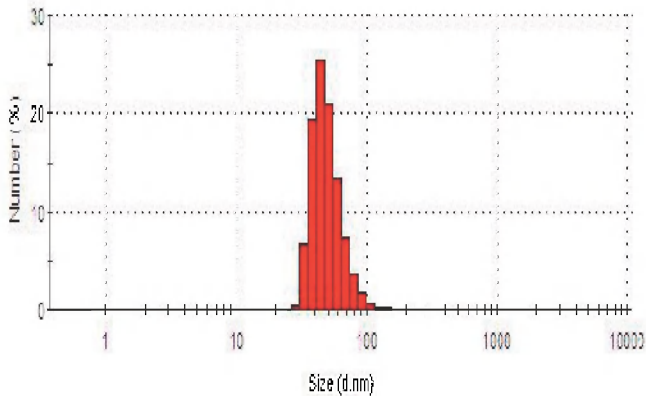


Рис. 2. Нанопорошки  $Al_2O_3$  с размером частиц от 20 до 100 нм

Диапазон концентраций в матрице находился в пределах для SiC 0,01-0,15 объемных процентов и 0,01-1,5 объемных процентов для оксида алюминия. Температура спекания в форвакууме находилась в пределах 600-640°C. При добавлении в матрицу никеля и меди прочность алюмокомпозита на изгиб и растяжение увеличивается (рис.4).

Микроструктура композитов Al-Ni-Cu-B (рис. 5) и рентгенофазовый анализ показывают, что в композите присутствуют фазы  $Al_3Ni$ ,  $Al_7Cu_{23}Ni$  и  $Ni_4B_3$  в небольшом количестве (рис. 6).

Таким образом, в разработке технологии создания лёгких наноструктурных материалов с заданным набором механических и теплофизических свойств достигнуты результаты:

- получены образцы алюминия с добавками легирующих компонентов (никель, медь) при температуре спекания 500°C;

- исследованы микроструктуры образцов алюминия, спечённых искровым плазменным методом, а также диспергируемость различных наночастиц в растворах гексана и толуола;

- проведено спекание алюмо-никелевой шихты с добавками наночастиц Cu и B методом искрового плазменного спекания;

- проведены исследования фазового состава алюмо-композитов системы Al, Ni, B, Cu. Исследованы механические свойства (предел текучести, модуль Юнга, предел прочности) алюмо-композитов;

- алюмо-композит, спрессованный при 400 МПа, содержащий 1 объемный процент  $Al_2O_3$  показал наилучший результат по плотности равный 2,74 г/см<sup>3</sup>;

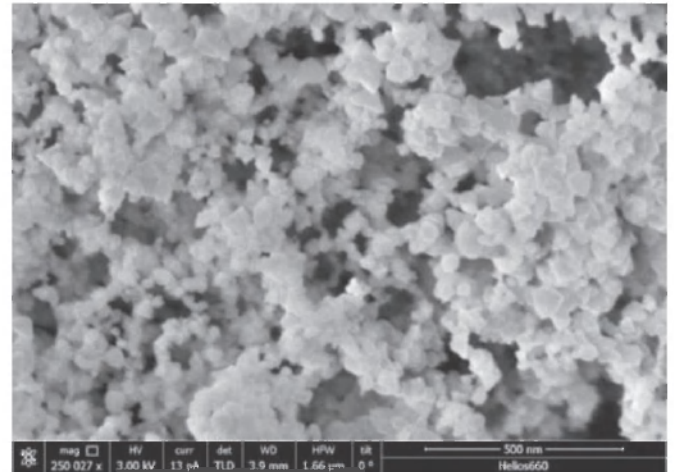


Рис. 3. Порошки SiC с размером 10-30 нм

Состав, % масс.	Прочность на изгиб, МПа
Al-3Ni-1Cu	214±40
Al-3Ni-4Cu	297±20
Al-3Ni-1Cu-0,5B	339±20

Рис. 4. Прочность алюмокомпозитов на изгиб и растяжение в зависимости от состава

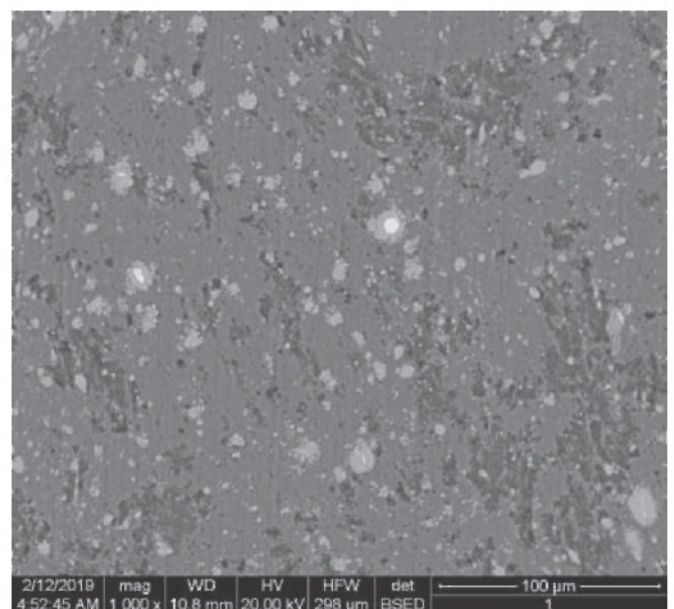


Рис. 5. Микроструктура композита Al-Ni-Cu-B

- минимальная общая пористость после спекания, равная 3,3%, отмечена у композитов с наночастицами SiC с 0,05 объемным процентом;



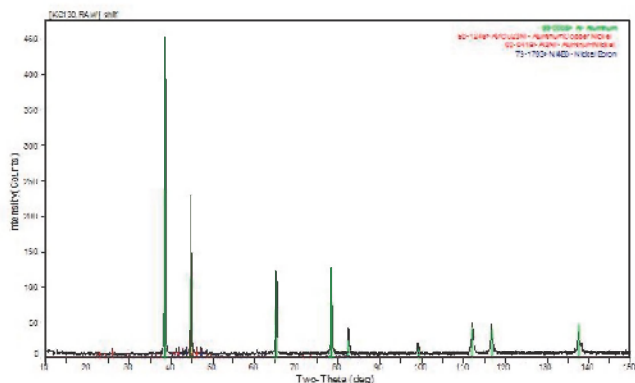


Рис. 6. Рентгенофазовый анализ композита Al-Ni-Cu-B

– предел прочности на растяжение алюмокомпозитов, легированных медью и никелем, с добавками наночастиц ( $Al_2O_3$ , SiC) в концентрации 0,01-0,15 объемных процента находится в интервале 129–383 МПа, а предел прочности на изгиб – 130–280 МПа;

– микротвёрдость композитов без меди составила 0,3–0,35 ГПа, а с медью — 0,52–0,58 ГПа.

**• Разработки технологии производства сплавов на основе использования композиций нанопорошков и воздействия на сплав металла акустических или вибрационных колебаний.**

Целью работы является разработка технологии литья с использованием наномодификаторов и создание специального оборудования, позволяющего формировать требуемую структуру металла, повысить прочностные и эксплуатационные характеристики материалов. В целях повышения механических свойств литых деталей в процессе приготовления сплавов или при заливке в формы в жидкий металл вводят специальные добавки (модификаторы), которые обеспечивают формирование мелкокристаллического строения структуры. Такие добавки оказывают модифицирующее действие при введении в расплав в небольших долях, от доли процента до нескольких процентов [3, 4].

Основные задачи научно-исследовательской работы по разработке данной технологии:

– создание макета технологического стенда для реализации технологии производства сплавов на основе использования композиций нанопорошков и лабораторного стенда для проведения механических испытаний;

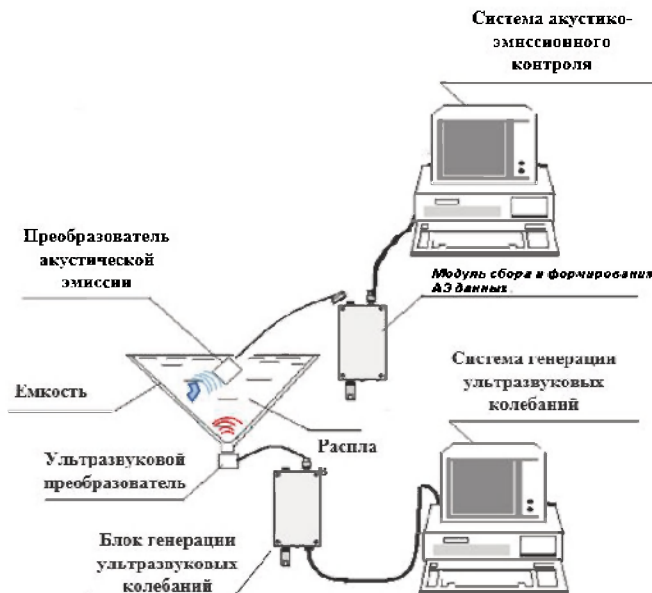


Рис. 7. Блок-схема технологического стенда

– проведение лабораторных исследований влияния параметров воздействия на расплав акустических и вибрационных колебаний на механические свойства и дефектность модифицированного сплава композиций нанопорошков. Выбраны оптимальные параметры воздействия для повышения механических характеристик сплава;

– разработка и изготовление опытного образца из модифицированного сплава с геометрическими размерами не менее 10x10x10 мм;

– разработка технической документации на базовые элементы технологии производства сплавов на основе использования композиций нанопорошков и воздействия на расплав акустических или вибрационных колебаний;

– технологический стенд, созданный для реализации технологии производства сплавов на основе использования нанопорошков и воздействия на расплав акустических колебаний, состоит из элементов:

– лабораторная вакуумная печь для литейного процесса;

– оборудование для воздействия на расплав акустических колебаний;

– средства контроля равномерности распределения наномодификаторов в расплаве при воздействии на него акустических колебаний.

Блок-схема технологического стенда показана на рис. 7.

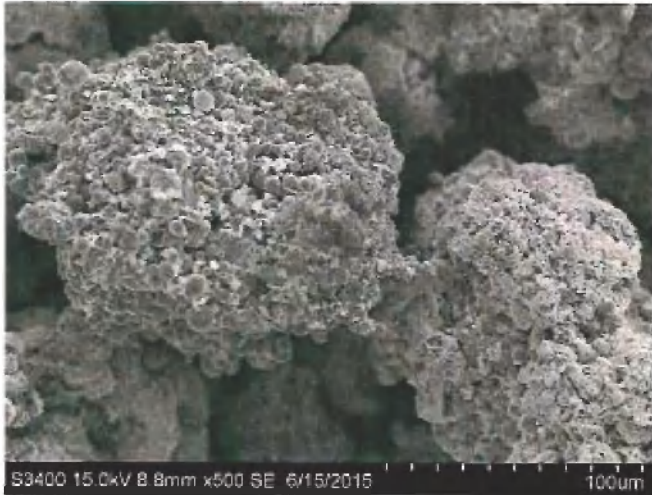


Рис. 8. Морфология частиц нанопорошка, полученная методом дифракции лазерного излучения

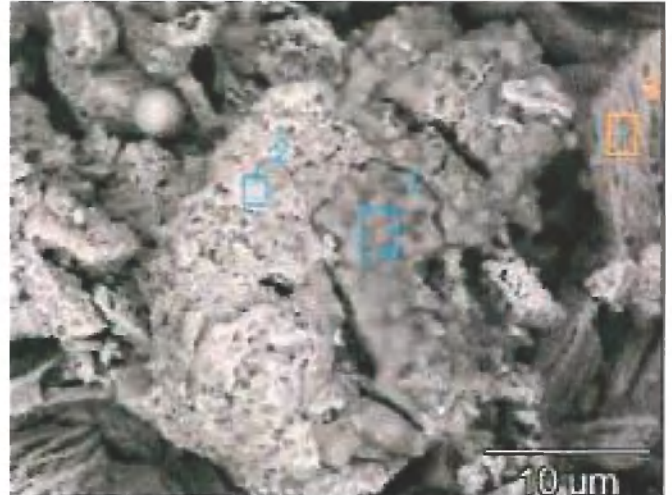
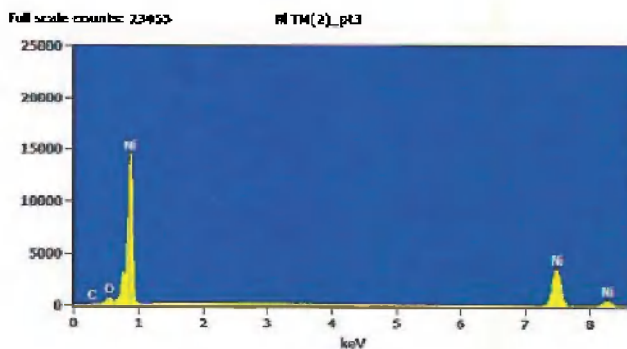


Рис. 9. Микроструктура модификатора, полученная на электронном микроскопе



б

Рис.10. Спектральный анализ фазового состава модификатора

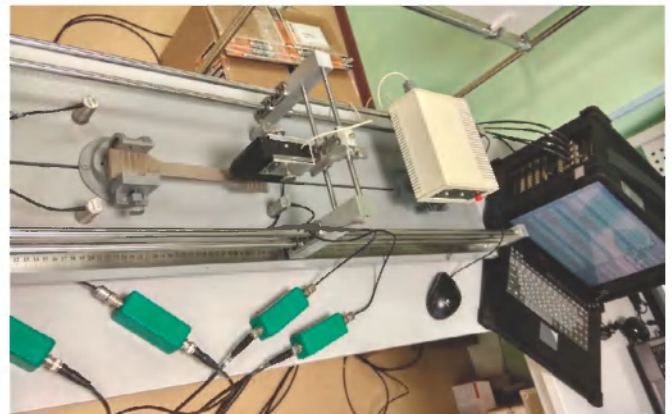


Рис.11. Оборудование динамического индентирования

Исследования влияния наномодификаторов на свойства сплавов, получаемых воздействием на расплав акустических колебаний, проводились на современном оборудовании. На рис. 8 показана морфология частиц нанопорошка, полученная методом дифракции лазерного излучения, а на рис. 9 микроструктура модификатора, полученная на электронном микроскопе.

Изменение структуры при фазовых превращениях расплава в процессе кристаллизации отражаются на энергетических и спектральных характеристиках акустико-эмиссионных сигналов при воздействии на расплав вибрационных колебаний. Спектральный анализ фазового состава модификатора определялся рентгеновским методом (рис.10), а механические свойства модификаторов методом динамического индентирования (рис.11).

Таким образом, в рамках разработки технологии производства сплавов на основе использования композиций нанопорошков и воздействия на расплав акустических или вибрационных колебаний выполнены следующие виды работ:

- создан комплекс средств контроля равномерности распределения нормируемых характеристик механических свойств в расплаве при воздействии на него акустических или вибрационных колебаний;
- определены основные технические и конструктивные решения элементов лабораторной установки для литейного процесса при воздействии на расплав акустических или вибрационных колебаний;
- установлены оптимальные композиции нанопорошков для производства деталей двигательных установок РКТ из высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов;



Таблица 1.

Область применения	Примеры применения	Связующее	Наполнитель
Космическая аппаратура	Стенки бака жидкого водорода, силовые детали аппарата, фермы солнечных батарей	ПЭЭК, ПФС, ЖКП, плавкие полиимиды	Углеродное волокно
Ракеты типа «Томагавк»	Крыло, панели люка, обтекатель, сопла, камера сгорания	ПФС, ПЭЭК, ЖКП, ПЭС	Кевлар, углеродное волокно
Специальное оборудование для всех типов ЛА	Корпуса приборов и агрегатов, контейнеры радиоаппаратуры, детали для баллистической защиты, экраны для защиты от электромагнитного излучения	ПСФ, ПЭС, ПЭЭК	Кевлар, углеродное волокно, стеклянное волокно

– проведены лабораторные исследования влияния параметров воздействия на расплав акустических и вибрационных колебаний на прочностные свойства и дефектность модифицированного сплава композиций нанопорошков;

– исследованы микроструктуры модификаторов методами оптической и электронной микроскопии, определены механические свойства модификаторов.

• *Разработки технологических приемов формования типовых деталей РКТ из высокотемпературных термопластов, обеспечивающих снижение массы изделия РКТ на 20% и трудоемкость их изготовления на 35%.*

В настоящее время развитие РКТ характеризуется сокращением объемов применения металлов и их сплавов при одновременном увеличении объемов применения композиционных материалов. Высокотемпературные термопластичные материалы или термопласты в качестве связующих термопластичных материалов обеспечивают ряд преимуществ в области применения композиционных материалов в РКТ. В связи с кратковременностью нагрева заготовок процесс формования деталей из композиционных термопластичных материалов менее трудоемок, особенно в условиях крупномасштабного производства, что упрощает получение деталей сложной конфигурации, повышает производительность оборудования, создавая предпосылки для его автоматиза-

ции. Применение композиционных термопластичных материалов в РКТ может в 1,5 и более раз уменьшить объем сборочных работ, сокращая трудоемкость их изготовления, а также существенно снижает массу изделия.

Наиболее часто используемыми классами термопластов являются [5]:

- поликарбонаты (ПК);
- полиамиды (нейлон, полиамид-6, ПА-12);
- полисульфоны;
- полифениленсульфид (PPS);
- полиэфиримид (PEI);
- полиэфирэфиркетон (PEEK);
- полиэфиркетонкетон (PEKK).

Термопласты обычно имеют превосходную ударную вязкость, термостойкость, влагостойкость, химическую стойкость, пожаробезопасность и другие свойства, которые благоприятны для применения в аэрокосмических конструкциях. Примеры использования композиционных термопластичных материалов в космической технике показаны в табл. 1.

Среди высокотехнологичных приемов формования типовых деталей ракетно-космической техники в настоящее особое внимание уделяется применению аддитивных технологий [6]. Некоторые примеры использования технологий аддитивного производства в авиационно-космической технике представлены в табл. 2.

Учитывая специфические требования космической техники и космонавтики, наибольший

Таблица 2.

Материал	Задача	Технология аддитивного производства	Пример
Металл	Изготовление изделия заданной формы	Прямой подвод энергии и материала (Directed energy deposition)	Камера сгорания двигателя вертолета
	Технологическая оснастка	Технология проволоочно-дугового аддитивного производства (wire arc additive manufacturing)	Кронштейн антенны космического аппарата
Полимеры	Изготовление инструмента	Селективное или выборочное лазерное спекание (Selective Laser Sintering)	Гаечный ключ с трещоткой, напечатанный космонавтами NASA на МКС
	Прототипирование	Экструзия (Fused Deposition Modeling)	Макет крыла БПЛА

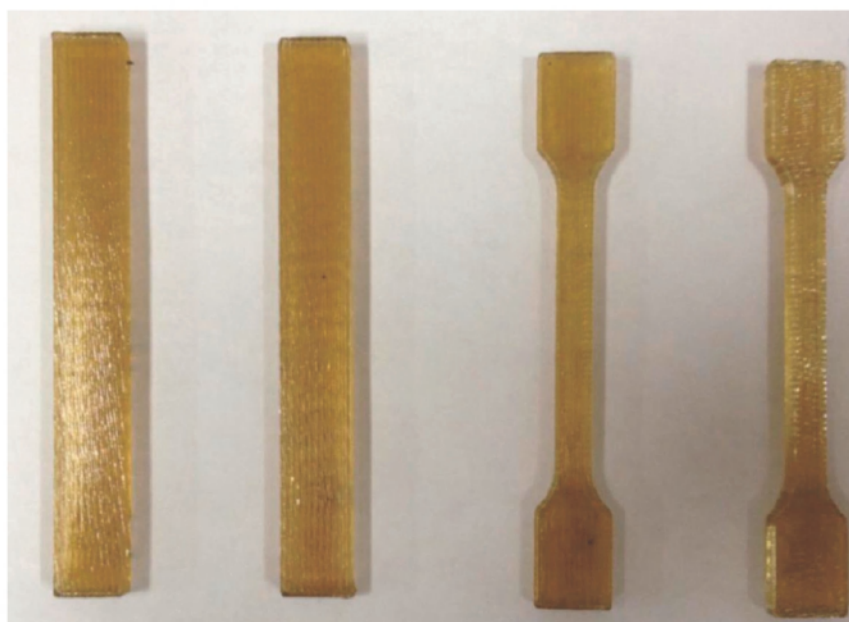


Рис.12. Образцы для испытаний из полифениленсульфона

интерес представляет направление технологий, основанное на экструзии (Fused Deposition Modeling), для создания легких крупногабаритных конструкций из композиционных материалов, особенно из высокотемпературных термопластов. Среди термопластов особое место занимают ароматические полигетероарилены, в том числе полиэфирсульфоны и полиэфиркетоны. Данные материалы обладают радиационной

стойкостью в сочетании с высокими физико-механическими и теплофизическими характеристиками. На рис. 12 показаны напечатанные образцы для испытаний из полифениленсульфона.

Физико-механические свойства напечатанных (FDM) образцов из полифениленсульфона, синтезированного по оптимизированной методике в сравнении с литьевыми приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Способ получения						
Литье	н/р	2530	1870	89,1	76,0	26,0
Печать	н/р	2750	2300	–	72,0	6,0
PPSU, печать	н/р	2400	1510	–	79,6	9,9

Таблица 4.

Способ получения					
Литье	3740	2970	104,6	96,2	86,0
Печать	3900	3100	43	–	1,6

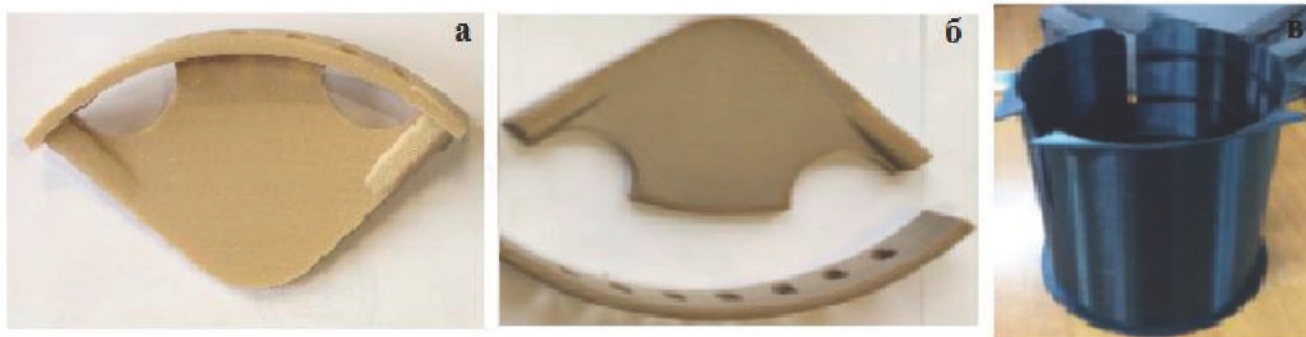


Рис.13: а) кронштейн; б) компоненты кронштейна; в) образец служебной системы космического аппарата

Из табл. 3 видно, что основные механические свойства полифениленсульфона, полученного методом литья под давлением и методом FDM, практически не отличаются. Напечатанные образцы имеют более высокие упруго-прочностные свойства, однако примечательно, что, несмотря на высокую ударопрочность, характер их разрушения при растяжении хрупкий: наблюдается малое относительное удлинение и отсутствие предела текучести на диаграмме. PPSU – зарубежный аналог, разработанный фирмой Stratasys Inc.

