

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

# ВЕСТНИК «НПО «ТЕХНОМАШ»

ПОСВЯЩЕН 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ С.А. АФАНАСЬЕВА



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ  
ВЕСТНИК «НПО «ТЕХНОМАШ»

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

И.о. генерального директора: В. В. Власюк  
Первый заместитель генерального директора: И.С. Рубцов  
Заместитель генерального директора по научной работе: А. В. Бараев

*Редакционная коллегия:*

О.Д. Бакланов  
А.В. Бараев  
Д.А. Муртазин  
Д.В. Ковков  
Ю.М. Должанский  
Т.В. Наумов

*Экспертная комиссия №1:*

А.Н. Михайлов  
К.Г. Данилова

*Выпускающий редактор:*

Г.А. Аношкина

*Научный редактор:*

В.Г. Бещеков

*Верстка и дизайн:*

М.Е. Боброва  
М.М. Руслановна  
ООО «Красногорский полиграфический комбинат»

На сайте ФГУП «НПО «Техномаш» <http://www.tmnpo.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@tmnpo.ru](mailto:info@tmnpo.ru), web-site: <http://www.tmnpo.ru>

Тираж: не более 999 экз.



### ◆ УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Вы держите в руках очередной выпуск научно-технического бюллетеня «Вестник «НПО «Техномаш». Это не просто традиционный сборник научно-практических и аналитических материалов, посвящённых актуальным проблемам, решением которых занимается коллектив ФГУП «НПО «Техномаш». Этот бюллетень приурочен к выдающемуся юбилею – столетию со дня рождения первого «ракетно-космического» министра Сергея Александровича Афанасьева.

Совсем недавно Предприятию присвоено имя С.А. Афанасьева – имя выдающегося организатора, фактического создателя действующей системы управления ракетно-космической промышленностью страны, школы, говоря современным языком, менеджмента, которую в отрасли так и называют «Школа Афанасьева».

Принципы, положенные С.А. Афанасьевым в основу каждодневной работы министерства общего машиностроения СССР, позволили нашей стране не только до сих пор оставаться лидером во многих направлениях космической деятельности человечества, но и заложить мощнейший потенциал развития для следующих поколений. Я уверен, что если мы будем внимательно следовать этим принципам и относиться к своей работе столь же самоотверженно и с полной отдачей, как это делал сам С.А. Афанасьев и чего всегда требовал от своих подчинённых, то Россия продолжит демонстрировать миру выдающиеся успехи в деле освоения космического пространства и решать самые амбициозные задачи, недостатка в которых, работая на российский космос, мы никогда не испытывали.

Поздравляю вас, дорогие друзья, с замечательным юбилеем нашего первого «ракетно-космического» министра. Желаю выдающихся успехов и побед, настойчивости, вдохновения и абсолютной уверенности в собственных силах!



С уважением, О.Д. Бакланов



## СОДЕРЖАНИЕ

### ◆ 100-ЛЕТИЕ С.А. АФАНАСЬЕВА

*Панов Д.В., Ковков Д.В.*

С.А. Афанасьев и становление ракетно-космической промышленности.....4

*Чичварин В.Ф.*

Роль С.А. Афанасьева в развитии ракетно-космической отрасли.....7

*Чебаненко В.М.*

К 100-летию со дня рождения С.А. Афанасьева.....10

### ◆ ПЕРСПЕКТИВЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТРАСЛИ

*Семенов В.В., Егоров А.В., Ахмедов Ф.А., Быков А.А., Кондратенко А.А., Азуреев Л.Е., Иванов Б.С.*

Технология создания лёгких наноструктурных алюмокомпозитов  
упрочнённых Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC для корпусов РКТ.....13

*Жемердеев О.В., Кондратенко А.Н., Корнеев А.Я.*

Методика определения предельной стоимости разработки и экспертизы  
обоснований экономической целесообразности реализации инвестиционных  
проектов с государственным участием.....16

*Гапоненко О.В.*

Методический подход к формированию долгосрочных стратегических планов  
технологического развития национального аэрокосмического агентства США  
на примере технологий двигателестроения.....20