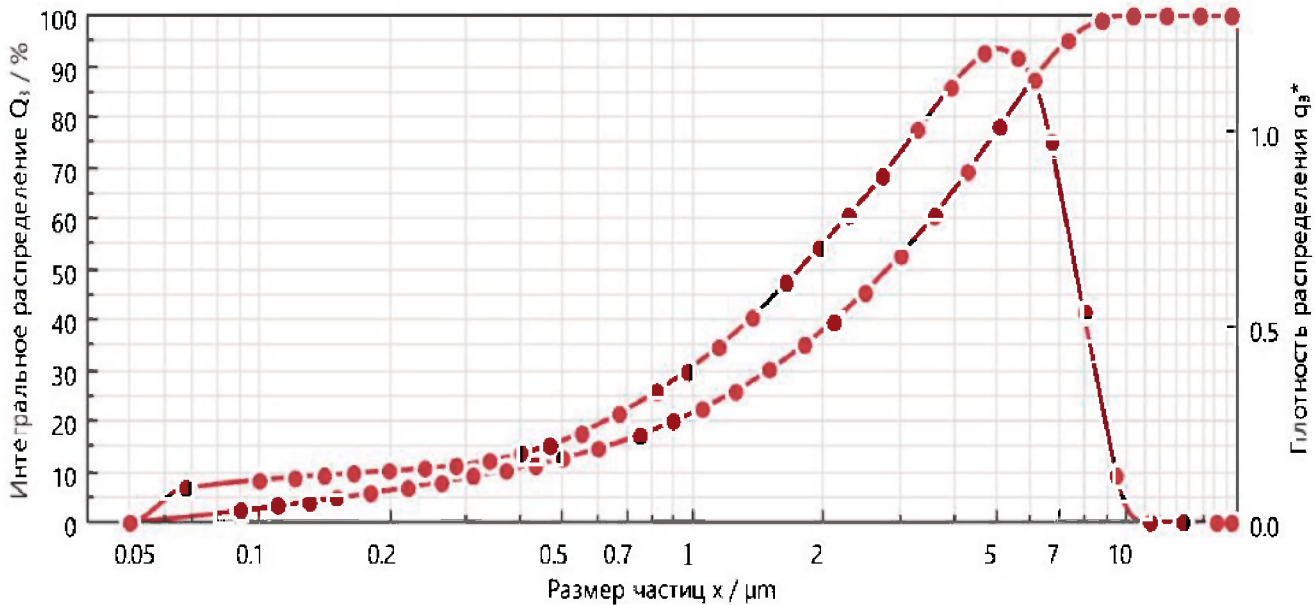
Физико-механические свойства образцов полиэфирэфиркетона показаны в табл.4.

Образцы типовой и силовой деталей космического аппарата, изготовленные методом FDM из углепластика на основе полиэфирэфиркетона показаны на рис. 13.

Из табл. 4 видно, что по упруго-прочностным свойствам напечатанные образцы из полиэфирэфиркетона не уступают литьевым. Однако напечатанные образцы характеризуются хрупким характером разрушения при растяжении и низким относительным удлинением.

Таким образом, предварительный анализ физико-химических свойств высокотемпературных термопластов показывает возможность их использования в качестве материалов для изготовления деталей РКТ.

Результаты испытаний образцов композиционного материала на основе термопластичной матрицы из полисульфона и полиэфирэфиркетона, армированных углеродной тканью УТ-900 показали, что деградации материала от воздействия как термоциклических, так и радиационных воздействий различной интенсивности,

Рис. 14. Распределение  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 

не происходит. Следовательно, оба варианта термопластичных полимеров могут быть применимы для изделий РКТ.

Таким образом, в части тематики по разработке технологических приемов формования типовых деталей РКТ из высокотемпературных термопластов, обеспечивающих снижение массы изделия РКТ на 20% и трудоёмкость их изготовления на 35%, выполнены следующие виды работ:

- предложен перспективный метод формования типовых деталей РКТ из композиционных материалов;
- выбраны термопласты для использования в качестве компонентов материалов для изготовления типовых деталей РКТ: полифениленсульфон и полиэфирэфиркетон;
- проведены испытания перспективных материалов с термопластичной матрицей.

**• Разработки технологии получения высокочистых наноразмерных порошков из керамического материала для изготовления конструкций и аппаратуры космического назначения.**

Целью работы является разработка технологии получения высокочистых нанопорошков алюмомагниевого шпинели с удельной поверхностью до  $160 \text{ м}^2/\text{г}$  для изготовления элементов космической аппаратуры. Алюмомагниевого

шпинель ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) является эффективным материалом для высокотемпературной техники, кроме того, он обладает лучшим пропусканием излучения по сравнению с сапфиром в диапазоне длин волн  $4,5\text{--}5,5 \text{ мкм}$  [7], что имеет особое значение для поисковых систем. Прозрачность керамики во многом определяется чистотой и однородностью порошков шпинели. Для получения высокочистых нано-размерных порошков использовалась золь-гель технология синтеза порошков [8], а однородность и количественный элементный анализ порошков шпинели проводились методом сканирования поверхности в электронном микроскопе. Определение распределения частиц по размерам и наличия агломератов проведено методом лазерной дифракции с использованием лазерного гранулометра Microtrac Bluewave. На рис. 14 представлены распределение частиц и наличие агломератов, где средний размер частиц равен  $4 \text{ мкм}$ .

Керамика шпинели стехиометрического состава получена методом искрового плазменного спекания при температурах  $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$  и давлении  $20 \text{ кН}$ . На рис. 15 представлены дифрактограмма образца с содержанием  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  99,9 %. Содержание  $\text{MgO}$  превышает 0,1 %, примесей менее 0,1 %.

Основные результаты исследований в рамках тематики по разработке технологии получения

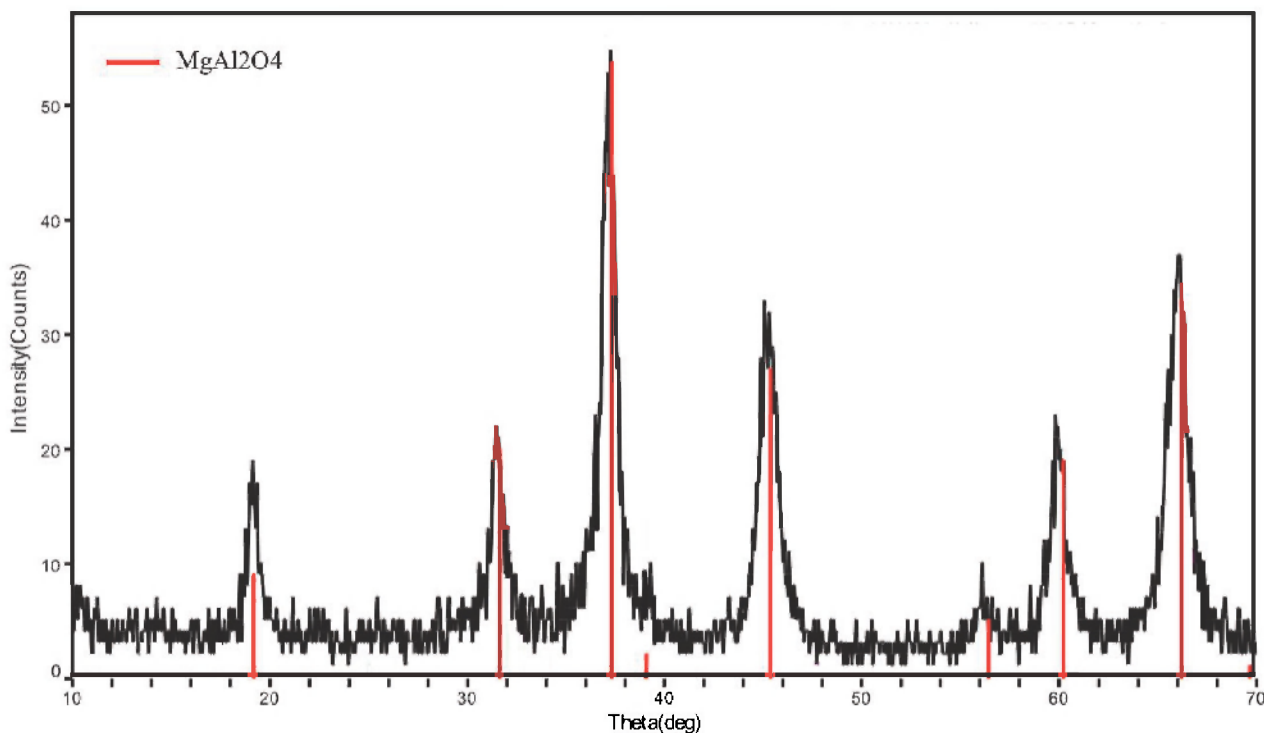


Рис. 15. Дифрактограмма образца MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (99,9 %)

высококачественных наноразмерных порошков из керамического материала сводятся к следующему:

- разработана технология синтеза особо чистых нанопорошков алюмо-магниевого шпинели;
- синтезированы наночастицы алюмо-магниевого шпинели с удельной поверхностью 160 м<sup>2</sup>/г;
- установлено влияние параметров процесса синтеза на стехиометрическое соотношение, количество и распределение примесей в конечном продукте;

– определено, что стехиометрия шпинели зависит от скорости нагрева в температурном интервале образования шпинели и времени выдержки;

– установлено, что для синтеза шпинели, близкой к стехиометрической, оптимальным параметром является скорость нагрева в температурном интервале образования шпинели не выше 2 °С/мин и временем выдержки не более 3 ч.

**• Разработки технологии неразрушающего контроля качества сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП).**

Целью работы является разработка технологии неразрушающего контроля качества сварных

соединений для обеспечения снижения доли брака при изготовлении элементов РКТ на 15 % за счет выявляемости дефектов малого раскрытия (более 2 мкм). Существует ряд методов неразрушающего контроля сварных соединений: ультразвуковой [9, 10, 11], радиографический [12, 13], тепловой [14, 15], вихретоковый [16, 17], а также комплексный метод неразрушающего контроля [18, 19, 20].

Технология неразрушающего контроля качества сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, состоит из следующих операций:

- контроля параметров подготовки и сборки под сварку;
- контроля параметров сварочного процесса в ходе СТП;
- контроля качества сварных соединений.

При подготовке и сборке под сварку контролируются толщина заготовок и зазор между заготовкой и подложкой. Для контроля параметра «толщина» создана и использована измерительная головка на основе магнитоиндукционного преобразователя (рис. 16).

Зазор между заготовкой и подложкой контролировался измерительной головкой на основе



Рис.16. Измерительная головка на основе магнитоиндукционного преобразователя

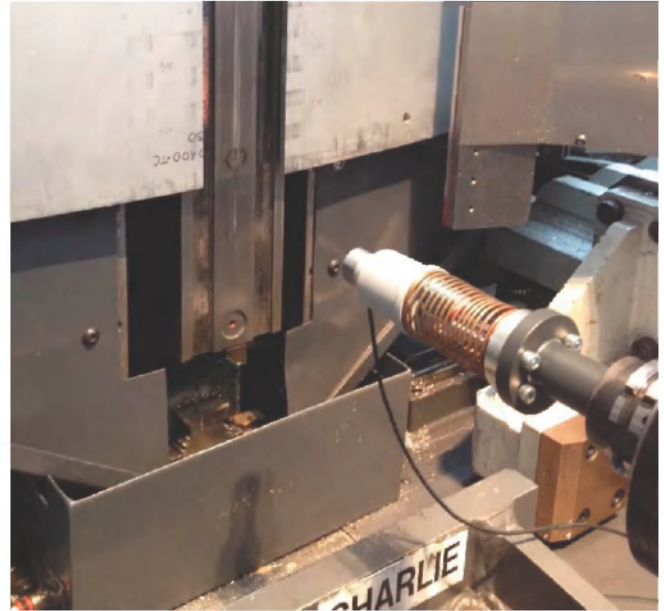


Рис.17. Измерительная головка на основе электромагнитноакустического преобразователя

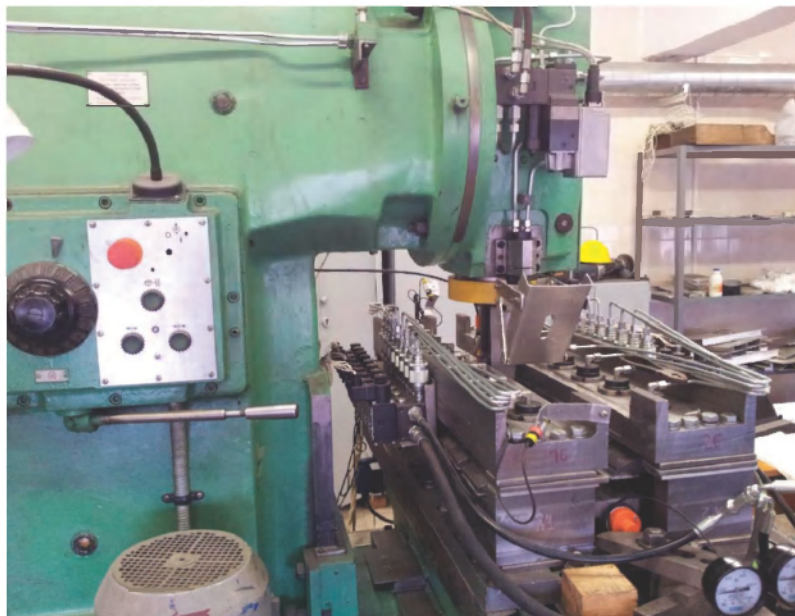


Рис.18. Макет станда СТП

электромагнитно-акустического преобразователя (рис.17)

Для контроля параметров сварочного процесса в ходе СТП создан макет станда СТП (рис. 18).

Сварочный процесс контролировался мониторингом следующих параметров:

- скорость подачи инструмента;
- скорость вращения инструмента;
- давление на сварочный инструмент;
- глубина внедрения сварочного инструмента.

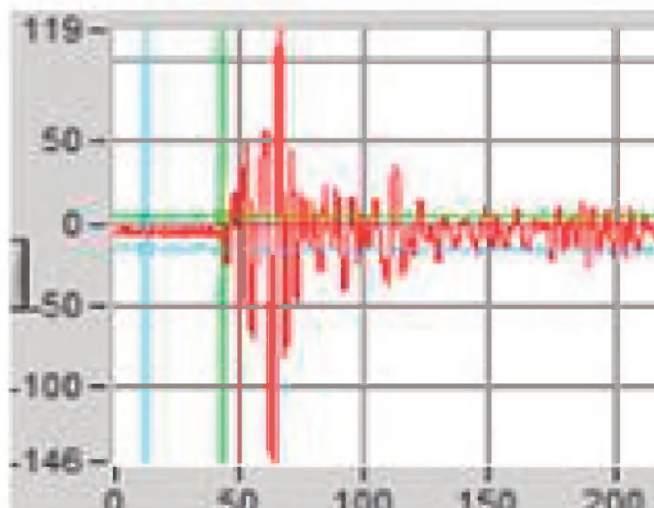
Применение средств акустико-эмиссионного контроля в ходе сварки трением с перемешиванием позволяет более точно контролировать не только зазор между заготовкой и подложкой, но и другие параметры: давление на сварочный инструмент, скорость подачи инструмента, скорость вращения и т.д. (рис.19 а, б).

Контроль температуры в зоне сварки является одним из важных параметров процесса сварки, который определяет качество сварного соедине-



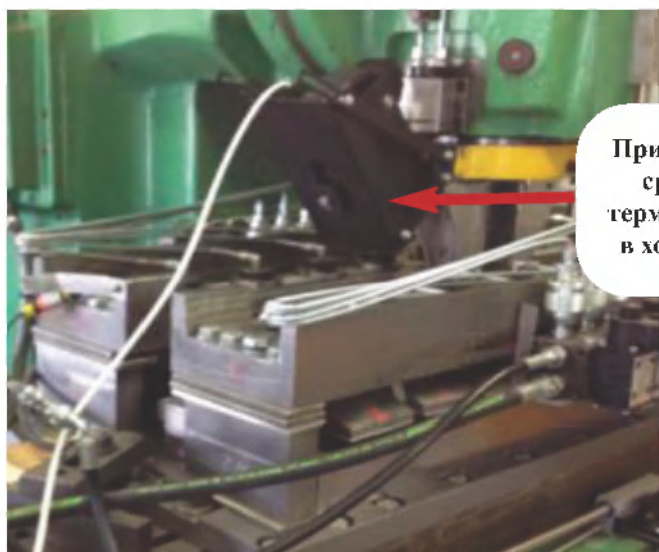


а)

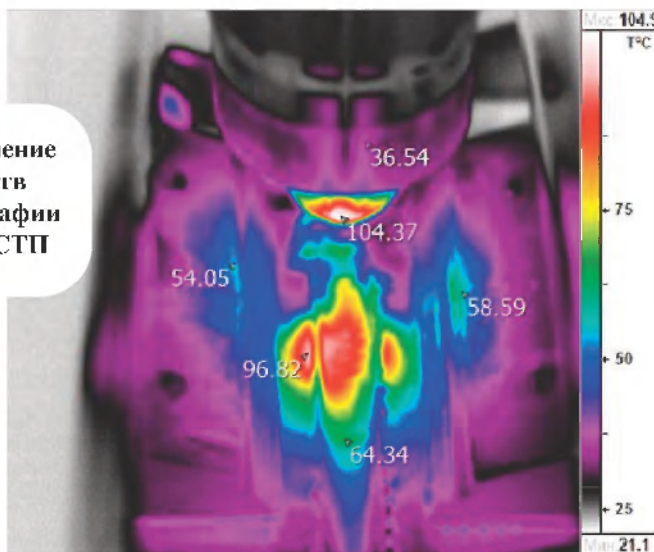


б)

Рис. 19: а) измерительная головка; б) форма импульса акустической эмиссии



а)



б)

Рис. 20: а) специальный блок; б) распределение температурных полей

ния. В макете стенда СТП установлен специальный блок (рис. 18а), определяющий температуру в зоне сварки, а также температуру сварочного инструмента. Температуру в сварочной зоне, кроме цифровизации, можно визуализировать на мониторе (рис.20 а,б).

Контроль качества сварных соединений осуществляется с помощью системы (рис. 21).

Качество сварных соединений контролируется определением следующих параметров:

- наличием дефектов;
- протяженностью дефектных участков;
- размерами непровара.

Опытные образцы сварных соединений для подтверждения чувствительности средств неразрушающего контроля представляют собой стыковые сварные соединения, выполненные сваркой трением с перемешиванием из алюминиево-магниевого сплава АМгб. Сварка опытных образцов проводилась в одном режиме, рассчитанном для заготовок толщиной, равной 7,4 мм с постоянным значением параметров сварки:

- скоростью вращения инструмента – 800 об/мин;
- скоростью подачи инструмента – 160 мм/мин;
- усилием на опорном бурте инструмента – 8,5 кН;

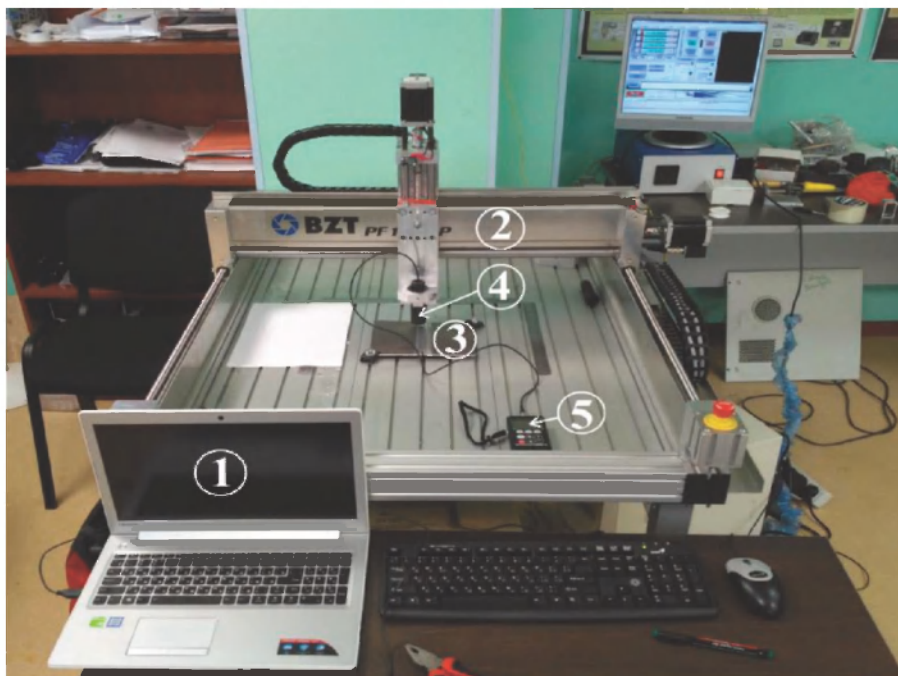


Рис. 21. Контроль качества сварных соединений:  
 1, 2, 3 – объект контроля; 4 – ультразвуковой преобразователь;  
 5 – прибор ультразвукового контроля для обработки первичного сигнала

– вылетом рабочего стержня сварочного инструмента – 7,3 мм.

Для имитации дефектов малого раскрытия типа «непровар в корне шва» использовались заготовки опытных образцов сварных соединений, имеющие разную толщину: 7,4; 7,6; 7,8 мм. Заготовки имели следующие размеры: ширина –  $100,0 \pm 5,0$  мм, длина –  $300,0 \pm 5,0$  мм.

Таким образом, в части тематики по разработке технологии неразрушающего контроля качества сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, достигнуты следующие результаты:

- проведена сборка лабораторной установки системы контроля СТП;
- проведены исследования по обнаружению дефектов в лабораторных образцах, выполненных СТП с применением выбранных средств контроля;
- создан макет системы контроля СТП, включающего элементы контроля параметров процессов в ходе сварки;
- разработана эскизная техническая документация для создания системы контроля СТП, включающего элементы контроля параметров процессов в ходе сварки. На основании данной документации создается система контроля, кото-

рая интегрируется в технологический цикл производства.

• *Разработки технологии бездеформационного соединения оптических и конструкционных элементов аппаратуры оптико-электронных систем с использованием полимерных адгезивных композиций.*

Целью работы является разработка технологии соединения оптических и конструктивных элементов аппаратуры с использованием полимерных адгезивных композиций, обеспечивающих прочность усилия на разрыв не менее  $150 \text{ кг/см}^2$  при разности температурных коэффициентов линейного расширения каждого из соединенных элементов не менее  $30 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ .

Технология соединения (склеивания) оптических деталей и конструктивных элементов аппаратуры должна отвечать высоким требованиям к точности обработки соединяемых поверхностей, повышать качество изображения и светопропускания системы, обеспечивать надежную фиксацию правильного взаимного расположения деталей. Известны публикации, отражающие основные разделы технологического процесса склеивания разных оптических деталей, описывающие использование методик и клеевых составов [21, 22, 23].

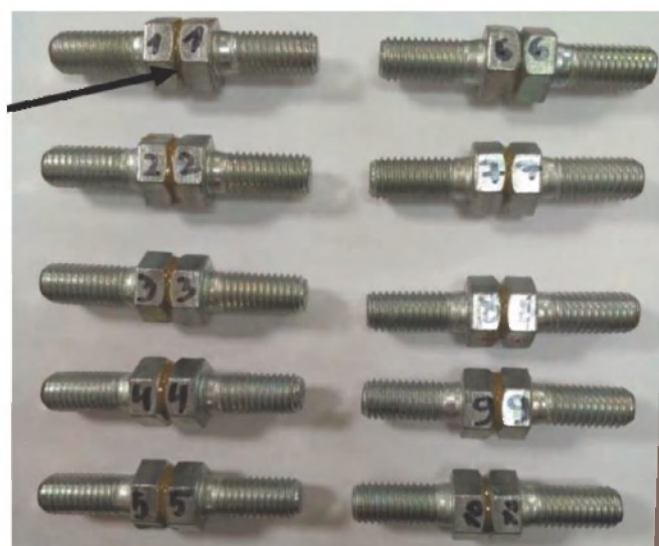


а)

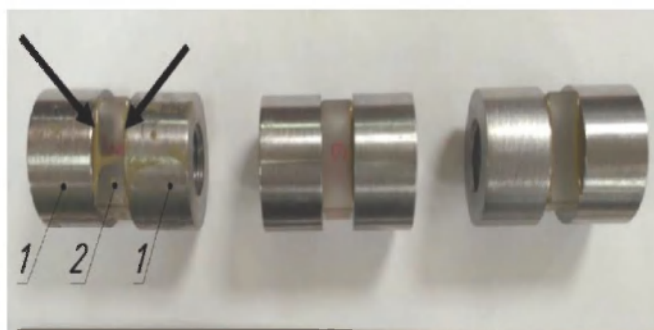


б)

Рис. 22. Стенд для создания клеевого соединения: а) устройство фиксации склеиваемых элементов; б) устройство равномерного нанесения клеевого соединения на поверхность



а)



б)

Рис. 23. Клеевое соединение: а) металл-металл; б) 1 –металл, 2 – стекло

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- разработать и изготовить элементы технологического стенда для создания клеевого соединения оптических и конструкционных элементов аппаратуры оптико-электронных систем малых КА и стенда контроля качества получаемых соединений;
- провести лабораторные исследования влияния состава полимерных адгезивных композиций на прочностные свойства соединений оптических и конструкционных элементов;
- разработать и изготовить опытный образец из оптического элемента в виде соединенного посредством эпоксиполиамидной композиции ситалла с алюминием (или титаном), представляющим собой соединение, имеющее конструктивные элементы для установки образца в испытательную машину в целях проведения прочностных испытаний;

– провести исследовательские испытания опытного образца из оптического элемента, в части определения прочностных характеристик;

– в ходе выполнения работ изготовить макет стенда для создания клеевого соединения оптических и конструкционных элементов аппаратуры оптико-электронных систем малых КА.

На рис. 22 показаны устройство фиксации склеиваемых элементов (рис. 22а) и устройство равномерного нанесения клеевого соединения на поверхность (рис. 22б).

Проведены исследования клеевых соединений металл-металл (рис. 23а) и металл-стекло (рис.23б).

Прочностные испытания клеевых соединений проводились на универсальной испытательной машине LFM 150 kH (рис.24).

Результаты исследований приведены в табл. 5.



Рис. 24. Прочностные испытания клеевых соединений

Таблица 5.

№ образца	Усилие при разрушении соединения, кН	Предел прочности клеевого соединения по номинальной площади, МПа	Предел прочности клеевого соединения по номинальной площади, кгс/см <sup>2</sup>	Среднее значение (СКО)
<b>Клеевое соединение «металл-металл»</b>				
1	7,38	21,307	217,3	215,5 (52,7)
2	5,50	15,879	161,9	
3	9,08	26,216	267,3	
4	4,05	11,693	119,2	144,1 (34,2)
5	4,94	14,263	145,4	
6	5,31	15,331	156,3	231,8 (67,3)
7	8,62	24,887	253,8	
8	9,69	27,977	285,3	
9	4,07	11,751	119,8	144,1 (34,2)
10	6,52	18,824	192,0	
<b>Клеевое соединение «металл-стекло»</b>				
1	6,19	9,157	93,4	107,95 (20,58)
2	8,12	12,012	122,5	
3	0,40*	0,591*	6,0*	—

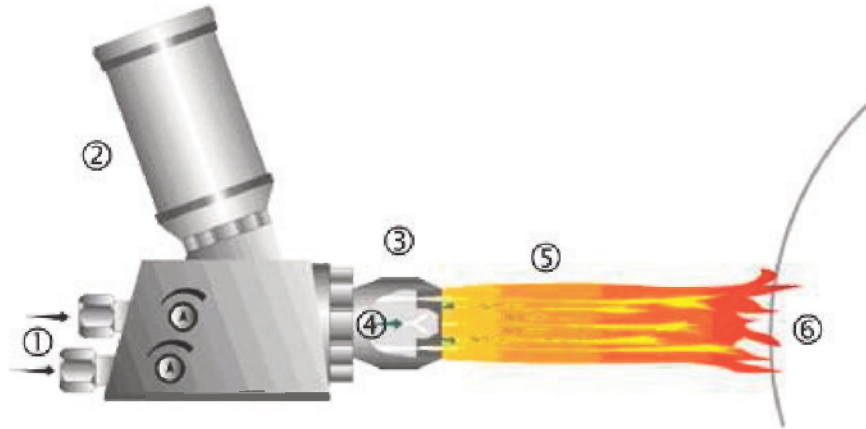


Рис. 25. Принципиальная схема пистолета: 1 – подача ацетилена и кислорода; 2 – порошковый питатель; 3 – сопло; 4 – подача порошкового материала; 5 – пламя с частицами материала; 6 – подложка

Таким образом, основные результаты по разработке технологии бездеформационного соединения оптических и конструкционных элементов аппаратуры оптико-электронных систем с использованием полимерных адгезивных композиций сводятся к следующему:

- разработан алгоритм процесса соединения оптических и конструкционных элементов с использованием полимерных композиций;
- проведены теоретические исследования влияния типа, компонентов, соотношения компонентов и других факторов на качество клеевого соединения;
- проведены исследования по подбору условий полимеризации клеевого соединения;
- определен оптимальный состав элементов клеевого соединения с учетом их влияния на прочностные свойства клеевого соединения оптических и конструкционных элементов аппаратуры оптико-электронных систем малых КА.

• **Разработки технологии газотермического нанесения функциональных электропроводных терморегулирующих покрытий на элементы конструкций РКТ, обеспечивающие в 1,5 раза сокращение цикла производства и затрат на нанесение покрытия, уменьшение массы покрытия на 15...20%.**

Для уменьшения нерегулируемых теплопритоков и обеспечения заданного диапазона температур элементов конструкций РКТ на их внешние поверхности наносят терморегулирующие покрытия [24, 25]. Теплообмен излучением (лучистый теплообмен) является основным видом теплообмена между КА

и окружающим его внеатмосферным пространством. Регулирование температуры элементов КА может осуществляться изменением оптических характеристик поверхностей, изменением величины теплоизоляции на поверхности и др. Удовлетворение жестких требований по работоспособности, надежности и долговечности рабочих элементов оборудования возможно за счет терморегулирования, снятия статического электричества, повышения износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости поверхностей путем реализации технологии газотермического напыления (ГТН) покрытий, использующих нанокomпоненты при напылении.

Целью работы является разработка технологии газотермического нанесения функциональных электропроводных терморегулирующих покрытий на элементы конструкций РКТ, обеспечивающие в 1,5 раза сокращение цикла производства и затрат на нанесение покрытия, уменьшение массы покрытия на 15...20%, повышение защищенности от статического электричества в шесть раз.

Основные задачи:

- анализ методов и технологий газотермического нанесения покрытий на элементы конструкций РКТ;
- разработка технологии нанесения многофункциональных газотермических покрытий;
- изготовление лабораторных образцов и проведение исследований основных характеристик покрытия.

Высокоскоростное газопламенное напыление – один из современных методов, позволяющих получить максимальные адгезионные и прочностные характеристики соединения (рис. 25).

Таблица 6.

№ п/п	Наименование характеристик терморегулирующего покрытия	Описание характеристик	Требования
1	Внешний вид	Характеристика, по которой оценивается равномерность нанесения покрытия, наличие дефектов, повреждений и инородных включений	Без отслоений, трещин и каких либо инородных включений.
2	Масса (привес)	Характеристика, позволяющая оценить массовые показатели изделий с применением данного покрытия. Весовые характеристики определяются до и после нанесения покрытий	<350 г/м <sup>2</sup>
3	Поверхностное электрическое сопротивление	Характеристика, позволяющая сделать вывод о сплошности и непрерывности токопроводящей поверхности объектов испытания	< 10 <sup>6</sup> Ом.
4	Оптические и терморadiационные	As – поглощательная способность солнечной радиации; En – полная нормальная степень черноты материалов и покрытий (излучательная способность)	< 0,38 > 0,9

Таблица 7.

Материал подложки	Расход суспензии, мл/мин	Расход порошка, г/мин	Расход компонентов			Дистанция напыления, мм
			Пропан, л/мин	Кислород, л/мин	Аргон, л/мин	
			ГОСТ 27578-87	ГОСТ 5583-78	ГОСТ 10157-79	
АМГ-6М	100-200	2x35	80	840	8	180

Анализ экспериментальных данных, полученных при изучении оптических свойств плазменных покрытий, позволил выделить три основных фактора, особенно влияющих на радиационные коэффициенты: дистанция напыления, мощность плазматрона и расход плазмообразующего газа. Изменения других параметров – расхода напыляемого материала, скорости, перемещения плазматрона относительно напыляемой поверхности, угла между осью струи и нормалью к поверхности и т. д. – оказывают меньшее влияние на степень черноты и коэффициент отражения.

Перечень характеристик покрытия, исследуемых в данной работе, приведен в табл. 6.

Методы исследования покрытий направлены на изучение структуры покрытия (микроструктуры) и определение требуемых свойств. В работе исследованы: внешний вид покрытия, терморadiационные характеристики, масса и поверхностное электрическое сопротивление. Измерения As (поглощательная способность солнечной радиации) проводились накладным фотометром ФМ-59, измерения En (степень черноты) проводились терморadiометром ТРМ «И».

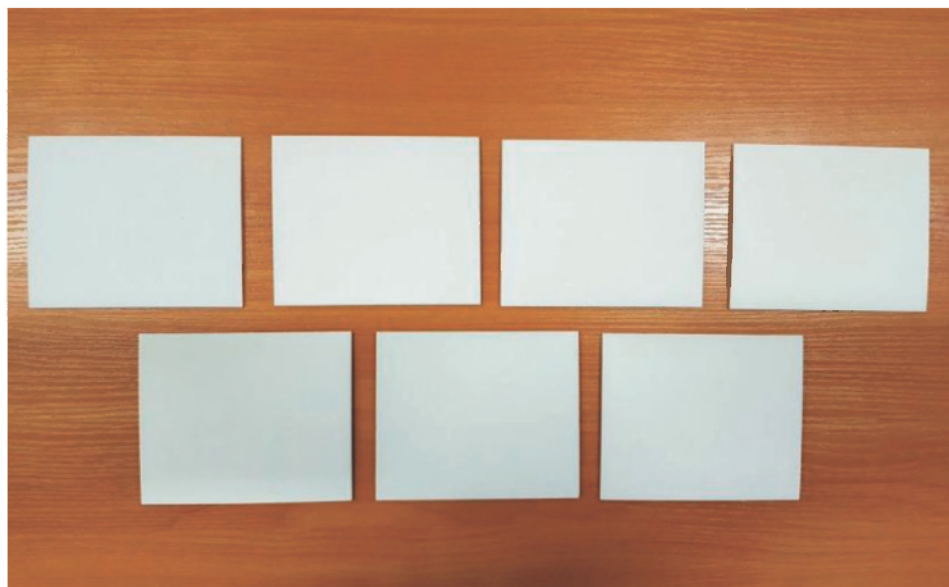


Рис. 26. Образцы с алюминиевым наноструктурированным покрытием до нанесения терморегулирующей эмали и после нанесения

Таблица 8.

№ п/п	Наименование характеристик	Требуемое значение	Полученное
1	Внешний вид терморегулирующего покрытия	Без отслоений, трещин и каких либо инородных включений	Без отслоений
2	Вес, г/м <sup>2</sup>	<350 г/м <sup>2</sup>	220-300 г/м <sup>2</sup>
3	Поверхностное электрическое сопротивление терморегулирующего покрытия	< 10 <sup>6</sup> Ом	10 <sup>5</sup> -10 <sup>4</sup> Ом (при 1-2 слоях эмали)
4	Оптические и терморadiационные характеристики терморегулирующего покрытия	As <0,38 En > 0,9	As = 0,21-0,26 En = 0,91-0,95

Для отработки технологии напыления в качестве подложки использовались образцы из алюминиевого сплава АМг-6М размером 100x100 мм при толщине не менее 1 мм. Материал напыления выбран из требований по терморегулирующим свойствам, электропроводности, низкой плотности – нанопорошок алюминия с чистотой более 95%. Покрытия наносились послойно до достижения толщины 100-150 мкм. Режимы нанесения газотермического наноструктурированного покрытия приведены в таб. 7.

На рис. 26 представлены фото образцов с алюминиевым наноструктурированным покрытием до нанесения терморегулирующей эмали и после нанесения.

Лакокрасочное покрытие служит для пассивной терморегуляции. Лакокрасочное покрытие в комплексе с алюминиевым подслоем газопламенного напыления обладает электропроводностью, что препятствует накоплению статического электричества и обеспечивая заданный режим эксплуатации. Основные результаты, полученные в ходе испытаний, представлены в табл. 8.

Результаты проведенных исследований нанесенных покрытий показали, что эксплуатационные характеристики соответствуют заявленным требованиям по всем параметрам. Для оценки нового электропроводного терморегулирующего покрытия

Таблица 9.

Параметр	ХП-5237 + ЭТ-147	Новое покрытие
Поглощательная способность $A_s$	0,40	0,25
Степень черноты $E_n$	0,85	0,94
Поверхностное электрическое сопротивление, Ом	$10^6$	$10^4$
Масса, г/м <sup>2</sup>	250-300	220-250
Цикл изготовления, ч	96	46
Затраты на расходные материалы, руб.	152900	102500

проведено сравнение его характеристик с характеристиками штатного покрытия, применяемого в конструкциях головных обтекателей. Штатное покрытие представляет собой композицию черной эмали ХП-5237 и белой эмали ЭТ-147. Сравнение основных показателей покрытия приведено в табл. 9.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для реализации поставленной задачи – технологии создания и нанесения терморегулирующих покрытий с использованием наноструктур, создано композиционное покрытие, состоящее из двух компонентов. Для обеспечения оптических характеристик ( $A_s$ ,  $E_n$ ) в процессе эксплуатации РКТ покрытие содержит лакокрасочную составляющую – терморегулирующую эмаль белого цвета, которая наносится на подложку, нанесенный газотермическим способом с использованием наноструктур;

- с помощью газопламенного напыления произведено нанесение терморегулирующего электропроводного покрытия с использованием порошка nanoалюминия на подложки из алюминиевого сплава АМг-6М;

- разработана технологическая инструкция процесса нанесения газотермического терморегулирующего покрытия с использованием наноструктур.

**• Разработки технологии создания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия.**

В настоящее время развитие твердотельной СВЧ электроники связано с освоением новых материалов и приборов с наноразмерами. Базовыми элементами для реализации монолитных интегральных схем

(МИС) СВЧ миллиметрового диапазона в настоящее время являются гетеро-структурные полевые транзисторы в системе материалов AlInAs/InGaAs, выращиваемые на подложках InP [26, 27], которые являются наиболее подходящими для рабочих частот вблизи 60 ГГц. Монолитные интегральные схемы и устройства на основе фосфида индия (InP) представляют собой весьма перспективное решение для модулей систем связи, где требуется очень высокое быстродействие и малые уровни шума [28].

Целью разработки технологии создания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия является создание МИС мощностью до 1 Вт с 1 мм затвора при частотах до 60 ГГц.

Основные требования, предъявляемые к параметрам гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия:

- диаметр подложки фосфида индия – 76,2 мм;
- концентрация носителей заряда в канале полевого транзистора (при температуре 300К) – не менее  $3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>;

- подвижность носителей заряда в канале полевого транзистора (при температуре 300К) – не менее 9000 см<sup>2</sup>/В·сек;

- фоновая концентрация носителей заряда (при температуре 300К) – не более  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>;

- плотность поверхностных дефектов – не более 200 см<sup>-2</sup>.

Структуры монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Основным достоинством метода МПЭ является возможность выращивания сверхтонких многослойных гетероструктур полупро-





Рис. 27. Установка молекулярно-пучковой эпитаксии



Рис.28. Сканирующий электронный микроскоп CamScanSeries 4-88 DV100



Рис.29. Просвечивающий электронный микроскоп Jeol JEM2100F

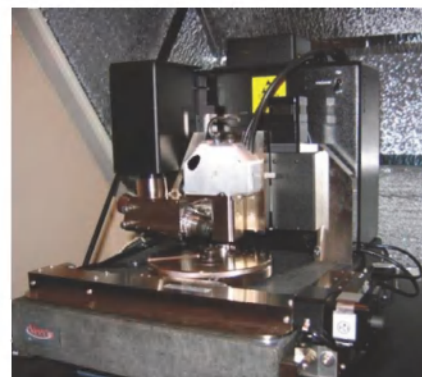


Рис.30. Установка для высокоразрешающей рентгеноструктурной дифрактометрии D8 Discover фирмы Bruker

водниковых соединений с чрезвычайно резкими профилями элементного состава и легирования. МПЭ представляет собой процесс эпитаксиального выращивания полупроводниковых кристаллов посредством взаимодействия нескольких молекулярных (атомарных) пучков на поверхности нагретой монокристаллической подложки. Для обеспечения режима молекулярного пучка процесс осуществляется в условиях сверхвысокого вакуума ( $10^{-7}$ ÷ $10^{-9}$  Па). Внешний вид и конструкция установки молекулярно-пучковой эпитаксии RIBER MBE 49 показан на рис. 27

Технология выращивания структуры полевого транзистора в системе материалов AlInAs/InGaAs достаточно сложна. Прежде всего, следует отметить, что толщины составляющих структуры слоев

измеряются нанометрами и при этом необходимо, чтобы параметры решеток слоев были одинаковы. Кроме того, гетеропереходы между слоями должны быть достаточно резкими для создания крутых потенциальных (энергетических) барьеров. Для диагностики нано-гетероструктур используется комплекс высокотехнологической аппаратуры:

- сканирующий электронный микроскоп CamScan Series 4-88 DV100, оборудованный системой регистрации спектров катодоллюминесценции (рис. 28);
- просвечивающий электронный микроскоп Jeol JEM2100F с увеличением от 50 до 1 500 000 (рис. 29);
- установка для высокоразрешающей рентгеноструктурной дифрактометрии D8 Discover фирмы Bruker (рис. 30) и др.

По спектрам фотолюминесценции можно определить энергию запрещенной зоны полупроводниковых соединений и кванто-размерных объектов, из которых состоит исследуемая структура транзистора с высокой подвижностью электронов (НЕМТ).

Для отработки методики расчета статических характеристик полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на подложках фосфида индия предложена схемная приборная структура (рис.31).

Обычно толщина канала транзистора из InGaAs измеряется долями микрона, а в нашем случае она равна  $\sim 0,01$  мкм, поэтому для расчета статических характеристик использовались двумерные расчеты в рамках дрейфодиффузионной модели. Результаты расчета показали распределение плотности тока по структуре прибора. На рис. 32 показаны плотности тока протекающие через структуру при напряжениях исток-затвор  $V_{gs} = -0,4$  В и исток-сток  $V_{ds} = 1,5$  В.

Результаты расчетов статических характеристик InPHEMT приведены на рис. 33 и 34. На рис. 33 приведена зависимость крутизны тран-

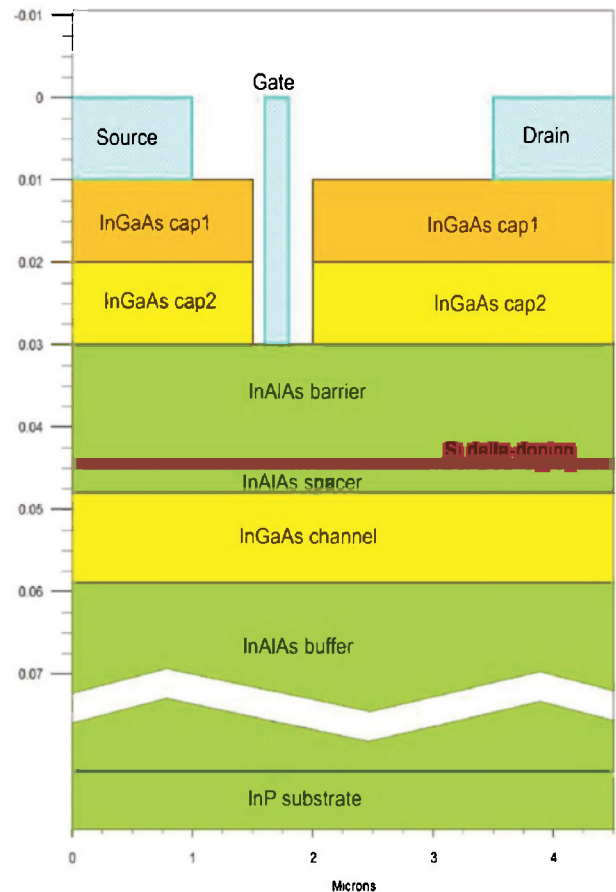


Рис. 31. Схемная приборная структура

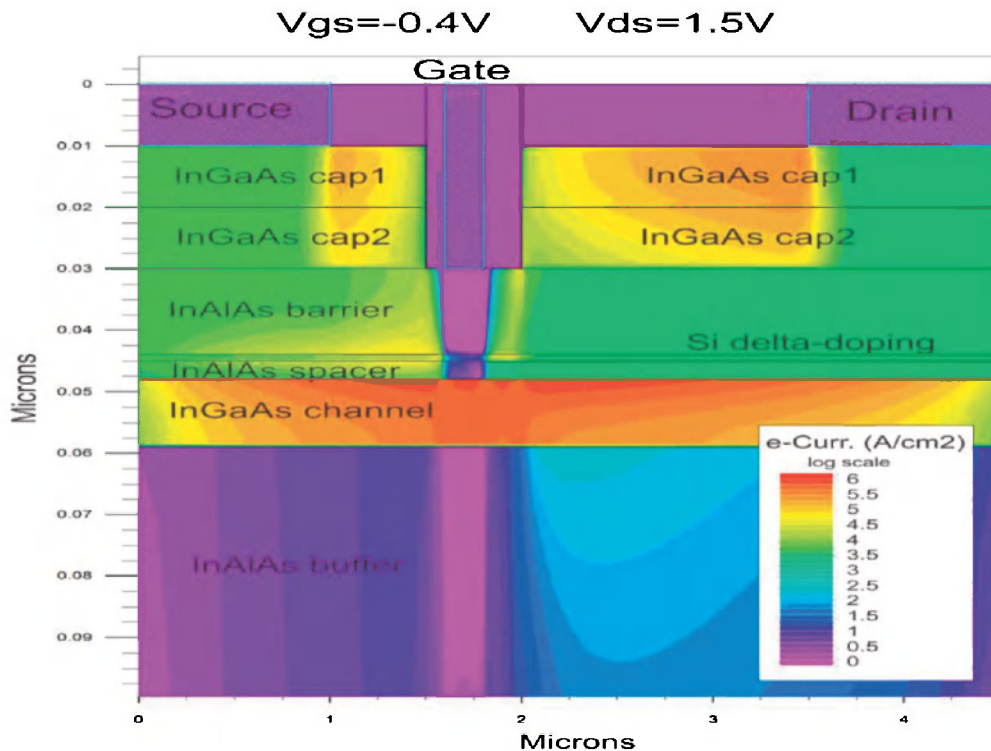


Рис. 32. Плотности тока, протекающие через структуру при напряжениях исток-затвор  $V_{gs} = -0,4$  В и исток-сток  $V_{ds} = 1,5$  В

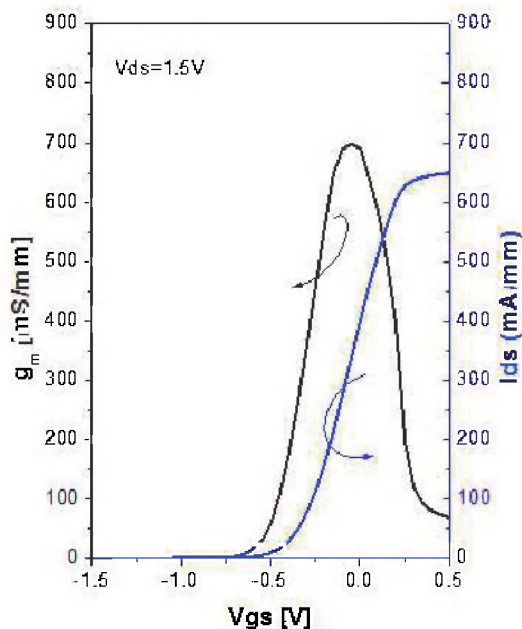


Рис. 33. Зависимость крутизны транзистора от напряжения на затворе

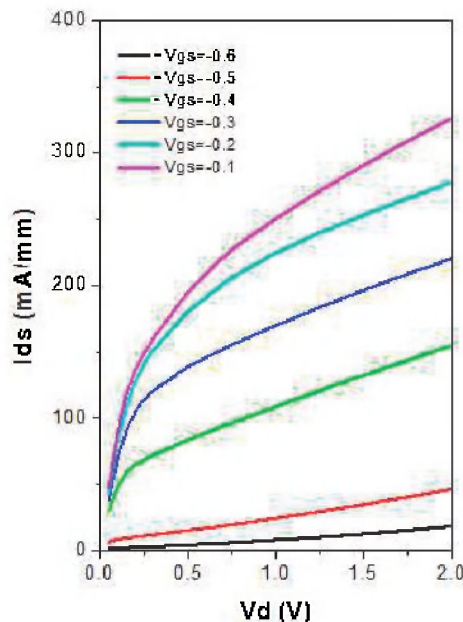


Рис. 34. Выходные вольт-амперные характеристики

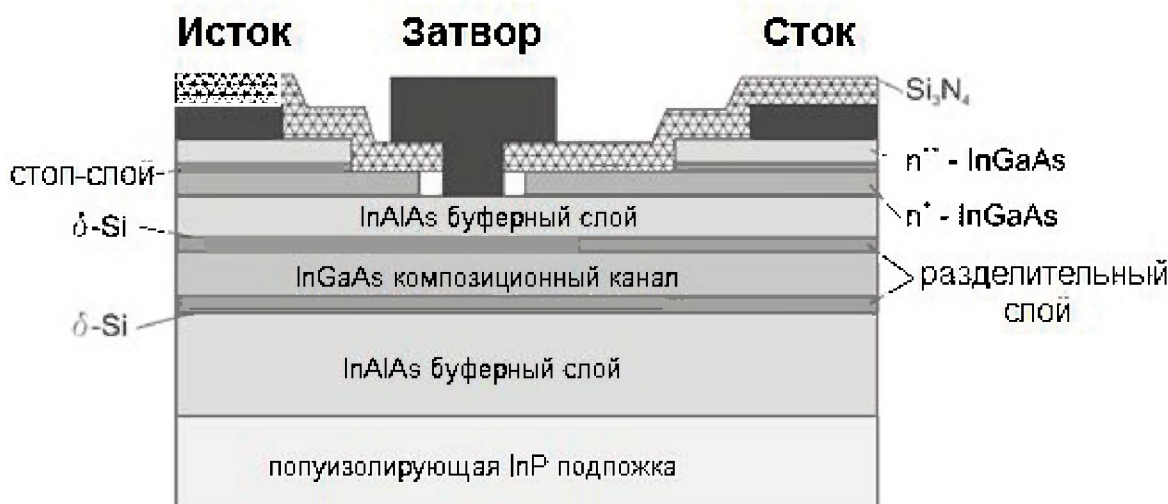


Рис. 35. Разработанная и реализованная конструкция полевого транзистора

зистора от напряжения на затворе, а на рис. 34 – выходные вольт-амперные характеристики.

Разработанная и реализованная конструкция полевого транзистора показана на рис. 35, где вскрытие канала под затвор производили с помощью стоп-слоя при травлении легированного InGaAs слоя.

Эпитаксиальная структура транзисторов выращивались на подложках полуизолирующего фосфида индия. Последовательность эпитаксиальных слоев, их толщины и материалы показаны в табл. 10.

Результаты измерений характеристик изготовленного тестового транзистора с длиной затвора 120 нм и полной шириной затвора 120 мм показаны рис. 36 и 37: вольт-амперные характеристики сток-исток при наборе напряжений на затворе (рис. 36) и зависимости удельной крутизны и плотности тока стока от напряжения на затворе (рис. 37).

Частотные зависимости параметров изготовленного тестового транзистора с длиной затвора 120 нм и шириной затвора  $4 \times 30 \text{ mm}^2$  (напряжение сток-исток 4 V, напряжение на затворе -0.3 V)

Таблица 10.

Слой	Материал	Легирование	Толщина, нм
Контактный слой	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	Si: $10^{19} \text{ cm}^{-3}$	20
Стоп-слой	$\text{InAlAs}$	нелегированный	3
Контактный слой	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	Si: $10^{17} \text{ cm}^{-3}$	15
Барьерный слой	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	нелегированный	21
Донорный слой d-Si	–	Si: $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	–
Разделительный слой (спейсер)	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	нелегированный	4
Канал часть 1	$\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$	нелегированный	12
Канал часть 2	$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	нелегированный	8
Разделительный слой (спейсер)	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	нелегированный	4
Донорный слой d-Si	–	Si: $1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	–
Буферный слой	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	нелегированный	150
Подложка InP (100), полуизолирующая			

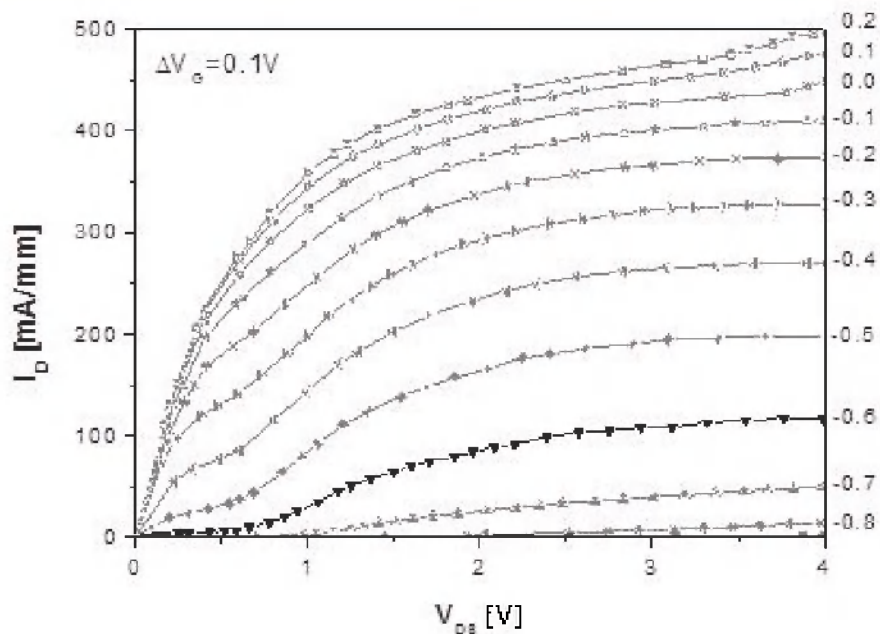


Рис. 36. Вольт-амперные характеристики сток-исток при наборе напряжений на затворе

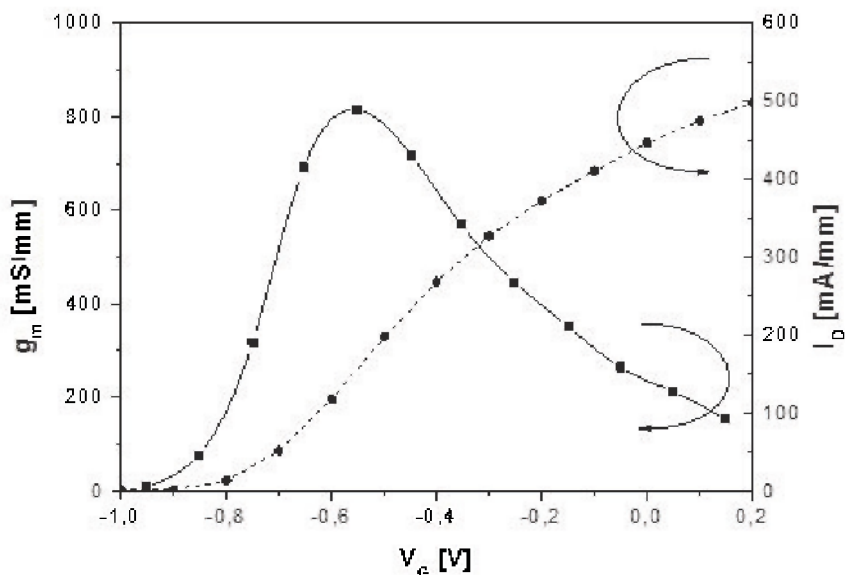


Рис. 37. Зависимость удельной крутизны и плотности тока стока от напряжения на затворе

выявили, что максимальная частота усиления по току превышает 110 ГГц.

Результаты исследований показали, что транзисторы с высокой подвижностью электронов на гетеро-структурах InAlAs/InGaAs/InP обладают улучшенными пробивными характеристиками, пробивное напряжение затвор-сток может достигать до 9В и более. Граничная частота генерации может превысить 100 ГГц. Благодаря увеличенному пробивному напряжению такие транзисторы перспективны для использования в монолитных интегральных схемах усилителей средней мощности миллиметрового диапазона.

Таким образом, в части тематики по разработке технологии создания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия были достигнуты следующие результаты:

- разработан алгоритм работы программного комплекса для расчета конструкции гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия;
- произведен выбор и обоснование исходных данных для разработки методики расчета управления зарядом в подзатворной области полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на подложках фосфида индия;
- разработана лабораторная технология выращивания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия методом молекулярно-пучковой эпитаксии;

- определены базовые требования к методикам контроля фоновой концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях, выращенных на подложках фосфида индия;

- разработана методика контроля параметров гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ диапазона на подложках фосфида индия;

- изготовлены лабораторные образцы полевых транзисторов СВЧ диапазона в интегральном исполнении на основе эпитаксиальных слоев выращенных на подложках фосфида индия и исследованы основные характеристики.

**• Разработки технологии повышения прочности поверхности оптических элементов посредством нанесения углеродных наноструктур.**

Целью исследований является разработка технологии повышения прочности поверхности оптических элементов посредством нанесения углеродных наноструктур, позволяющих сохранять неискажённую поверхность главного входного зеркала оптической системы с предельными отклонениями формы поверхности не более 0,016...0,01 мкм и допустимой шероховатости поверхности 5...10 ангстрем в условиях действия факторов космического пространства в течение 7...10 лет.

Имеются несколько методов нанесения углеродных нанопокровов на поверхность оптических элементов: плазмохимический [29], вакуумно-дуговой [30], осаждение с помощью мощных лазерных или ионных пучков [31], магнетронное распыление [32].



Рис. 38. Установка роста пластин



Рис. 39. Плоскошлифовальный станок



Рис. 40. Установка химико-механической полировки

В рамках тематики по разработке технологии повышения прочности поверхности оптических элементов, посредством нанесения углеродных наноструктур, ставились и решались следующие задачи:

- проведение лабораторных исследований оптико-механических свойств макетов оптических элементов, параметров шероховатости и отклонения формы поверхности;

- разработка и изготовление опытного образца зеркала, представляющий собой оптический элемент диаметром  $25 \pm 5$  мм, состоящий из подложки, выполненной из карбида кремния и скелетона (алмаз-карбид кремния-кремний), и нанесенной отражающей поверхности. При этом необходимо сохранить неискажённую поверхность главного входного зеркала оптической системы с предельными отклонениями формы поверхности не более  $0,01$  мкм и допустимой шероховатости 5 ангстрем;

- разработка технической документации на технологию повышения прочности поверхности оптических элементов посредством нанесения углеродных наноструктур.

Для решения поставленных задач использовался ряд высокотехнологичного оборудования – установка роста пластин (рис. 38), плоскошлифовальный станок (рис. 39), установка химико-механической полировки (рис.40).

Кроме технологического оборудования, использован комплекс контрольно-измерительного оборудования для измерений оптических параметров элементов. Для измерения шероховатости применяли высокоточный профилометр (рис. 41), а для определения качества поверхности – спектрофотометр (рис. 42) и интерферометр (рис. 43).

В ходе выполнения работ изготовлены заготовки макетов оптических элементов с упрочненной поверхностью двух видов:

- оптический элемент с отражающим покрытием из меди;
- оптический элемент с отражающим покрытием из алюминия.

В качестве подложки использовали оптическое стекло. После технологической обработки среднеквадратическая погрешность формы поверхности была в среднем 17–20 нанометров. На рис. 44 а,б приведены фотографии изготовленных зеркал с двумя отражающими покрытиями.

В рамках тематики по разработке технологии повышения прочности поверхности оптических элементов посредством нанесения углеродных наноструктур получены следующие результаты:

- разработаны чертежи и изготовлены заготовки макетов оптических элементов с упрочненной поверхностью;

- проведена экспериментальная отработка технологических режимов подготовки поверхности оптических элементов в соответствии с разработанной программой;

- проведены исследования технологических режимов подготовки поверхности оптических элементов на параметры шероховатости и на отклонение формы поверхности;

- проведены исследования дефектности структуры макетов оптических элементов ультразвуковыми и лазерно-ультразвуковыми методами контроля на начальном этапе изготовления оптических элементов;

- изготовлены макеты оптических элементов и проведены лабораторные исследования;



Рис.41. Высокоточный профилометр

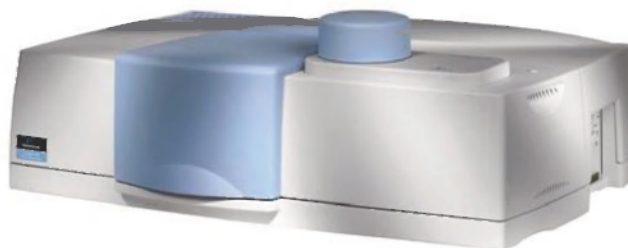


Рис. 42. Спектрофотометр



Рис. 43. Интерферометр ZygoGPI/XP для контроля качества оптических поверхностей

– сформирован алгоритм контроля оптико-механических характеристик с учетом их влияния на показатели качества оптических элементов с упрочненной поверхностью.

**В части разработки проектной документации:**

- разработана конструкторская документация сварочной установки макета стенда СТП;
- разработана техническая документация макета стенда для создания клеевого соединения оптических и конструкционных элементов аппаратуры оптико-электронных систем малых КА;
- разработаны чертежи и изготовлены заготовки

макетов оптических элементов с упрочненной поверхностью.

**В части разработки программного обеспечения и методики расчетов:**

- разработан метод расчета управления зарядом в подзатворной области полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов, выращенных на подложках фосфида индия;
- разработана программа экспериментальной отработки технологических режимов подготовки поверхности оптических элементов в целях получения заданных требований по шероховатости и отклонениям формы поверхности.

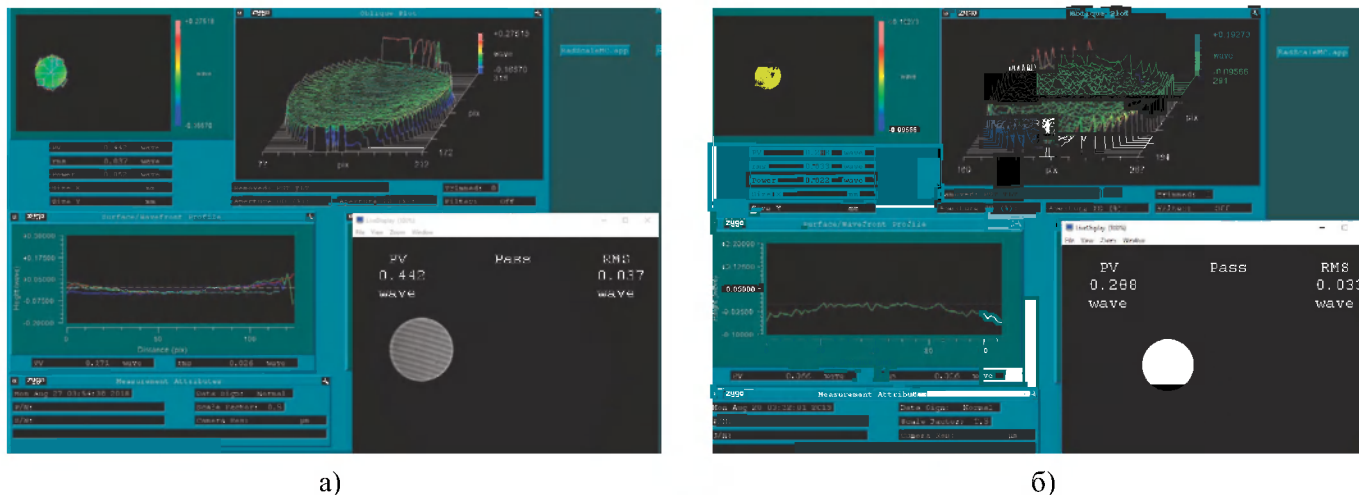


Рис. 44: а) покрытие из Cu; б) покрытие из Al

### В части изготовления (и испытаний) лабораторных моделей:

- созданы элементы лабораторной установки макета технологического стенда для литейного процесса;
- создан макет системы контроля СТП, включающего элементы контроля параметров процессов в ходе сварки;
- изготовлены элементы аппаратуры оптоэлектронных систем малых КА;
- изготовлены лабораторные образцы полевых транзисторов СВЧ диапазона в интегральном ис-

### Список литературы

1. Финдайзен Б., Фридрих Э., Калнинг И. и др. Порошковая металлургия. Спечённые и композиционные материалы. М.: Металлургия, 1983. 520 с.
2. Sirotinkin V.P., Shamrai V.F., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Sinaiskii M.A. "Phase composition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopowders prepared by plasma synthesis and heat-treated. Inorganic Materials", 2012, v. 48, № 4, pp. 342–349.
3. А.с. 1017033 (СССР) Модификатор для сталей и сплавов / Чистяков В.К., Новомейский Ю.Д., Небера Т.С. Оpubл. в Б.И. 1995.
4. Патент на изобретение №245466 (РФ) Способ модифицирования сталей и сплавов /Котов А.Н., Мысливец Е.А., Кривенко Г.Г. .Оpubл. в Б.И. 27.06.2012 г.
5. Хасбулатова З.С. Ароматические полисульфонны. // Пластические массы. 2008. № 4. С. 20–23.
6. Najmon J.C., et al. 2 – Review of additive manufacturing technologies and applications in the

полнении на основе эпитаксиальных слоев выращенных на подложках фосфида индия.

Подводя итоги, можно сказать, что работы второго этапа выполнены в соответствии с поставленными задачами и в полном объеме. Полученные результаты по всем темам свидетельствуют о том, что программное мероприятие первой научно-технической программы Союзного государства, направленное на создание новых материалов для средств космического назначения будет выполнено успешно, а сами результаты научных изысканий использованы в практических разработках РКТ.

aerospace industry. // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry. – Amsterdam: Elsevier. – 2019. – P. 7-31.

7. D.C. Harris. Infrared window and dome materials // SPIE, Washington. 1992. P. 32.

D.W. Roy. History of: Spinel Development // DARPA/ARL. Transparent Armor Workshop. Annapolis, MD. 1998.

8. Bird C. R. Ultrasonic phased array inspection technology for the evaluation of friction stir welds //Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2004. Т. 46. №. 1. p. 31–36.

9. Delrue S., Tabatabaeipour M., Hettler J., Van Den Abeele K. Applying a nonlinear, pitch-catch, ultrasonic technique for the detection of kissing bonds in friction stir welds //Ultrasonics. 2016. v. 68. p. 71–79.

10. Caravaca D. S., Bird C. R., Beamish K., Maddox S. Correlation of phased array inspection and fatigue performance of FSW joints //ASME





2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2007. p. 243–248.

11. Rathinasuriyan C., Kumar V. S. S., Shanbhag A. G. Radiography and Corrosion Analysis of Submerged Friction Stir Welding of AA6061-T6 Alloy // *Procedia Engineering*. 2014. v. 97. p. 810–818.

12. Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Гнусов С.Ф., Кудинов Ю.А. Рентгеноскопия дефектов типа стыковой линии в сварном шве, полученном методом сварки трением с перемешиванием // *Дефектоскопия*, 2015, № 9. С. 61–69.

13. Maio L. et al. Infrared thermography for monitoring heat generation in a linear friction welding process of Ti6Al4V alloy // *Infrared Physics & Technology*. 2017. v. 81. p. 325–338.

14. Serio L. M. et al. Monitoring of the friction stir welding process by means of thermography // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016. v. 31. №. 4. p. 371–383.

15. Luis S. Rosadoa, Telmo G. Santos, Moisés Piedade, Pedro M. Ramos, Pedro Vilça. Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals // *Elsevier. Measurement* 43. 2010. Pp 1021–1030.

16. Чумаевский А.В., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Тарасов С.Ю. Применение вихретокового контроля для обнаружения дефектов в сварных соединениях алюминиевого сплава Д16, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Фундаментальные исследования*, 2015, №9. С. 528–531.

17. André Lamarrel, Olivier Dupuis, Michael Moles. Complete inspection of friction stir welds in aluminum using ultrasonic and eddy current arrays. 2004.

18. Joshi V., Balasubramaniam K., Prakash R. V. Study of defects in friction stir welded AA 5083 by radiography, ultrasonic and phased array ultrasonic // *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*. 2011. С. 1–7.

19. Lohwasser D., Chen Z. (ed.). *Friction stir welding: From basics to applications*. Elsevier, 2009.

20. Левинок В.Е. Бездеформационное склеивание оптических деталей из стекла и кристаллов с металлическими элементами // *Клеи, герметики, технологии*. 2005. С.12–14.

21. David N.-S. Hon, *Analysis of Adhesives // Handbook of Adhesive Technology*. 2003. P. 295–326.

22. Поциус А.В. Клеи, адгезия, технология склеивания / Перевод с англ. под ред. Комарова Г.В. СПб: Профессия, 2007.

23. Аристов Л.И., Мишензников Г.Е., Перфилов Л.С., Серозетдинов Ю.Н. Разработка многофункционального покрытия для ракетно-космической техники – Конверсия в машиностроении. 1998, №4. С. 52–55.

24. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов: Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 542 с.

25. Peng Ding, Chen Chen, Wuchang Ding, Feng Yang, Yongbo Su, Dahai Wang, Zhi Jin. Ultrathin 20 nm-PECVD-Si3N4 surface passivation in T-shaped gate InAlAs/InGaAs InP-based HEMTs and its impact on DC and RF performance // *Solid-State Electronics*, Volume 123, September 2016, Pages 1–5.

26. A. Gutierrez-Aitken. High-Speed InP-Based Heterojunction Bipolar Transistors // *Semiconductor Science and Technology*, Volume 5, 2011, Pages 114–175.

27. Z. Hamaizia, N. Sengouga, M. Missous, M.C.E. Yagoub. A 0.4 dB noise figure wideband low-noise amplifier using a novel InGaAs/InAlAs/InP device // *Materials Science in Semiconductor Processing*, Volume 14, Issue 2, June 2011, Pages 89–93.

28. Брылкин, Ю.В. Синтез углеродных наноструктур из метана плазмохимическим способом / Ю.В. Брылкин, Г.Н. Залогин, А.В. Красильников, Н.Ф. Рудин. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2016, №8. С 76–81.

29. Колпаков, А.Я. Характеризация углеродных покрытий, полученных импульсным вакуумно-дуговым методом / А.Я. Колпаков, А.И. Поплавский, И.В. Суджанская, М.Е. Галкина, С.С. Манохина, И.Ю. Гончаров, А.Ю. Алейников, Е.Н. Бондарева. // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: математика. Физика*. 2012, №11(27). С. 145–155.

30. Струц В.К. Осаждение содержащих фуллерены углеродных покрытий с помощью мощных ионных пучков / В.К. Струц, А.В. Петров, Ю.П. Усов. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2007, №2(4). С 36–40.

31. Патент РФ на изобретение – RU2537515, МПК G02B 1/10, G02B 5/08, B64G 1/58.

## ✦ ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 629.7.14

*Вайцехович С.М., Кузин А.И., Мысливец Е.А.*

(ФГУП «НПО «Техномаш»)

### Легирование сталей аустенитно-мартенситного класса наноразмерными порошковыми модификаторами

Проведено исследование модифицирования сталей и сплавов аустенитно-мартенситного класса таблетками, состоящими из гранул ультрадисперсных и нанопорошков Ni, ZrO<sub>2</sub>, WC, Ti<sub>x</sub>(C<sub>y</sub>N<sub>z</sub>). Стали аустенитно-мартенситного класса применяются для литых высоконагруженных деталей корпусного типа и крыльчатки агрегата подачи, работающих кратковременно при температурах от минус 196°С до плюс 550°С. Разработана технология получения брикетов для модифицирования литейных сплавов. Установлен уровень оптимального давления для прессования таблеток заданного диапазона, диапазон пористости.

**Ключевые слова:** нанопорошки, лигатура, прессование, модификаторы.

В целях измельчения структуры и повышения механических свойств литых деталей в процессе приготовления сплава или при заливке в формы в жидкий металл вводят специальные добавки (модификаторы), которые обеспечивают формирование мелкокристаллического строения. Модификаторы обычно вводят в пределах сотых или десятых долей процента.

Исследованы ультрадисперсные и наноразмерные порошки, применяемые для модифицирования высокопрочных сталей аустенитно-мартенситного класса в литом состоянии. Стали применяются для литых высоконагруженных деталей корпусного типа и крыльчатки агрегата подачи, работающих кратковременно при низких и высоких температурах (от минус 196°С до плюс 550°С).

Под модифицированием понимается процесс активного регулирования первичной кристаллизации и/или изменения степени дисперсности кристаллизующихся фаз путем введения в расплав малых добавок отдельных элементов или их соединений.

Традиционно модификаторы вводят в расплав в виде лигатур. Лигатура — промежуточный сплав, содержащий в большом количестве легирующий металл, добавляемый в расплав для получения требуемого химического состава, улучшения структурных и технологических свойств

отливок и слитков. Легирование с применением лигатуры происходит более действенно, т.к. при введении компонентов в виде лигатуры их усвоение происходит проще и быстрее. Кроме того, с лигатурой можно ввести в сплав летучие вещества или окисляющиеся на воздухе компоненты, добавление которых в чистом виде невозможно.

Лигатуры классифицируются по назначению: непосредственное легирование, раскисление стали, модифицирование структур стали.

Чаще применяют комплексные лигатуры, которые направлены на решение нескольких задач, например, на одновременное легирование и раскисление.

Одним из возможных способов изготовления лигатур является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с элементами порошковой металлургии (дробление, просеивание, прессование). Процесс СВС возникает при локальном воздействии на систему коротким тепловым импульсом и в дальнейшем протекает в виде волны горения без подвода энергии извне за счет собственного тепловыделения, скорость распространения волны в среднем составляет 0,5–15 см/с. К настоящему времени данным методом синтезированы многочисленные неорганические материалы, включая наноматериалы с высокими эксплуатационными свойствами [1].



Продуктами СВС становятся соединения металлов II–VIII групп периодической системы элементов Д.И. Менделеева, а также однофазные твёрдые растворы и твёрдые сплавы. Полученный синтетический продукт СВС (например,  $ZrO_2$ , WC,  $Ti_x(C_yN_z)$ ) размалывают под прессом, просеивают через сита, смешивают в заданном соотношении с основным (матричным) химическим элементом (Ni), например, при выплавке высоколегированных сталей (ВНЛ-1, ВНЛ-1М, ВНЛ-6) и жаропрочных сплавов (ЖСЗ-ДК, ВЖЛ-14) и брикетируют (прессуют) в таблетки, которые затем вводят в тигель в расплав стали перед ее разливом по формам [2].

По механизму воздействия на процесс кристаллизации модификаторы разделяют на две группы: группа первого рода (инокуляторы) и группа второго рода (поверхностно-активные вещества) [3].

К **первой группе модификаторов** относятся тугоплавкие металлы или их соединения, вводимые в расплав в высокодисперсном состоянии, облегчающие своим присутствием образование большого числа зародышей, вокруг которых образуются и растут кристаллы.

При кристаллизации на включениях работа образования поверхности зародыша составит:

$$A = \frac{1}{3} (\sigma_{1,2} S_{1,3} + \sigma_{1,2} S_{1,2} - \sigma_{2,3} S_{2,3}), \quad (1)$$

где индексы 1 – зародыш новой фазы; 2 – метастабильная фаза; 3 – готовая поверхность раздела; S – площадь грани кристалла,  $\sigma$  – поверхностное натяжение.

Принимая  $S_{2,3} = S_{1,2}$ , получим

$$A = \frac{1}{3} \sigma_{1,2} (S_{1,2} - S_{2,3} \cos \Theta), \quad (2)$$

При положительном значении  $\cos \Theta$ , т.е. при  $0 \leq \Theta < 90^\circ$ , которое имеет место при смачивании готовой поверхности метастабильной фазой:

$$\frac{1}{3} \sigma_{1,2} (S_{1,2} - S_{2,3} \cos \Theta) < \frac{1}{3} \sigma_{1,2} S_{1,2}, \quad (3)$$

т.е.  $A_{\text{гетер}} < A_{\text{гомор}}$

Отсюда следует резкое возрастание вероятности образования центров кристаллизации.

Возможность модифицирования при химическом взаимодействии вводимых добавок с отдельными элементами кристаллизующегося вещества впервые отмечалась в монографии В.Д. Кузнецова (1953 г.). Этот механизм по существу является частным случаем модифицирования готовыми центрами, которые не вносятся, а формируются в расплаве в результате химических реакций.

Эффективность включений при гетерогенном образовании зародышей, как следует из выражения (2), определяется значением  $\cos \Theta$ . Чем больше  $\cos \Theta$ , тем меньше работа образования зародыша:

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,2}}{\sigma_{1,2}}, \quad (4)$$

где индекс 1 – зародыш новой фазы (кристалл); индекс 2 – метастабильная фаза (расплав); индекс 3 – готовая поверхность раздела (включения).

Появление адсорбционного слоя на поверхности раздела включение-расплав снижает  $\cos \Theta$  и эффективность зародышевого действия включения. Одновременно с этим адсорбция на поверхности раздела включение-зародыш и кристалл-расплав способствует повышению инокулирующего влияния включений в той мере, в которой способствует уменьшению межфазной поверхностной энергии.

Ко **второй группе модификаторов** относятся тугоплавкие соединения, которые весьма мало, но растворяются в той жидкой фазе, из которой они адсорбируются. Влияние адсорбционных слоев на скорость роста отдельных граней сводится к уменьшению размеров отдельных кристаллов, изменению их формы, вследствие избирательной адсорбции модификатора преимущественно на гранях одного типа, изменению условий срастания кристаллов. При этом скорость охлаждения должна оказывать значительное влияние на активность модификаторов [3]. Литое зерно может содержать в себе один или более дендритов, направленный рост которых собственно и способствовал его формированию, при этом граница зерна не пересекает сам дендрит, его сформировавший, а внутри зерна оси соответствующих порядков параллельны. Размер литого зерна зависит от соотношения скоростей



зарождения ( $n$ ) и роста ( $v$ ) кристаллов. Таким образом, модифицирование по существу направлено на изменение этих параметров в нужном направлении. Расстояние между осями первого порядка тем меньше, чем ниже скорость роста кристаллов и чем больше скорость зарождения центров кристаллизации.

Согласно теории кристаллизации в условиях самопроизвольного зарождения кристаллов, скорости их роста и зарождения зависят не только от переохлаждения, но и от поверхностного натяжения, а на границе расплав-кристалл и энергии активации атомов в расплаве ( $U$ )

$$n = K_1 \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \times \exp\left(-\frac{B\sigma^3}{T\Delta T^2}\right), \quad (5)$$

$$v = K_2 \exp\left(-\frac{U_1}{RT}\right) \times \exp\left(-\frac{E\sigma_1^2}{T\Delta T}\right), \quad (6)$$

где  $K_1$  – множитель пропорциональности, равный приблизительно числу атомов в рассматриваемом объеме расплава (для одной моли  $K_1 \sim 10^{23}$ );  $K_2$  – множитель пропорциональности, равный приблизительно числу атомов на поверхности рассматриваемого объема (для одной моли  $K_2 \sim 10^{16}$ );  $U$  – энергия активации атомов в расплаве;  $U_1$  – энергия активации, определяющая скорость обмена атомами между двухмерным зародышем и расплавом ( $U_1 = 0,25 \cdot U$ );  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе расплав-кристалл;  $\sigma_1$  – поверхностное натяжение расплава на периферии двухмерного зародыша;  $\Delta T$  – переохлаждение,  $E$  – постоянная вещества.

$$(E \cdot \sigma^2 \sim 10^{-3} \cdot B \cdot \sigma^3), \quad (7)$$

где  $B$  – постоянная вещества:

$$B = (2/k) \cdot [4 \cdot M \cdot T_0 / (\rho \cdot q)]^2, \quad (8)$$

где  $M$  и  $\rho$  – молекулярная масса и плотность вещества кристалла;  $q$  – теплота плавления одной моли вещества;  $k$  – постоянная Больцмана;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура [4].

Из приведенных уравнений следует, что увеличение скоростей зарождения и роста кристаллов возможно при уменьшении энергии активации и величины поверхностного натяжения.

Более наглядно роль поверхностного натяжения на границе расплав-кристалл видна из выра-

жений для полной работы образования зародышей ( $A_p$ ) и критического радиуса зародыша ( $r_{кр}$ )

$$A_p = \frac{B\sigma^3}{T\Delta T^2}, \quad (9)$$

$$r_{кр} = \frac{2\sigma T}{L\Delta T}. \quad (10)$$

Уравнение для расчета критического радиуса зародыша твердой фазы получено, исходя из следующих соображений.

Известно [4], чем меньше работа образования зародышей и ниже критический размер устойчивого зародыша, тем самым снижение поверхностного натяжения на границе расплав-кристалл облегчает зарождение центров кристаллизации, т.к. увеличивается скорость зарождения центров, пропорциональная показателю

$$y = \exp\left(-\frac{B\sigma^3}{T\Delta T^2}\right). \quad (11)$$

В аналогичном направлении действует повышение переохлаждения, также способствующее зарождению новых центров кристаллизации. На основе сопоставления уравнений (5) и (6) можно сделать вывод, что из двух процессов (зарождение и рост) лимитирующим является процесс зарождения центров кристаллизации. Это обусловлено тем, что в (5) переохлаждение входит со степенью равной 2 (в отличие от выражения для скорости роста, где показатель степени при переохлаждении равен 1). Поэтому для зарождения центров кристаллизации требуется значительно большее переохлаждение, чем для их роста. С учетом этого при рассмотрении модифицирования обычно наибольшее внимание уделяют увеличению скорости зарождения центров кристаллизации под действием примесей-модификаторов.

**Смешивание** металлических порошков предусматривает приготовление однородной механической смеси из металлических порошков различного химического и/или гранулометрического составов. Скорость и результат смешивания во многом определяются, формой и величиной частиц, гранулометрическим составом (общим и каждого компонента в отдельности), числом смешиваемых компонентов и соотношением их количеств, плотностями компонентов и их различием, коэффициентом трения между частицами, способностью частиц к слипанию и агрегации, степенью изменения гранулометрического состава при смешивании [5].

**Таблица 1. Масса, плотность и весовая доля наноразмерного  $Ti_x(C_yN_z)$  в одной таблетке в зависимости от пористости таблетки при содержании в 1 ед. слитка ВНЛ-1 0,03% вес. ед.  $Ti_x(C_yN_z)$**

Концентрация $Ti_x(C_yN_z)$ в составе смеси 10% $Ti_x(C_yN_z)$	Пористость НПМ, [%], $\rho_x = \rho_T \cdot (1 - \Pi_x)$ , [г/см <sup>3</sup> ]							Общее количество таблеток
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	
Масса таблетки, [г]	3,115	2,951	2,787	2,623	2,459	2,295	2,132	
Плотность таблетки, [г/см <sup>3</sup> ]	7,933	7,515	7,098	6,680	6,263	5,845	5,428	
Массовая доля $Ti_x(C_yN_z)$	0,312	0,295	0,279	0,262	0,246	0,229	0,213	
количество таблеток, содержащих 1 г. $Ti_x(C_yN_z)$ , [г]	3,2	3,4	3,6	3,8	4,1	4,4	4,7	
Варианты выбора количества таблеток для ВНЛ-1(10 кг.)	№1	1	3	4	4			12
	№2	1	2	2	2	2	2	10
	№3		2	2		2	2	2

Механическое смешивание порошковых смесей проводят с помощью мельниц (шаровых вращающихся, вибрационных, планетарных) и разнообразных смесителей. Основным плюсом данного вида смешивания является простота аппаратного оформления технологической цепочки. Эффективность смешивания и его интенсивность зависят от конструкции смесителя, определяющей скорость, траектории перемещения частиц и изменение гранулометрического состава в результате раздавливания и истирания компонентов.

Порошковую смесь развешивают по дозам для прессования таблеток – наноразмерных порошковых модификаторов (НПМ).

Для равномерного распределения таблеток НПМ в расплаве необходимо рассортировать объёмы НПМ по относительной пористости (плотности), укладываемой в диапазон солидуса-ликвидуса модифицируемого состава [6].

В качестве примера рассмотрим выбор плотности НПМ для отливки сплава ВНЛ-1 массой 10 кг.

Известно, что плотность расплава ВНЛ-1 (08X14H7МЛ) вблизи ликвидуса (1475°C) составляет  $\rho_L = 7,06$  г/см<sup>3</sup>, солидуса (1400°C) –  $\rho_C = 7,35$  г/см<sup>3</sup>. Таким образом, рабочий диапазон значений плотностей расплава ВНЛ-1 варьи-

руется от 7,06 до 7,35 г/см<sup>3</sup>, что является ориентиром для подбора соответствующих плотностей смеси модификатора состава 90% Ni+10%  $Ti_x(C_yN_z)$ .

В допустимых вариантах рабочая плотность НПМ находится в пределах граничных значений расплава ВНЛ-1 ликвидуса-солидуса. Диапазон рабочей зоны значений плотности таблеток НПМ ( $\rho_{\text{ВНЛ-1}}^{\text{НПМ}}$ ) находится в пределах:

$$7,06 \text{ г/см}^3 \geq \rho_{\text{ВНЛ-1}}^{\text{НПМ}} \geq 7,35 \text{ г/см}^3$$

Отмеченные значения разбиваем на отдельные части, кратные целому числу, например, четырём.

Прессуют первую группу таблеток НПМ с плотностью, близкой к плотности солидуса сплава ВНЛ-1, ( $\rho_L$ ),  $\rho_1 = 6,7$  г/см<sup>3</sup>, что соответствует 20% пористости НПМ.

Вторую группу таблеток НПМ пористостью 15% –  $\rho_2 = 7,1$  г/см<sup>3</sup>.

Третью группу таблеток НПМ пористостью 10% –  $\rho_3 = 7,5$  г/см<sup>3</sup>, что больше плотности солидуса расплава ВНЛ-1 ( $\rho_C = 7,35$  г/см<sup>3</sup>).

Четвёртую группу таблеток НПМ пористостью 5% –  $\rho_4 = 7,9$  г/см<sup>3</sup>.

Основа расчёта количества групп таблеток НПМ – соотношение содержания % вес. ед. модификаторов к массе расплава. Для слитков

Таблица 2. Насыпная и теоретическая плотности состава НПМ

Состав НПМ	Насыпная плотность, $\rho_{\text{нас}}$ [г/см <sup>3</sup> ] (% от теоретической)	Теоретическая плотность, $\rho_T$ [г/см <sup>3</sup> ]
90% Ni+10%Ti <sub>x</sub> C <sub>0,4</sub> N <sub>0,9</sub>	2,19 (27)	8,1111
90% Ni+10%WC	2,52 (26)	9,6923
93% Ni+7%	2,23 (27)	8,2593
90% Ni+10%TiN	2,20 (27)	8,1481

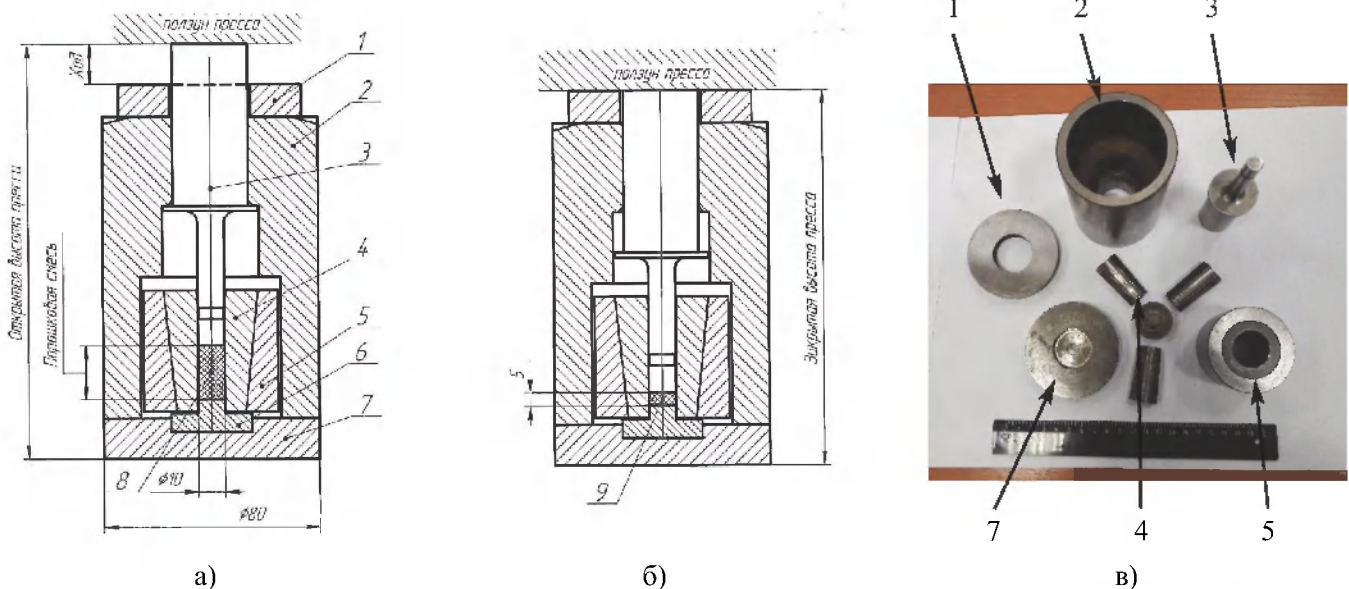


Рис. 1 а, б. Схема экспериментального блока для получения брикетов методом прессования по объёму:  
а) схема экспериментального блока, исходное положение; б) схема экспериментального блока, конечное положение; в) составные части экспериментального блока.

1 – компенсирующее кольцо, 2 – корпус, 3 – пуансон верхний, 4 – матрица разъёмная, 5 – обойма, 6 – пуансон нижний, 7 – диск опорный, 8 – засыпка порошковой смеси, 9 – отпрессованный брикет

сплава ВНЛ-1 оно составляет 0,03%. Таким образом, для 10 кг сплава ВНЛ-1 необходимо иметь 3 г НПМ – Ti<sub>x</sub>(C<sub>y</sub>N<sub>z</sub>), запрессованного в таблетки с никелевым наполнителем, состава 90% Ni+10% Ti<sub>x</sub>(C<sub>y</sub>N<sub>z</sub>). Весовое соотношение Ti<sub>x</sub>(C<sub>y</sub>N<sub>z</sub>) в расплаве ВНЛ-1 устанавливается опытным экспериментальным путём. С учётом заданного соотношения на 10 кг отливки ВНЛ-1 приходится 3 г НПМ – Ti<sub>x</sub>(C<sub>y</sub>N<sub>z</sub>). Результаты расчёта приведены в табл. 1, где представлены три варианта выбора количества таблеток для каждого варианта в отдельности.

Опорным моментом для расчёта заданной пористости брикета является нахождение насыпной плотности порошковой смеси. Методы

нахождения насыпной плотности определены ГОСТ 19440 «Порошки металлические. Определение насыпной плотности». Необходимая аппаратура – воронки, ёмкость приёма, весы. В табл.2 представлены порошковые составы НПМ, концентрации химических элементов:

Для определения пористости прессовки воспользуемся моделью элементарной ячейки. Будем считать, что связующим компонентом смеси является никель. Поместим в элементарный объём одну частицу никеля, рассчитаем количество других компонентов (карбида вольфрама, карбонитрида титана, нитрида титана, оксида циркония).

$$N_{\text{св}} = \sum \frac{\varphi_i \rho_A (R_A)^3}{\varphi_A \rho_i (R_i)^3},$$

где  $N_{\text{св}}$  – суммарное количество  $i$ -ых компонентов смеси, приходящихся на одну частицу никеля ( $Ni$ ),  $\varphi_i$ ;  $\varphi_A$  – весовые доли  $i$ -го компонента и никеля,  $R_i$ ,  $R_A$  – размер частиц  $i$ -го компонента и никеля,  $\rho_i$ ,  $\rho_A$  – плотность  $i$ -го компонента и никеля.

Расчёт проведём для порошковой смеси карбонитрида титана  $TiC_xN_y$ , размер частиц 20...200 нм, химический состав (мас. %):  $Ni = 90\%$ , никель ультрадисперсный  $> 100$  нм.;  $TiC_xN_y = 10\%$ , в том числе:  $x=0,05...0,40$ ;  $y=0,9...0,55$ ;  $O_2 1,5\%$ ;  $C 0,5\%$

$$\rho_{\Gamma}^{NiTiCN} = \frac{0,9+0,1}{\frac{0,9}{8,9} + \frac{0,1}{8,1}} = 8,35 \text{ г/см}^3.$$

С учётом наличия металлических примесей ( $< 0,5\%$ ) в составе наноразмерных порошков, которые разряжают объём прессовок, данные расчёты принимаются в качестве ориентировочных и уточняются по насыпной плотности, определяемой экспериментально.

Для компактирования брикетов применен экспериментальный блок с разъёмной трёхсекционной матрицей (рис. 1).

Экспериментальный блок содержит прессформу, состоящую из составной матрицы для прессования нанопорошков, корпуса 2, внутри которого размещены формирующие части прессформы: верхний пуансон 3, матрица 4 и нижний пуансон 6.

Разъёмная матрица 4 состоит из трех секторов, которые при сборке экспериментального блока вкладывают с натягом в обойму 5.

Матрица вместе с отформованным брикетом извлекается из обоймы, после чего матрицу раскрывают и удаляют брикет. Компенсирующее кольцо предназначено для регулирования высоты брикета.

Схема прессования ограничивает возможность стопроцентного уплотнения брикетов. Максимально возможную пористость брикета определяли экспериментальным путём, производя пошаговое уплотнение порошковой смеси с шагом 5% пористости до теоретической плотности.

Теоретическая плотность прессовки, с учётом металлических примесей ( $< 0,5\%$ ), составляет

$$\rho_{\Gamma}^{NiZrO_2} = 8,26 \text{ г/см}^3, \quad (12)$$

Плотность таблетки модификатора при заданной пористости =30% составляет:

$$\rho_{0,3} = \rho_{\Gamma} \cdot (1 - \Pi_{0,3}) = 5,78 \text{ Г/см}^3, \quad (13)$$

Масса таблетки модификатора при пористости =30% составит:

$$m_{\Gamma_{0,30}} \approx 27 \text{ г}. \quad (14)$$

Перед прессованием в шихтовую смесь в качестве пластификатора добавляем технический спирт ректификат из расчёта  $\rho_{C_2H_5OH} = 0,83 \text{ Г/см}^3$  12% от весового состава шихтовой массы  $NiZr$ . Массовая доля технического спирта определена опытным путём с учётом выпаривания спиртового состава из шихтовой смеси при смешивании, транспортировке, хранении и времени технологического цикла получения брикетов: сборки прессформы, дозирования шихты и прессования брикетов.

Таким образом, масса одной таблетки модификатора в шихтовой пульпе составит:

$$m_{\Gamma_{0,30}}^{0,12} \approx 2,498 \text{ г}. \quad (15)$$

Объём пульпы в загрузочном устройстве составляет

$$V_{\text{кон}} = 40 \text{ см}^3. \quad (16)$$

Одним из основных технологических параметров прессования является насыпная плотность – масса единицы объема порошка при свободном заполнении объема. Насыпная плотность шихтовой пульпы определялась экспериментально и для дисперсности порошков 50÷100 им составила:

$$\rho_{\text{нас}} \approx 2,23 \text{ Г/см}^3. \quad (17)$$

Объём насыпной плотности, вмещаемой в матрицу, определяем из (7) с использованием (3) и (6):

$$V_{\Gamma}^{\text{нас}} = \frac{m_{\Gamma_{0,30}}}{\rho_{\text{нас}}} = 1,02 \text{ см}^3. \quad (18)$$

Перед компактированием брикетов решается задача прессуемости порошковой смеси наномодификаторов. М.Ю. Бальнин вывел количе-

ственную зависимость плотности прессовки от давления прессования [7]:

$$\lg p = -L(\beta - 1) + \lg P_{max}; \quad (19)$$

$$\lg p = -m \lg \beta + \lg P_{max}; \quad (20)$$

$$\lg p = m \lg v + \lg P_{max}, \quad (21)$$

где  $p$  – приложенное (текущее) давление прессования;  $p_{max}$  – давление прессования, обеспечивающее получение беспористой прессовки;  $L$  и  $m$  – постоянные, учитывающие природу прессуемого материала и называемые соответственно фактором и показателем прессования;  $\beta$  и  $v$  – относительный объем и относительная плотность прессовки.

В дифференциальной форме уравнение имеет вид:

$$\frac{dp}{p} = -l d\beta, \quad (22)$$

где  $p$  – текущее давление прессования;  $\beta$  – относительный объем порошкового тела (прессовки) при давлении  $p$ ;  $l$  – фактор прессования, постоянный в некотором интервале давлений прессования.

При этом сделаны следующие допущения:

– упрочнение при пластической деформации материала частиц порошка в окрестностях контактной зоны отсутствует, т.е. контактное давление постоянно;

– закон Гука, выражающий зависимость между упругой деформацией и растягивающим или сжимающим нормальным напряжением в компактном металле, согласно которому бесконечно малое приращение деформации пропорционально бесконечно малому приращению напряжения, справедлив и для пластической деформации;

– материал частицы порошка в зоне контакта находится постоянно в напряженном состоянии, близком к одноосному сжатию;

– деформирование компактного и порошкового тела происходит идентично, что предполагает отсутствие межчастичной (структурной) деформации при уплотнении порошка.

После интегрирования (22) и замены  $l$  на  $L$  (фактор прессования при записи (22) не в натуральных,

а в десятичных логарифмах;  $L = 0,434 \times l$ ) получаем (16), которое часто называют первым (или полулогарифмическим) уравнением прессования Бальпина [7].

Фактор прессования  $L$  связан с величиной  $\sigma_k$  зависимостью

$$L = \frac{0,434K'h_k}{\sigma_k h_0}, \quad (23)$$

где  $K'$  – постоянный коэффициент;  $h_k$  – приведенная высота порошкового тела (прессовки), имеющего плотность 100 %;  $h_0$  – первоначальная высота порошкового тела.

Следовательно,  $L$  может быть постоянным только при  $\sigma_k = \text{const}$ , так как  $h_k$  и  $h_0$  для отмеренной навески порошка есть величины постоянные; на самом деле  $\sigma_k \neq \text{const}$  и растет как за счет упрочнения материала частицы порошка в процессе прессования, так и вследствие изменения схемы его напряженного состояния.

Так как (16) с постоянными коэффициентами для всего интервала давлений прессования не может корректно описывать уплотнение металлических порошков, М.Ю. Бальпин предложил в дифференциальном уравнении (22) фактор прессования  $l$  выразить в виде функции

$$l = \frac{L}{0,434} = \frac{m}{\beta}, \quad (24)$$

что после интегрирования (11), (22) приводит к (20), (21) каждое из которых принято называть вторым (или логарифмическим) уравнением прессования Бальпина.

Для идеального процесса прессования (т.е. при отсутствии внешнего трения) (6), (7) примут вид:

$$p\beta^m = p_{max} = p_k = \text{const}, \quad (25)$$

$$\frac{p}{v^m} = p_{max} = p_k = \text{const}, \quad (26)$$

где  $p_k$  – максимальное (критическое) давление прессования, соответствующее максимальному уплотнению и равное по величине давлению истечения, т.е. напряжению, при котором цилиндрический пуансон быстро погружается в испытываемый металлический образец; численность – твердость материала при максимальной степени его упрочнения [5].



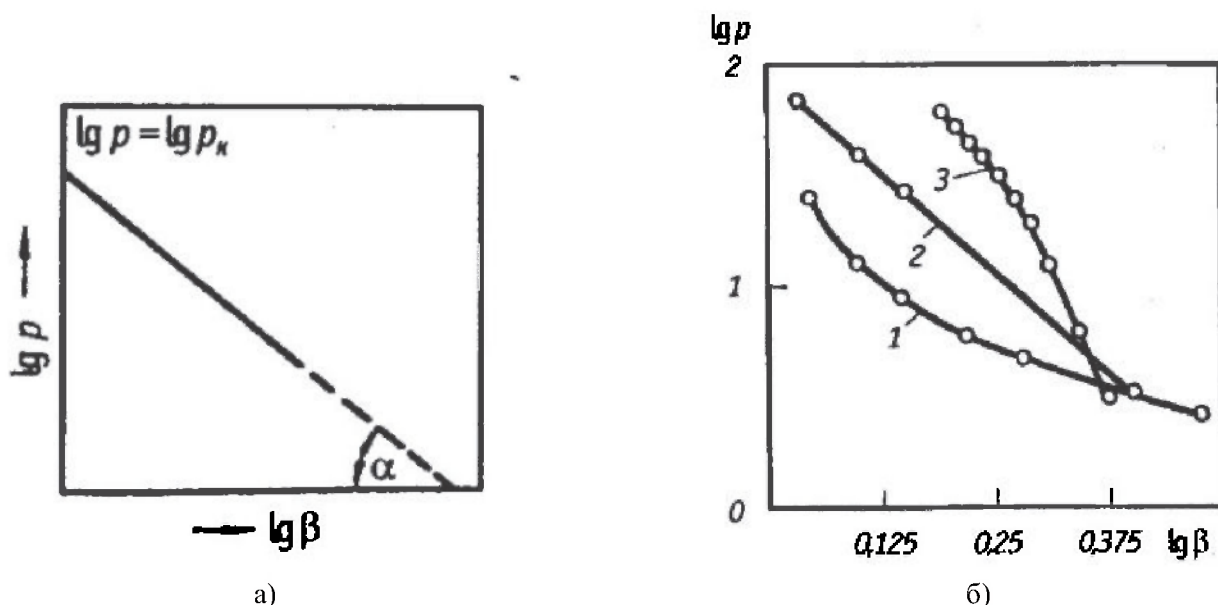


Рис. 3. Логарифмические диаграммы прессования порошков: а) логарифмическая прямая прессования ( $\sigma_k = p_k$ ); б) логарифмические диаграммы прессования порошков: 1 – олова, 2 – меди 3 – вольфрама

Показатель прессования  $m$  характеризует свойства порошка и может быть определен опытным путем или рассчитан по формуле

$$m = 2 + \nu/\Delta\nu, \quad (27)$$

где  $\Delta\nu = \nu - \nu_0$ , а  $\nu_0$  – относительная плотность исходного порошкового тела до приложения нагрузки к нему.

Для многих порошков величины  $m$  сохраняют примерно постоянное значение в довольно большом интервале давлений прессования. Для порошков вольфрама восстановленного и некоторых других показатель прессования  $m$  изменяется, возрастая с увеличением насыпной плотности порошка и твердости исходного материала его частиц. Для любых металлических порошков  $m \geq 3$  для анализа поведения порошков при прессовании наиболее приемлемо (17), вывод которого может быть обоснован различными способами.

В графической форме при  $\sigma_k = \text{const}$  (17) дает прямую линию (рис. 3 а). Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс численно равен показателю прессования  $m$ , а отрезок, отсекаемый прямой от оси ординат, равен логарифму максимального давления прессования  $p_{\text{max}}$  или в идеальном случае он равен логарифму  $p_k$  [5].

При прессовании различных порошкообразных материалов часто наблюдаются отклонения

от прямолинейной зависимости  $\lg \beta$  по  $\lg p$ . Если кривая имеет изгиб выпуклостью вниз (т.е.  $\lg p$  растет быстрее, чем это соответствовало бы прямой линии), то в процессе прессования  $\sigma_k$  не остается постоянным, а растет с повышением  $p$ ; причины роста  $\sigma_k$ : упрочнение материала в области межчастичного контакта, увеличение эффекта межчастичного трения (в связи с увеличением размеров контактных участков), тормозящего деформацию частиц при их взаимном сжатии, а также усиление объемных напряжений, накапливающихся в частицах по мере их деформации. Если кривая  $\lg \beta$  по  $\lg p$  имеет выпуклость вверх (т.е. наблюдается замедление в росте  $\lg p$ ), то это означает, что наружные слои частиц порошка оказались более твердыми, чем внутренние (из-за окисленности или по другим причинам).

На рис. 3б изображены реальные логарифмические кривые прессования порошков олова, меди и вольфрама с насыпной плотностью соответственно 1,02, 1,42 и 4,18 г/см<sup>3</sup>. Из (18) следует, что для получения беспористых прессовок необходимы давления прессования, равные наивысшему критическому  $p_k$ .

При увеличении степени уплотнения это различие уменьшается и при 100% плотности ( $\beta = 1$ ) давления для одинаковых по химическому составу порошков с различной насыпной плотностью приблизительно одинаковы и равны дав-

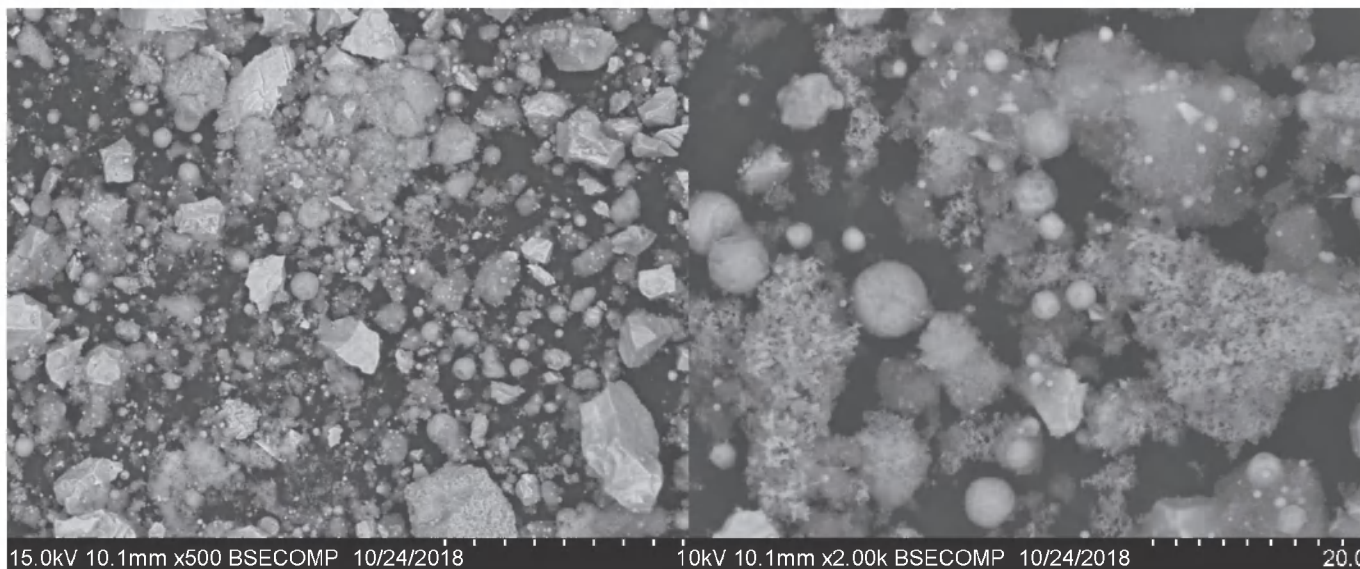


Рис. 4. Структура нанопорошка TiCN

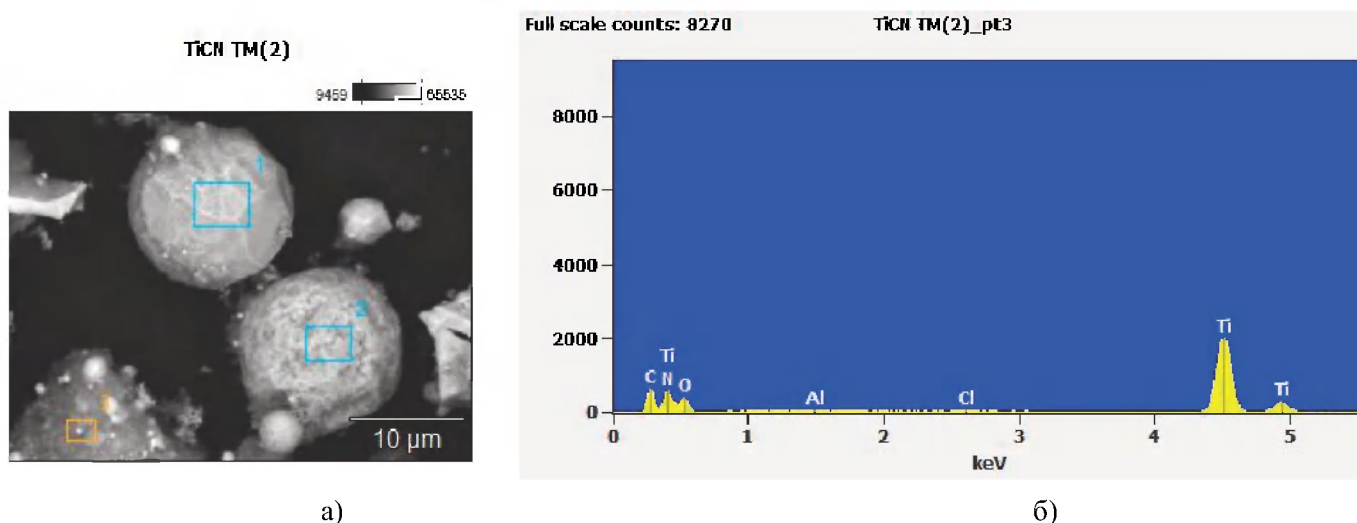


Рис. 5. Структура (а) и спектр (б) исследуемого участка порошковой пробы TiCN

лению истечения соответствующего металла. Следовательно, такие физические характеристики, как величина и форма частиц порошка, а также насыпная плотность не оказывают прямого влияния на величину рmax. Однако на прессуемость порошка физические свойства и насыпная плотность оказывают сильное влияние. Для получения прессовок заданной плотности необходимое давление увеличивается вместе с ростом дисперсности порошка.

Микроструктура таблеток модификаторов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа марки «HitachiS-3400N» фирмы «Hitachi» (Япония) при увеличениях в диапазоне от  $\times 200$  до  $\times 10000$ . Рентгеновскую съемку образцов для определения фазового состава выполняли

на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-4». Съемку выполняли в сканирующем режиме в диапазоне углов  $2\theta$  от  $10^\circ$  до  $110^\circ$ . Для анализа фазового состава использовали CuK $\alpha$  – излучение с длиной волны излучения 0.154178 нм, ускоряющее напряжение трубки 20кВ и ток 10мА. Шаг съемки  $0,1^\circ$ . Время экспозиции на одном шаге 3 с.

В качестве исходных использованы микропорошки никелевого сплава и нанопорошки модификаторов ZrO $_2$ , TiCN и WC.

На рис. 4 приведена структура нанопорошка TiCN. Из данных СЭМ можно сделать вывод о неоднородности структуры и состава данного порошка. Структура представлена частицами разной морфологии и размеров: присутствуют частицы осколочной, сферической, ограненной

Таблица 4. Химический состав в исследуемых точках

Анализируемый участок	Содержание элементов, ат.%				
	Ti	O	C	Cl	N
1	31.0		10,6		42.7
2*	77.6		13,3		41.8
3*	82.0	27,2	27,6	0,19	16.5

\* – Al- 0.15-0.19%

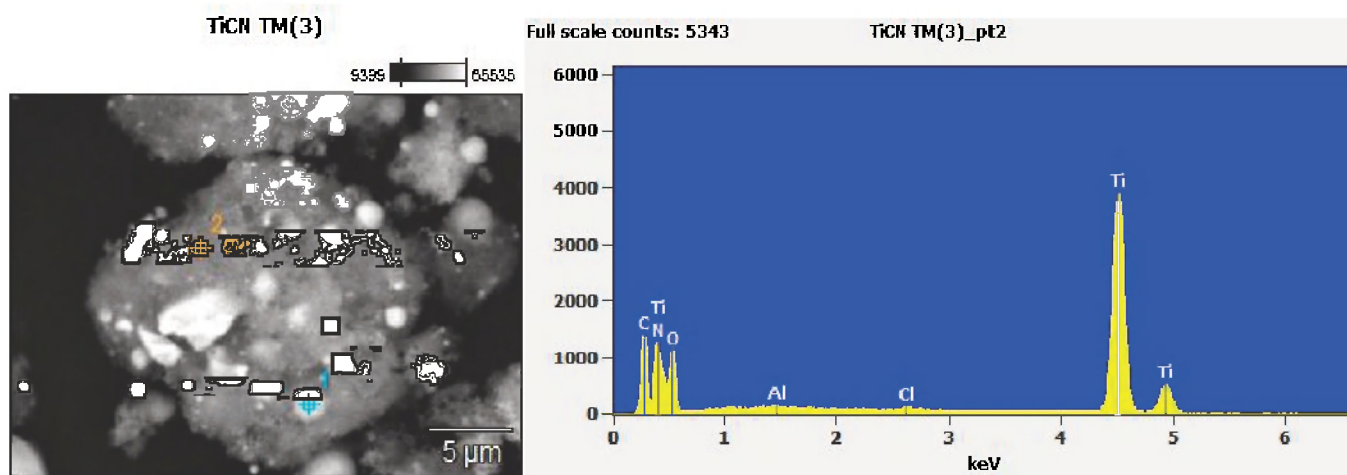


Рис. 6. Структура (а) и спектр (б) исследуемого участка порошковой пробы TiCN

Таблица 5. Химический состав в исследуемых точках

Анализируемый участок	Содержание элементов, ат.%				
	Ti	O	C	Cl	N
1	41.2		10,6		42.7
2*	21.6	30.8	22,1	0.16	41.8

форм, а также сильно разветвленной дендритной формой, что свидетельствует о химической и фазовой неоднородности.

Результаты микроанализа показали, что в порошке помимо карбонитрида титана (TiCN), светлые включения на фотографиях (рис.5, 6, табл. 4, 5) присутствуют частицы оксикарбонитрида титана (TiCNO). Однако рентгенофазовый анализ (табл. 6) не выявил фазу оксикарбонитрида титана. По-видимому, это связано с тем, что ее количество не превышает 5 % по объему. По данным РФА нанопорошок карбонитрида титана представляет собой смесь фаз: нитрида титана (50%), титана (17%), гидрида титана (12%) и карбонитрида титана (15%).

Порошковые смеси имеют бимодальное распределение по размерам, что определяется исходной структурой порошка никеля.

На рис. 8 хорошо видны два максимума: первый – при 10–12 мкм и второй – при 50 мкм для смесей с нанопорошками TiCN и ZrO<sub>2</sub>, а для смеси Ni+WC – при 70 мкм. Структура никелевого порошка характеризуется частицами двух типов: сферических и сросшихся агломератов сферических частиц, где 60% частиц имеют размер менее 10 мкм. Доля мелкой фракции увеличивается при введении нанопорошков, особенно WC.

После шести минут обработки в планетарной мельнице порошок смеси никелевого сплава

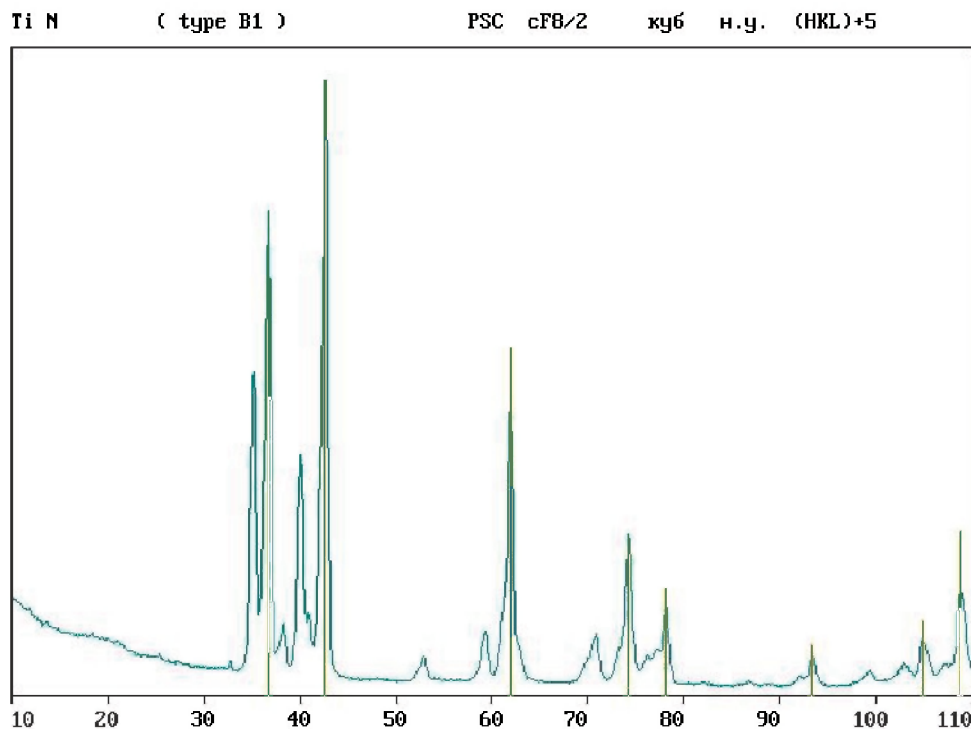


Рис. 7. Рентгенограмма нанопорошка TiCN

Таблица 6. Результаты РФА нанопорошка карбонитрида титана

Фаза	стр. тип	Об. доля, %	Вес. доля, %	Периоды, анг.
TiN (type B1)	cF8/2	50.9 ± 0.1	55.5 ± 0.1	A= 4.236
alpha-Ti (type A3)	hP2/1	18.9 ± 0.1	17.3 ± 0.1	A= 2.957 C= 4.708
TiH2 (type C1)	cF12/1	15.8 ± 0.1	12.2 ± 0.1	A= 4.412
Ti (N,C) (type B1)	cF8/2	14.4 ± 0.1	15.0 ± 0.1	A= 4.285

с добавками нанопорошков измельчается. Особенно в смесях Ni+ 10%ZrO<sub>2</sub> и Ni+10%TiCN увеличивается доля мелкой фракции размером менее 15мкм с 10% до 55-60%.

Важной технологической характеристикой для расчета прессовой оснастки является насыпная плотность порошков. Анализ структуры, насыпной плотности и грансостава никелевого порошка показывает высокую прессуемость порошка. Прессуемость порошковой смеси зависит от гранулированного состава, размера фракций. Увеличение размера фракции порошка резко сказывается на прессуемости. Тонкие, мелкие порошки пластичных металлов со средним размером частиц менее 50 мкм позволяют получать достаточно прочные прессовки с пористостью до 55% при небольших удельных давлениях (~25 Мпа), грубо зернистые порошки со сред-

ним размером частиц 250 мкм начинают спрессовываться только при давлении 80–100 МПа, причем пористость в этом случае не превышает 40%. Наибольшую плотность прессовок дают порошки смешанного гранулометрического состава с определенным соотношением крупных и мелких фракций; соотношение это определяется опытным путем. Форма частиц также влияет на прессуемость. Имеет значение «жесткость» порошка: чем мягче (пластичнее) порошок, тем при меньших давлениях он начинает прессоваться, а также будет выше прочность и плотность прессовки.

Одной из стадий получения таблеток модификаторов является процесс брикетирования, во время которого навеска порошка помещается в прессформу, после чего прикладывается давление. Под действием давления происходит уплотнение

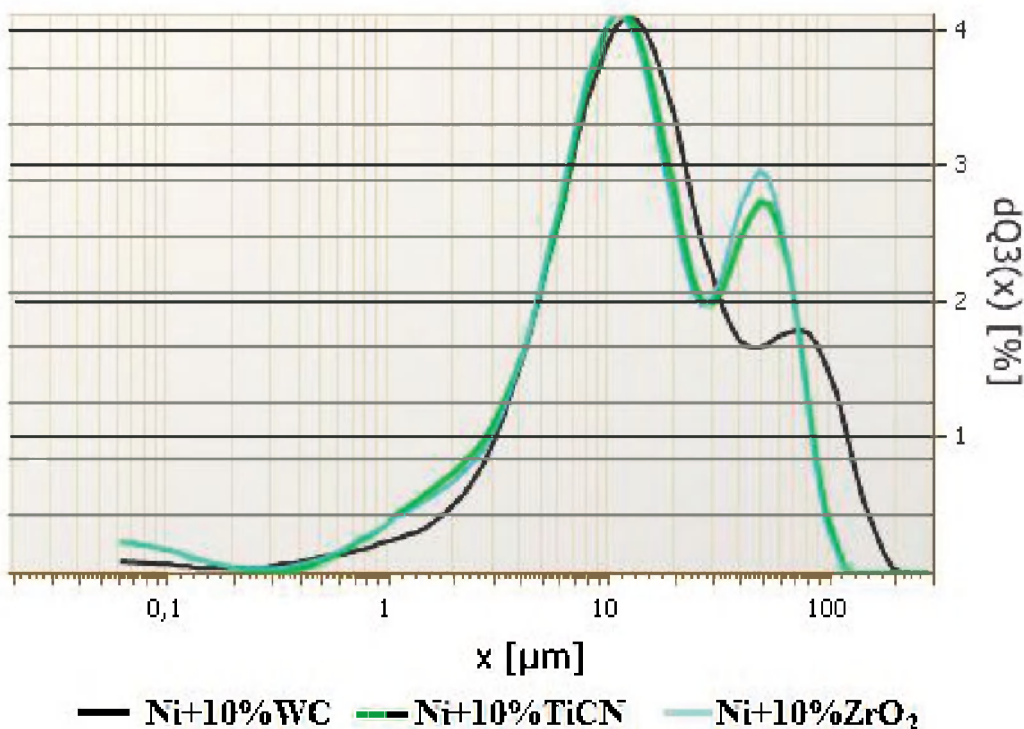


Рис. 8. Распределение частиц по размерам в исследуемых порошковых смесях на основе никеля

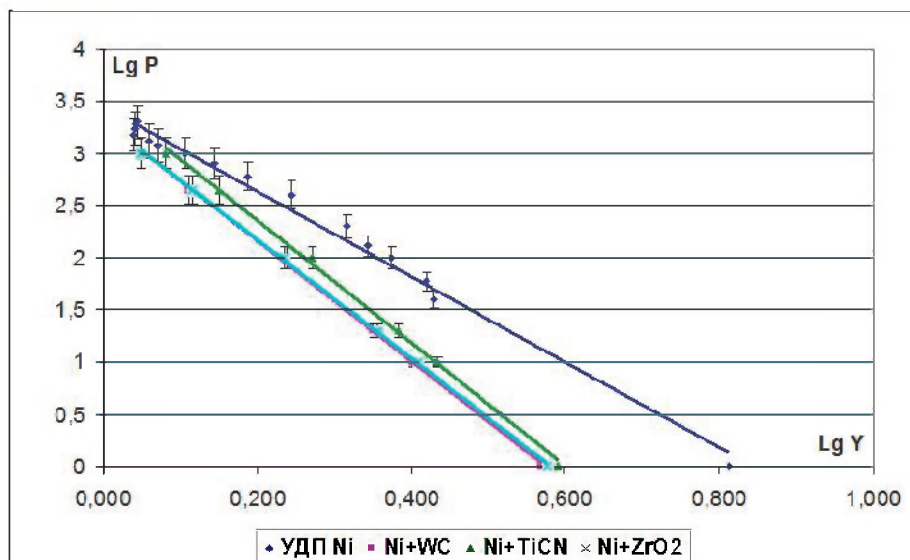


Рис. 9. Диаграммы прессования смесей ультрадисперсных и нанопорошков

порошка. Степень уплотнения определяется приложенной нагрузкой, а также свойствами самого порошка. После брикетирования таблетки имеют заданную оптимальную пористость на уровне 30–90%. Такая остаточная пористость необходима для регулирования процесса растворения-расплавления таблетки в расплаве.

По проведенным экспериментам: прессовки исходного порошка никелевого сплава хорошо

прессуются и сохраняют форму даже при давлении 150 МПа. Расслоенные трещины появляются при давлении 2000 МПа. Обработка в планетарной мельнице улучшает прессуемость за счет увеличения доли мелкой фракции, которая повышает межчастичное трение и заполняет промежутки между частицами.

Как показали исследования прессуемости смесей в брикеты на основе никеля (рис.9):



относительная плотность таблетки растет при увеличении давления прессования до 1500 МПа

### Заключение

Изучена структура ультрадисперсных и наноразмерных порошков ( $ZrO_2$ , TiCN и WC), фазовый и фракционный состав. Измерена насыпная плотность порошков: фазового состава 90% Ni + ( $ZrO_2$ , TiCN или WC) и брикетирование таблеток.

Разработана технология получения брикетов для модифицирования литейных сплавов, включающая подбор гранулированного состава компонентов модификаторов, обеспечивающих существенное изменение как получаемой структуры металла, так и морфологии фаз, что,

### Список литературы

1. Вайцехович С.М., Панов Д.В., Кривенко Г.Г. Иницирование реакции горения в технологиях самораспространяющихся высокотемпературного синтеза силового компактирования синтетической заготовки. Технология машиностроения. 2018, №4 (190). С 8–17.
2. Вайцехович С.М. и др. Теория и технология получения изделий методами СВС-баротермии на основе моделирования процессов накопления повреждений // Порошковая металлургия. 2013, №1/2. С. 3–10. ISSN 0032-4795. (<http://forum.maidanua.org/T-Імпакт-фактори-українських-наукових-журналів,2011.0337> – Powder Metallurgy and Metal Ceramics / Порошковая металлургия (Институт проблем материаловедения, Киев)).
3. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М.: Металлургия, 1986.
4. Задиранов А.Н., Кац А.М. Теоретические

и составляет 0,92. Для всех смесей величина  $P_{max}$  (рис. 8) практически одинаковая.

в конечном счете, приведет к образованию равноосной мелкозернистой структуры модифицируемого сплава, химической композиции смеси, перемешивание смеси, силовое компактирование смеси в таблетки.

Установлено, что при давлении прессования более 150 МПа и вплоть до 1500 МПа таблетки обладают достаточной прочностью, имеют относительную плотность 40–90%, что обеспечивает широкий диапазон пористости, позволяющий варьировать условиями растворения таблеток-наномодификаторов в расплаве.

основы кристаллизации металлов и сплавов: Уч. М.: МГИУ, 2008. 194 с.

5. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. В 2-х томах. Том 2. Формование и спекание. Уч. для вузов. М.: МИСиС. 2002.

6. Заявка № 2017146667(079701) от 28.12.2017. МПК В22С7/02 РФ. Способ модифицирования жаропрочных сплавов и высоколегированных сталей / Вайцехович С.М., Панов Д.В., Мысливец Е.А. и др. (Россия).

7. Патент на изобретение № 2454466 от 27.06.2012. МПК В22С7/02 РФ Способ модифицирования сталей и сплавов / Мысливец Е.А., Котов А.Н., Чепурин А.В., Денисов В.Н. и др. (Россия).

8. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. В 2-х томах. Том 2. Формование и спекание. Учебник для вузов. М.: МИСиС, 2002.

### ◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК

УДК 629.78:539.3

Бещенко В.Г., Синякова Т.И., Бочаров Ю.А.

(ФГУП «НПО «Техномаш»)

**Эффект сферодинамики – научный инструментарий  
изменения структуры металла заготовок с использованием  
бесприводного источника деформирования в технологических процессах  
изготовления нового поколения деталей агрегатов изделий РКТ**

В статье собраны и проанализированы все направления применения эффекта сферодинамики с момента его открытия; рассмотрена физика знакового признака эффекта – левирование сферодина.

**Ключевые слова:** эффект сферодинамики, датчик давления, электроды свечей зажигания, сопла камер сгорания, магнитные клапаны капилляров полива.

Эффект сферодинамики открыт инж. Бещенко-вым В.Г. в 1986 г. при выполнении работ по созданию нового поколения датчиков механических величин систем управления и контроля многоразовой космической системы «Энергия-Буран» (МКС).

Способ штамповки чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков с использованием эффекта сферодинамики и датчики абсолютного, относительного и дифференциального давлений защищены а.с. СССР и вошли в состав трёхсот принципиально новых конструкторско-технологических решений (КТР), разработанных и внедрённых при создании МКС «Энергия-Буран». Разработанная в дальнейшем гамма КТР с использованием эффекта сферодинамики в области датчиковой аппаратуры изделий ракетно-космической техники (РКТ) защищена 64 а.с. СССР и патентами РФ.

В 1995–96 гг. сферодинамика как новое направление в области физики твёрдого деформированного тела, сформированное на бесприводном источнике деформирования, получила мировое признание в виде шести золотых медалей Всемирного Салона изобретателей и промышленных инноваций «Брюссель–Эврика» и Европатента в 17 странах Европы.

Внедрение эффекта сферодинамики в различных областях отечественной и зарубежной техники представлено на рис. 1, а на рис. 2, 3 – новое поколение чувствительных элементов (ЧЭ) и корпусов датчиков механических величин (давления, силы, момента инерции, угловых и линейных перемещений), изготовленных с использованием эффекта сферодинамики, который обеспечил формирование в металле



Рис. 1. Внедрение эффекта сферодинамики в различных областях отечественной и зарубежной техники



Рис. 2. Сферодиамическая штамповка подложки чувствительного элемента и чувствительные элементы датчиков давления с тензосхемой из золота



Рис. 3. Сферодиамическая штамповка корпусов датчиков момента инерции



Рис. 4. Структура металла подложки чувствительного элемента в зоне напыления тензосхемы

поверхностного слоя ЧЭ равноразмерного массива скоагулированных зёрен матричного металла (аустенитные никелевые сплавы 12Х18Н10Т, 36НХТЮ, 07Х16Н6) и равномерно распределённую мелкодисперсную упрочняющую нитридную фазу (рис. 4). Сформированное структурное состояние металла подложек ЧЭ позволило при ионно-плазменном нанесении на них функционального металла (Au) тензосхемы уменьшить вес золота в семь раз при повышении герметичности датчика в условиях переменных вибринагрузок с 27 до 97% [1].

На рис. 5 и 6 представлены датчики давления и момента инерции. На рис. 7 – новое поколение державок шлифовки алмазов, ложемент которой изготовлен с использованием эффекта. При этом в металле ложемента создавалось спиралеобразное механическое поле сжимающих межзёренных напряжений (рис. 8), которое «притягивало» образующееся в процессе обработки алмаза опасное поле растягивающих напряжений, выполняя роль релаксатора. Этот момент релаксации стано-

вится особенно актуальным, когда на финишном этапе обработки алмаз превращается в бриллиант, увеличиваясь в цене на несколько порядков.

На рис. 9 представлен матричный регулятор капиллярного полива водой в теплицах. Материал регулятора, изготовленный с использованием эффекта сферодинамики, содержит спиралеобразные массивы зёрен и обладает дифференцированными парамагнитными и ферромагнитными свойствами, что позволяет по электрическому сигналу от прибора, фиксирующего влажность почвы в зоне конкретного растения, доставлять к нему заданную программой порцию воды [2].

На рис. 10 представлен рекламный лист плазматрона, электроды которого изготовлены с использованием эффекта сферодинамики. В металле поверхностного слоя электродов сформированы спиралеобразные массивы зёрен с высокой плотностью винтовых дислокаций и спиральной кристаллографической текстурой (110) <111> (рис. 11), что обеспечивает высокую термо-





Рис. 5. Датчик абсолютного давления



Рис. 6. Датчик момента инерции



Рис. 7. Державка для ручной шлифовки алмазов с ложементом, изготовленным сферодинамической штамповкой



Рис. 8. Структура металла сферодинамической штамповки ложемента державки для ручной шлифовки алмазов

стойкость электродов и длительный срок их эксплуатации.

Последующие практические исследования знакового признака эффекта сферодинамики позволили установить новые направления его применения (рис. 12).

В объёме НИР «Сферовытяжка» эффект сферодинамики применён в целях обработки исходного листового проката и получения металла поверхности листа полуфабриката со спиралеобразным высокогерметичным волокном, который

при последующей ротационной вытяжке штамповки (типа «стакан» на стане ротационной вытяжки мод. КЖ-9901) обеспечивает необходимый уровень технологической пластичности, и получения образцов нового поколения сопел камер сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).

По сравнению с соплами, изготавливаемыми традиционным ротационным деформированием с последующей финишной механической обработкой, сопла нового поколения обладают



Рис. 9. Магнитный регулятор капиллярного полива воды



Рис. 10. Рекламный лист плазматрона, электроды которого изготовлены сферодинамической штамповкой

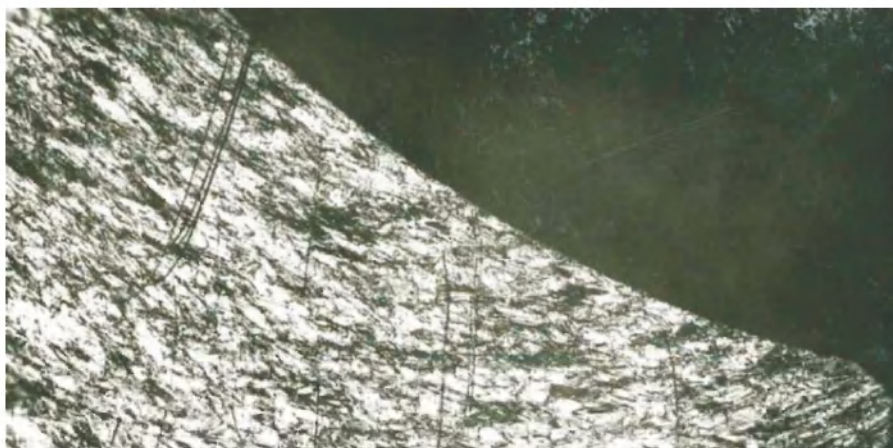


Рис. 11. Структура металла поверхностного слоя электрода плазматрона

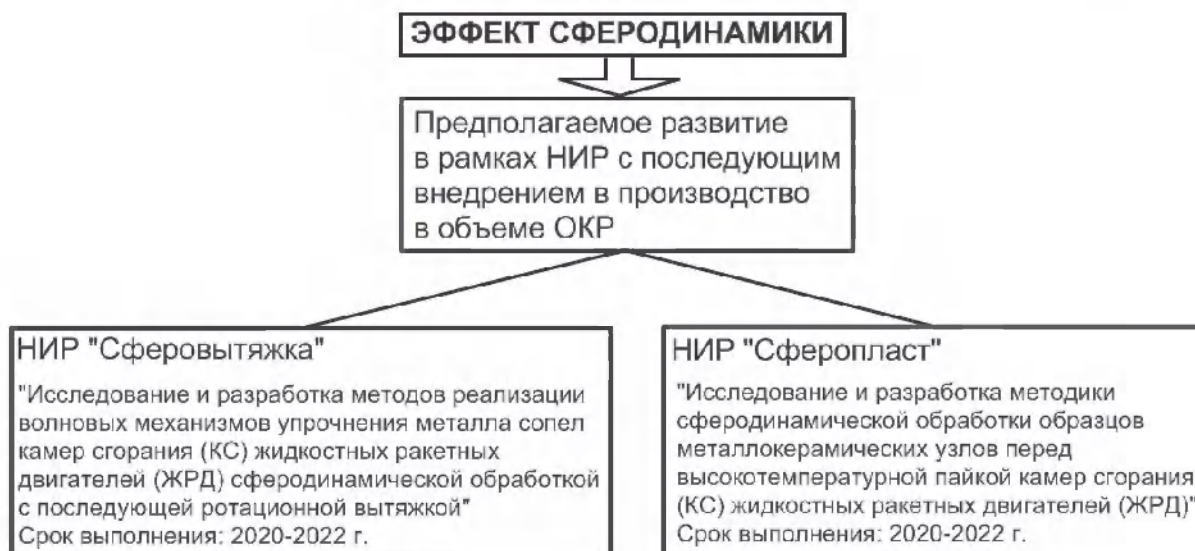


Рис. 12. Новые направления эффекта сферодинамики



Рис. 13. Полуфабрикаты сопел КС после ротационной вытяжки

повышенной прочностью на 8...10%, меньшим на 10% полётным весом и большим приближением сформированной геометрии сопла к расчётной. Это резко снижает объём финишной механической обработки сопла, а также нарушение сплошности металла при обработке режущим инструментом (рис. 13).

В объёме НИР «Сферопласт» эффект сферодинамики применён в целях обработки металлических деталей и формирования в металле поверхностного слоя высокой удельной плотности винтовых дислокаций, повышающей на порядок (в 10 раз) диффузионную активность металла к расплаву металла припоя при высокотемпературной пайке металлокерамических узлов камер сгорания (КС) ЖРД, работающих при температурах 2000°C и более (рис. 14).

Проводимые автором эффекта сферодинамики дальнейшие теоретические исследования по выявлению случаев исторической предопределённости эффекта в форме конкретных феноменов, связанных с временным спонтанным (без внешних причин) нарушением твёрдыми телами их первоначальных гравитационных условий и представленных этому научных объяснений, в очередной раз привели к разработанной А. Колмогоровым теории случайных полей, возникающих в различных локальных объёмах материальной среды и являющихся случайными процессами с многомерным временем [3], зависящих от трёх координат  $x, y, z$  (а также от времени  $t$ ), например, поля компонент давления.

Таким образом, применив известную теорию Федоровского о формировании внутреннего обобщённого времени в пластически деформируе-

мых твёрдых телах и теорию Колмогорова о возникновении случайных полей с многомерным временем в локальных объёмах материальной среды, в которых сформированы поля давления, предпримем попытку обозначить одновременное пространственно-временное расположение в сферодинамически возмущённом твёрдом теле формируемых искажений материальной среды. Необходимо обратить внимание, что теория Федоровского вводит в пространство деформируемого твёрдого тела, возмущённого приводным (активным) источником силовых импульсов, пространственно-временной континуум (ПВК) внутреннего обобщённого времени (СПК Федоровского), тогда как эффект сферодинамики реализуется при одновременном внесении в твёрдое тело возмущений от двух встречнонаправленных источников силовых импульсов: приводного (активного) пуансона и бесприводного (реактивного) сферодина. При реализации эффекта на стадии левитирования сферодина в материале деформируемого твёрдого тела пуансон и сферодина формируют три сферодинамических пространственно-временных континуума:

– сферодинамический активный ПВК (СПВК<sub>1</sub>) формируется пуансоном, перемещающим очаг деформации в материале твёрдого тела по траектории, имеющей форму логарифмической спирали Бернулли с шагом роста, соответствующим шагу роста спирали Баушингера; по физической природе (ввиду вносимого в материал твёрдого тела возмущения – приводной инструмент) СПВК<sub>1</sub> подобен ПВК Федоровского, отличаясь от него геометрическим признаком: спиральной кривизной ПВК;

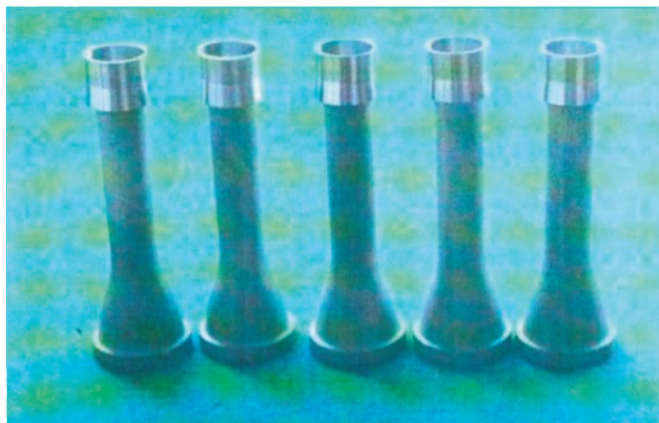


Рис. 14. Металлокерамические сопла КС ЖРД

– сферодинамический реактивный ПВК (СПВК<sub>2</sub>) формируется сферодином, перемещающим очаг деформации в материале твёрдого тела по траектории, имеющей форму логарифмической спирали Бернулли с шагом роста, соответствующим шагу роста спирали Баушингера; по физической природе (виду вносимого в материал твёрдого тела возмущения – бесприводной инструмент) принципиально отличается от СПВК<sub>1</sub>, поскольку возмущение в материал твёрдого тела вносится реакцией выталкивателя в сторону сферодина, как ответ на силовые импульсы приводного пуансона; СПВК<sub>2</sub> формируется на II-IV стадиях эффекта;

– сферодинамический реактивный ПВК (СПВК<sub>3</sub>) формируется сферодином на стадии его левитирования над выталкивателем и выполнении спонтанных затухающих ударных импульсов о поверхность твёрдого тела.

Предполагаемое одновременное расположение сферодинамических ПВК представлено на рис. 15.

В момент левитирования сферодина 3 в полуфабрикate 1 в результате одновременного встречно-направленного воздействия приводного (активного) источника возмущений – пуансона 4 и бесприводного (реактивного) ис-

### Список литературы

1. Бещеков В.Г. Теоретические и практические основы технологического обеспечения герметичных деталей агрегатов изделий ракетно-космической техники с использованием эффекта сферодинамики. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М.: 2011. 137 с.

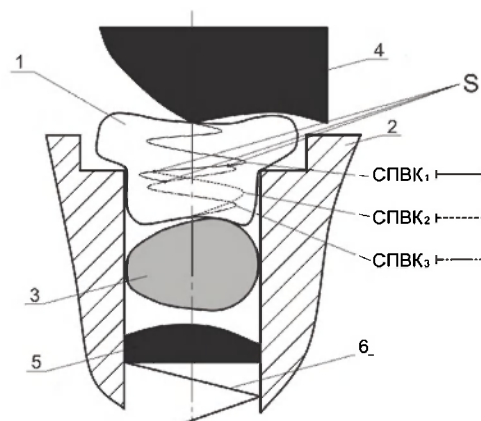


Рис.15. Схема расположения сферодинамических пространственно-временных континуумов в материале твёрдого тела при левитировании сферодина

точника возмущений – сферодина 3 происходит формирование трёх спиралеобразных сферодинамических пространственно-временных континуумов (СПВК<sub>1,2,3</sub>). Характерно, все континуумы имеют форму спирали Бернулли с одним и тем же шагом роста – шагом спирали Баушингера (ЛСБ), что соответствует шагу роста логарифмических спиралей Бернулли, по которым на начальных стадиях реализации эффекта пуансон 4 и сферодина 3 вносили возмущения в твёрдое тело. Уникальным геометрическим свойством ЛСБ на латыни обозначено так: «EADMMUTATA RESURGO», что означает – «изменённая я вновь воскресаю» – в геометрическом плане это имеет такой символ:  $-\infty$  ЛСБ  $+\infty$ , т.е. спираль бесконечна и постоянно переходит из одной в другую с тем же шагом роста; точки перехода СПВК<sub>1</sub> → СПВК<sub>2</sub> → СПВК<sub>3</sub> → СПВК<sub>1</sub> и ... ∞ точки S (рис. 15). Таким образом, в массиве деформированного твёрдого тела 1 в момент левитирования сферодина 3 создаются пространственно-временные континуумы одинаковой кривизны, обладающие памятью истории внесения возмущений в твёрдое тело.

2. Бещеков В.Г. Применение эффекта сферодинамики // Научно-технический сборник №7. НТЦ «Информтехника», 1996. С. 12–15.

2. Kolmogorow A.N. Random Field // Paris, 1935. Vol.200. P. 1717–1718.

## ◆ ЭЛЕКТРОННАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

УДК 629.7:004

*Бараев А.В., Должанский Ю.М., Дядьков К.С., Илингина А.В.,  
Картузов Н.О., Степанов В.В., Фомичёв А.О.*

(ФГУП «НПО «Техномаш»)

### **Информационные электронные паспорта на технологии и специальное оборудование, разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2019 году.**

Приведены план разработки в 2019 г. информационных электронных паспортов на технологии и специальное технологическое оборудование для машиностроительного и двигательного производств ракетно-космической промышленности и основные фрагменты паспортов, подготовленных в I-II кв. 2019 г.

**Ключевые слова:** информационный паспорт, информационное сопровождение производственных испытаний жидкостных ракетных двигателей, волноводы космических аппаратов, нанесение покрытий, фрикционная сварка, малогабаритные баки.

В продолжение оперативного информирования предприятий отрасли сведениями о новых технологиях и специальном технологическом оборудовании, разрабатываемом ФГУП «НПО «Техномаш» для машиностроительного и двигательного

производств ракетно-космической промышленности (РКП) [1-7], приведены план подготовки соответствующих электронных паспортов в 2019 г. и содержательная информация паспортов, разработанных и утвержденных в I-II кв. 2019 г.

**Таблица 1. Технологии и оборудование, планируемые к паспортизации в 2019 г.**

Название технологии (оборудования)	Срок	№№ паспорта
1. Специальное технологическое оборудование для неповоротной кольцевой приварки автоматической дуговой сваркой в среде инертных газов концевых элементов к трубопроводам сложной конфигурации из нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов	I кв.	П213/19
2. Программно-математическое обеспечение аппаратно-программного комплекса информационного сопровождения производственных испытаний пневмогидравлических систем ЖРДУ		П239/19
3. Специальное технологическое оборудование для нанесения покрытий с высокой электропроводностью на внутренние поверхности волноводных элементов сложной пространственной конфигурации		П240/19
4. Специальное технологическое оборудование для дуговой сварки в среде инертных газов с газодинамическим воздействием на сварочную ванну конструкций из сталей и алюминиевых сплавов	II кв.	П232/19
5. Специальное технологическое оборудование для пайки тонкостенных трубопроводов		П250/19

## Продолжение таблицы

Название технологии (оборудования)	Срок	№№ паспорта
6. Специальное технологическое оборудование для фрикционной сварки малогабаритных баков, узлов и агрегатов изделий ракетно-космической техники (РКТ)	II кв.	П252/19
7. Установка межоперационной и финишной очистки деталей сборочных единиц (ДСЕ) водно-моющими средствами группы «Деталан»		П253/19 «Гермес»
8. Установка очистки ДСЕ арматуры и автоматики водно-моющими средствами группы «Деталан»		П254/19 «Гермес»
9. Стенд ускоренных ресурсных испытаний силовых гироскопических комплексов космических аппаратов (КА)	III кв.	П237/19
10. Стенд автоматизированного контроля качества изготовления бескорпусных двигателей разгрузки рам карданова подвеса гирослатформ		П238/19
11. Инструмент типа «BOBBIN-TOOL» для фрикционной сварки листовых заготовок		П249/19
12. Технология электронно-лучевой сварки тепловых труб для КА		П251/19
13. Технологическое оборудование для очистки, обезжиривания и подготовки к испытаниям на герметичность корпусов изделий РКТ ампулированного исполнения	IV кв.	П255/19 «Гермес»
14. Барокомплекс для очистки, обезжиривания, подготовки к испытаниям и контроля герметичности ДСЕ изделий РКТ ампулированного исполнения		П256/19 «Гермес»

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ 239/19<sup>1</sup>

Программно-математическое обеспечение аппаратно-программного комплекса информационного сопровождения производственных испытаний пневмогидравлических систем ЖРДУ

Разработчик:

ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва 127018, Россия

Соисполнитель:

«КБХМ» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева

Богомолова ул., д. 12, г. Королёв Московской области, 141074

(изготовление элементов материальной части и сборка аппаратно-программного комплекса (АПК);

тестирование и опытная эксплуатация ПМО в составе АПК)

Разработчик и поставщик ПМО:

ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва 127018, Россия

Уровень готовности технологии (по ГОСТ 57194.1-2016) – УГТ5.

<sup>1</sup> ФГУП «НПО «Техномаш», Информационный паспорт П239/19.doc.

Общие сведения:

Аппаратно-программный комплекс (рис. 1) предназначен для информационного сопровождения испытаний пневмогидравлических систем ЖРД и позволяет:

- выбирать оптимальные параметры и характеристики процессов заправки пневмогидравлических систем (ПГС) и подготавливать ЖРДУ к запуску;
- сокращать на 20–30% объем экспериментальной отработки изделий;
- повысить энергетические характеристики изделий, в частности за счёт оптимизации расхода газа на наддув;
- снизить объём огневых испытаний, необходимых для отработки изделия.

Программно-математическое обеспечение АПК включает:

- алгоритмы и программы расчёта параметров ПГС при заправке, захолаживании и операциях предстартовой подготовки изделий;
- алгоритмы и программы расчёта параметров ПГС при работе двигателей в рабочем режиме;
- алгоритмы и программы сбора, обработки, анализа и архивирования информации о результатах испытаний.

Функциональная блок-схема разработанного ПМО в составе опытного образца АПК предприятия «КБХМ – филиала АО «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева» приведена на рис. 2:



Рис. 1. Общий вид опытного образца АПК («КБХМ» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»)



Рис. 2. Функциональная блок-схема АПК

Сведения об аналогах:

- в России: аналогов нет
- за рубежом: сведений нет

Документы, характеризующие технический уровень разработки:

- патенты:
- на изобретение: нет
- на промышленный образец: нет
- на полезную модель: нет
- «ноу-хау»: нет
- лицензии: нет
- сертификаты: нет
- другие документы (технологические процессы, технические условия и т.п.):

CD с программным обеспечением расчета параметров ПГС:

- при заправке, захлаживании и подготовке двигателя к испытаниям (ТМКБ 9.25.429.00.00.000-1);
- при работе двигателя на рабочих режимах (ТМКБ 9.25.429.00.00.000-2).
- научные публикации: нет

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ 240/19<sup>2</sup>

Специальное технологическое оборудование для нанесения покрытий с высокой электропроводностью на внутренние поверхности волноводных элементов сложной пространственной конфигурации

Разработчик:

ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва 127018, Россия

Соисполнители:

ФГБОУ ВО «МГТУ «Станкин»

(Вадковский пер., д. 1, Москва, 127055, Россия)

(изготовление опытного образца установки и предварительные испытания установки и волноводов)

АО «ВНИИХТ»

(изготовление электролита для нанесения покрытий на опытные образцы волноводов)

Изготовитель и поставщик оборудования:

ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва 127018, Россия

Уровень готовности технологии (по ГОСТ Р 57194.1 - 2016) – УГТ4

Общие сведения:

Оборудование (рис. 3, 4) разработано для нанесения специальных высоко электропроводных покрытий на основе серебра и золота на внутренние поверхности круглых и прямоугольных волноводных элементов из алюминиевых и медных сплавов сложной пространственной конфигурации антенно-фидерных устройств (АФУ) КА различного назначения



Рис. 3. Типовая рабочая камера опытного образца установки



Рис. 4. Компонировка рабочих камер в установке

Сведения об аналогах

- в России: аналогов нет
- за рубежом: сведений нет

<sup>2</sup> ФГУП «НПО «Техномаш», Информационный паспорт П240/19.doc.



Сравнительные технические характеристики:

Основные сравнительные характеристики	Разрабатываемая продукция	Аналоги	
		отечественный	зарубежный
Параметры обрабатываемых волноводных элементов:			
– круглых сечений, мм – диаметры – толщина стенки	10 1	аналогов нет	сведений об аналогах нет
– прямоугольных сечений, мм	(5,2 x 2,6) – (11,0 x 5,5)		
– длина обрабатываемых элементов, мм, не менее	500	аналогов нет	сведений об аналогах нет
– количество изгибов элементов, не менее	5		
Параметры и гарантируемые свойства покрытий:			
– толщина наносимых покрытий, мкм	3 - 30		
– шероховатость поверхности покрытий, Ra	0,63 - 2,5		
– условия эксплуатации волноводов:			
– диапазон рабочих температур, °С	– 150 - +200		
– стойкость при давлении окружающей среды, мм рт. ст.	10 <sup>-13</sup>		
Основные характеристики оборудования:			
– питание, ВxГц	220x50		
– количество нагревателей	5		
– мощность нагревателей, кВт	10		
– габаритные размеры, мм	4432 x 2289 x 948		
– температура процессов химической обработки, °С, не более	50		

Документы, характеризующие технический уровень разработки:

- патенты:
- на изобретение: нет
- на промышленный образец: нет
- на полезную модель: нет
- «ноу-хау»: нет
- лицензии: нет
- сертификаты: нет
- другие документы (технологические процессы, технические условия и т.п.):
- РКД ТМКБ.7.70.430.00.00.000,
- технические условия ТМКБ.7.70.430.00.00.000 ТУ,

- маршрутные карты технологий:
- нанесения серебра на алюминий ТМКБ.7.70.430.00.00.001 МК,
- нанесение серебра на медь ТМКБ.7.70.430.00.00.002,
- нанесения золота на алюминий ТМКБ.7.70.430.00.00.003,
- нанесения золота на медь ТМКБ.7.70.430.00.00.004

Предприятия, на которых внедрены (планируется внедрение) технологии:

Название предприятия	Год начала использования технологии	Наименование конечного изделия РКТ (РН, РБ, БРК, КА)
ФГУП «НПО «Техномаш»	2018	(опытная эксплуатация оборудования)

### ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ 250/19<sup>3</sup>

Установка УПТТ-1-19  
для пайки тонкостенных трубопроводов из коррозионностойких сталей

Разработчик и поставщик:

ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва 127018, Россия

Уровень готовности технологии (по ГОСТ Р 57194.1-2016) – УГТ9

Общие сведения:

Установка УПТТ-1-19 (рис. 5.) предназначена для пайки элементов трубопроводных систем ЖРДУ нового поколения. Установка разработана на базе установки УПТТ-1 (ФГУП «НПО «Техномаш») и использует для пайки порошковые припои типа 6АМ, 5А. Установка оснащена контроллерной системой управления и компьютерной системой сбора и обработки информации с последующей генерацией отчетности в электронном виде (в формате MS Excel) с возможностью (в соответствии с концепцией «Индустрии 4.0») интеграции системы контроля и сбора информации в единую информационную среду предприятия.



Рис. 5. Рабочее место с установкой УПТТ-1-19

<sup>3</sup> ФГУП «НПО «Техномаш», Информационный паспорт П250/19.doc.

Сведения об аналогах:

- в России: УПТ-1, ФГУП «НПО «Техномаш» (2017)
- за рубежом: сведений об аналогах нет

Технические характеристики:

Основные сравнительные характеристики	Разрабатываемая продукция	Аналоги	
		УПТ-1	зарубежный
– параметры паяемых труб, мм			
– диаметр	2 - 5	3 - 8	сведений об аналогах нет
– толщина стенок	0,2 - 1,0		
– технологические параметры пайки			
– максимальная температура нагрева зоны пайки, °С	1400	1250	
– точность регулирования температуры в зоне пайки сборочной единицы, °С	± 10	± 15	
– режим работы	кратковременный		
– режимы нагрева	автоматический / ручной		
– среда в рабочем пространстве нагревательного устройства	аргон		
– типы используемых термопар	платина-платинородий, хромель-алюмель	платина-платинородий	
– параметры установки:			
– установленная мощность, кВт	12	8,5	
– напряжение на нагревательном устройстве, В, не более	10	9,7	
– габаритные размеры, мм			
– шкафа управления	600 x 800 x 2000	600 x 800 x 2000	
– нагревательного устройства	60 x 60 x 150	60 x 60 x 150	
– масса установки, кг	420	260	
– площадь размещения комплекта оборудования, м <sup>2</sup>	0,8	0,8	

Документы, характеризующие технический уровень разработки:

– патенты: нет
– «ноу-хау»: нет
– лицензии: нет
– сертификаты: нет
– другие документы (технологические процессы, технические условия и т.п.):
Комплект КД (УПТТ-1-19.000.00.00.000) Паспорт (УПТТ-1-19.000.00.00.000 ПС) Руководство по эксплуатации (УПТТ-1-19.000.00.00.000 РЭ) Руководство по программированию (УПТТ-1-19.000.00.00.000 ИП)
– научные публикации: нет

Предприятия, на которых планируется внедрение технологии (оборудования)

Название предприятия	Год начала использования технологии	Наименование изделия, для изготовления которого используется технология	Наименование конечного изделия РКТ (РН, РБ, БРК, КА)
АО «НПО «Энергомаш»	2019	(универсальное оборудование)	

### ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ П252/19<sup>4</sup>

Специальное технологическое оборудование для фрикционной сварки малогабаритных ёмкостей, узлов и агрегатов изделий РКТ

Разработчик и поставщик:

ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва 127018, Россия

Соисполнитель:

АО «Станкотех»

Складочная ул., д.1, стр.22, Москва, 127018, Россия

(изготовление опытного образца установки, участие в приемо-сдаточных испытаниях опытного образца оборудования)

Уровень готовности технологии (по ГОСТ Р 57194.1-2016) – УГТ2

Общие сведения:

В настоящее время изготовление малогабаритных баков, узлов и агрегатов изделий РКТ производится с использованием аргоно-дуговой сварки. Указанной технологии присущи следующие недостатки:

– необходимость разделки кромок под сварку;

<sup>4</sup> ФГУП «НПО «Техномаш», Информационный паспорт П252/19.doc.



- низкая скорость сварки;
- при многопроходной сварке необходимо зачищать кромки перед каждым проходом для снижения вероятности появления дефектов;
- для защиты зоны сварочной ванны сварку необходимо проводить в закрытых помещениях.

Применение для изготовления указанных изделий фрикционной сварки, в том числе инструментом типа «Bobbin-Tool» (рис. 6), позволяет исключить указанные недостатки аргоно-дуговой сварки, а также:

- повысить прочностные характеристики сварного соединения и за счет этого снизить массу сварных конструкций;
- повысить производительность труда;
- снизить себестоимость изделий.

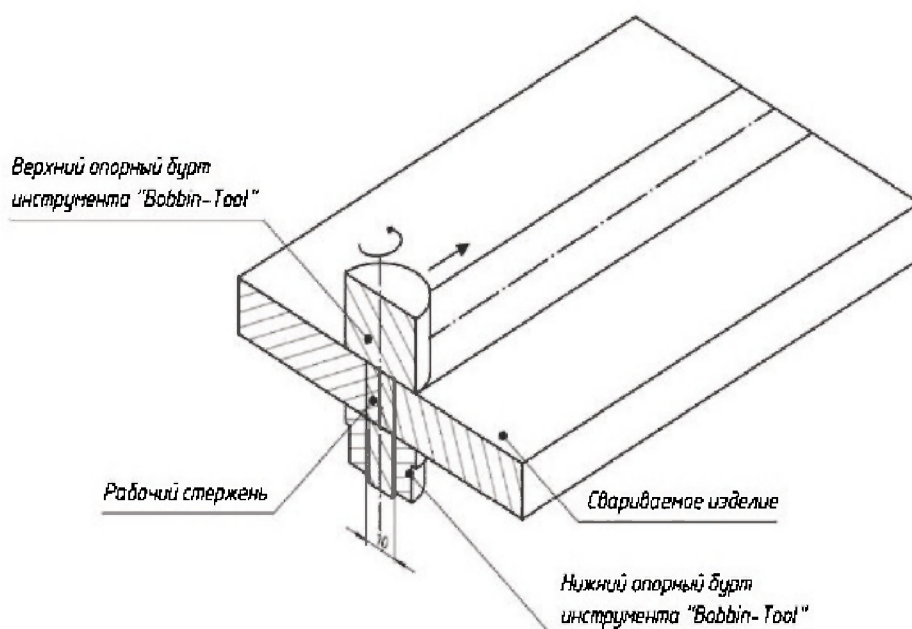


Рис. 6. Схема процесса фрикционной сварки инструментом «Bobbin-Tool»

Особенностью фрикционной сварки инструментом типа «Bobbin-Tool» является отсутствие вертикальной нагрузки на свариваемое изделие и оснастку, что позволяет исключить необходимость использования при сварке специальной жесткой технологической подкладки и снять проблему снижения качества сварки из-за непрileгания свариваемых кромок к этой подкладке.

Эскизная компоновка разрабатываемого оборудования приведена на рис. 7.

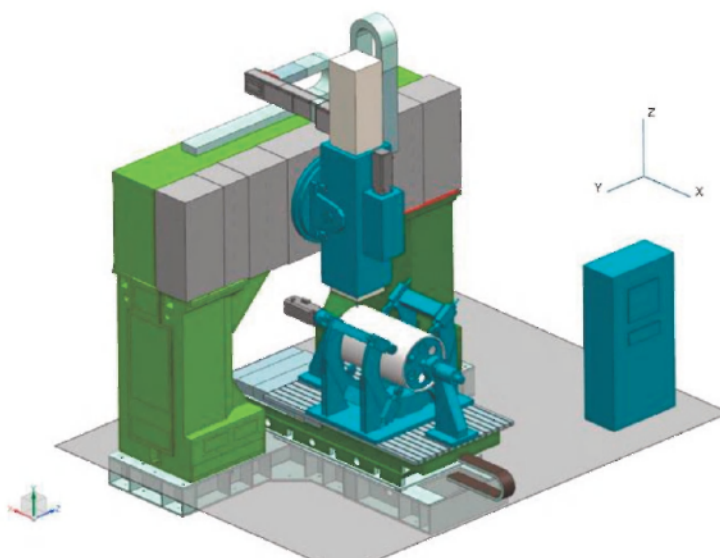


Рис. 7. 3D-компоновка комплекта оборудования (эскизный проект)

## Сведения об аналогах

- в России: нет
- за рубежом: сведений нет

## Технические характеристики:

Основные сравнительные характеристики	Разрабатываемая продукция	Аналоги	
		отечественный	зарубежный
<ul style="list-style-type: none"> <li>– габариты свариваемых изделий, мм</li> <li>– диаметр деталей (круговые и кольцевые швы)</li> <li>– длина листовых швов</li> <li>– толщина кромок</li> <li>– линейная скорость сварки, мм/мин</li> <li>– скорость вращения инструмента, об/мин</li> <li>– осевое усилие на сварочном инструменте, кгс</li> <li>– угол наклона вдоль оси сварки, град</li> <li>– предварительные габаритные размеры установки, мм</li> <li>– площадь размещения комплекта оборудования, м<sup>2</sup> (ориентировочно)</li> </ul>	300-700 400-1000 3-16 50-800 250-1500 500-9000 ± 5 4200x4500 x5000 35	аналогов нет	сведений об аналогах нет

## Документы, характеризующие технический уровень разработки:

- патенты:
  - на изобретение: нет
  - на промышленный образец: нет
  - на полезную модель: нет
- «ноу-хау»: нет
- лицензии: нет
- сертификаты: нет
- другие документы (технологические процессы, технические условия и т.п.):
- эскизный проект ТМКБ.3.24.449.00.00.000 ЭП
- научные публикации: нет

## Предприятия, на которых планируется внедрение технологии (оборудования)

Название предприятия	Год начала использования оборудования	Наименование изделия, для изготовления которого используется оборудование	Наименование конечного изделия РКТ (РН, РБ, БРК, КА)
АО «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева»	(2021)	(универсальное оборудование)	



### Список литературы

1. Бараев А.В., Должанский Ю.М. и др. Информационные паспорта на технологии и специальное технологическое оборудование машиностроительного производства РКП. // Вестник «НПО «Техномаш». Выпуск 2. 2016. С.59–64.
2. Бараев А.В., Должанский Ю.М. Электронная паспортизация специального оборудования и производственных технологий, разработанных ФГУП «НПО «Техномаш» в 2010–2015 гг. // Вестник «НПО «Техномаш». Выпуск 3. 2017. С.72–75.
3. Бараев А.В., Камалдинов А.М., Должанский Ю.М. и др. Информационные электронные паспорта на технологии и оборудование, разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2016 г. // Вестник «НПО «Техномаш». Выпуск 3. 2017. С.66–71.
4. Бараев А.В., Должанский Ю.М., Илингина А.В. Электронная паспортизация технологического и специального оборудования РКП. // Технология машиностроения. 2018. № 5. С.56–60.
5. Бараев А.В., Должанский Ю.М. и др. Информационные электронные паспорта на технологии и специальное оборудование, разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2017 г. // Вестник «НПО «Техномаш». № 6. 2018. С.76–80.
6. Бараев А.В., Должанский Ю.М., Илингина А.В. и др. Технологии и специальное оборудование, разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2018 г. // Сварочное производство. 2019. № 6. С.52–56.
7. Бараев А.В., Должанский Ю.М., Илингина А.В. и др. Информационные электронные паспорта на технологии и специальное оборудование, разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2018 г. // Технология машиностроения. 2019. № 6. С.61–68.

### ◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

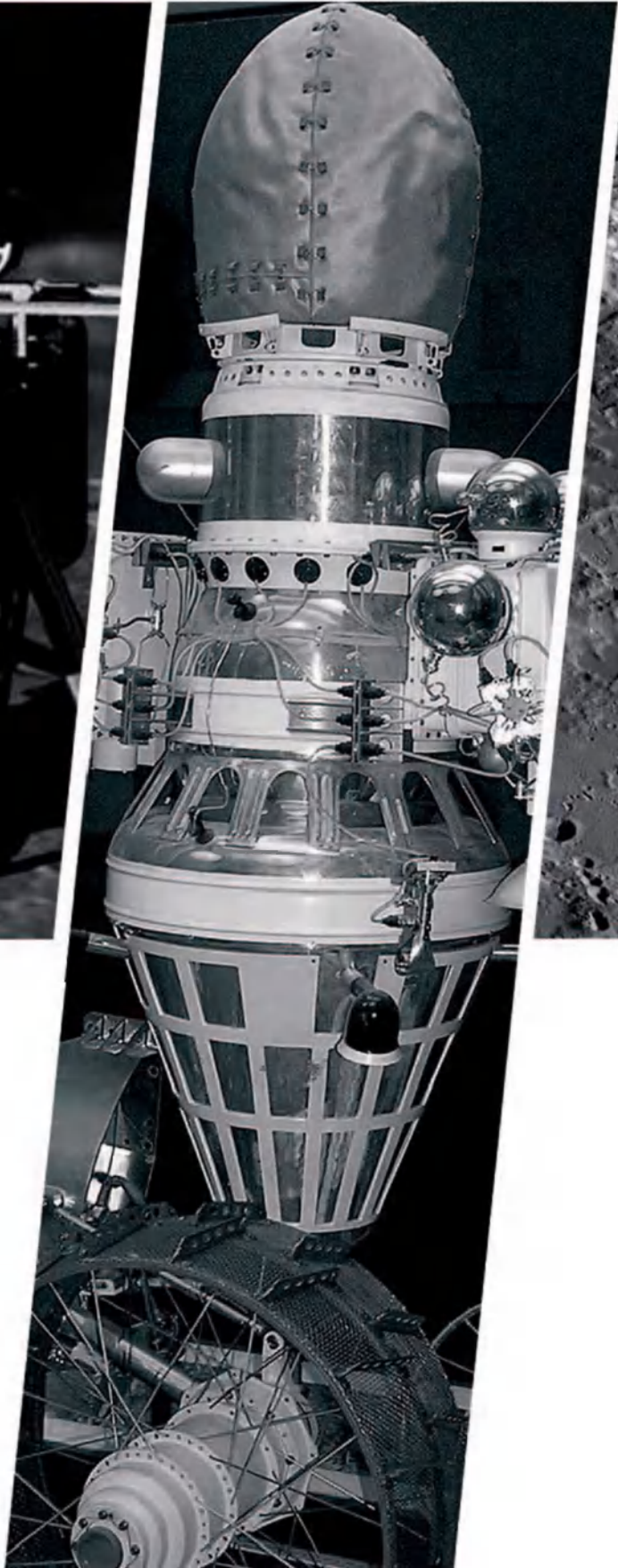
---

---









ФГУП «НПО «ТЕХНОМАШ»  
г. Москва  
3-й проезд Марьиной Рощи, д.40  
[www.tmnpro.ru](http://www.tmnpro.ru)