*Галкин Н.А., Чирюкин Е.В., Митин Н.Н., Свиридова Е.С.*

Оценка реализуемости космических и коммерческих программ на основе  
расчёта загрузки производственных возможностей предприятий РКП.....38

*Кузин А.И., Пырялин А.А., Серенков П.А.*

Методический подход к оценке эффективности мероприятий реконструкции  
и технического перевооружения при реализации инвестиционных проектов.....41

### ◆ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И ПАЙКИ

*Илюшкин В.Ю., Смирнов А.Г., Мучило Ф.М., Чубанов А.С., Сушко В.М.*

Внедрение дуговой сварки в инертных газах с импульсным газодинамическим  
воздействием на сварочную ванну на предприятиях РК отрасли.....45

### ◆ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ РКТ

*Бараев А.В., Илингина А.В., Стешин А.А., Жарков Д.Е., Володин Г.Г.*

Технологическая экспертиза эскизных проектов как важный этап  
научно-технического сопровождения изделий РКТ.....49

*Опальницкий А.И., Жуков В.В.*

Общие сведения о подготовке частных заключений о технологической  
готовности изделий РКК к лётным испытаниям.....51

### ◆ ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Вайцехович С.М., Бараев А.В.*

Инновационные технологии орebrения труб и разработка  
рекомендаций по совершенствованию теплообменников.....52



<i>Овечкин Л.М.</i> Совершенствование процессов интенсивной пластической деформации .....	57
<i>Ларичев Н.С.</i> Особенности затвердевания стальных крупногабаритных корпусных отливок.....	59
<i>Бецеков В.Г., Бараев А.В., Кулик В.И., Кондауров А.Е., Лесных Г.В., Захаров И.А., Бочаров Ю.А., Синякова Т.И.</i> Исследование формообразования образцов сопел камер сгорания жидкостных ракетных двигателей методами сферодинамического и ротационного деформирования .....	64
<b>◆ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ</b>	
<i>Новицкая К.А., Барышников В.И.</i> Новый взгляд на масс-спектрометрический контроль герметичности способом «накопления при атмосферном давлении» .....	67
<i>Кологов А.В., Соловьев В.Н., Тихомиров К.А., Новицкая К.А., Барышников В.И.</i> Барокамерный контроль суммарной герметичности РКТ, история и перспективы .....	71
<b>◆ КОНСТРУКТОРСКИЕ РАЗРАБОТКИ</b>	
<i>Андреев М.Д., Долгополов М.И., Корнилов В.А.</i> Технология гибки трубопроводов РКТ с применением узкозонального индукционного нагрева.....	74
<i>Андреев М.Д., Пушкарев С.А., Петров М.С., Антохин Т.А.</i> Изготовление изделий из ПКМ методами литья и компрессионного формования .....	78
<i>Матвеев Е.В.</i> Разработка эталонного измерительного комплекса статических моментов.....	86
<i>Щепетков Н.А., Макаров И.И., Кочкин Е.В.</i> Современные технические средства контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов.....	88
<i>Павлов Н.А., Бецеков В.Г.</i> Устройства и методы изготовления волноводов .....	90



## ◆ 100-ЛЕТИЕ С.А. АФАНАСЬЕВА

УДК 629.7

*Панов Д.В., Ковков Д.В.*

### С.А. Афанасьев и становление ракетно-космической промышленности

Статья посвящена выдающемуся государственному деятелю, Министру общего машиностроения СССР Сергею Александровичу Афанасьеву.

**Ключевые слова:** министерство общего машиностроения, ракетно-космическая техника, ракетно-космическая промышленность

30 августа 2018 года исполняется 100 лет со дня рождения Сергея Александровича Афанасьева, Министра общего машиностроения СССР с 1965 по 1983 гг., выдающегося советского государственного деятеля, сыгравшего огромную роль в становлении ракетно-космической техники, ракетно-космической промышленности и технологии. По инициативе ветеранов ракетно-космической промышленности и руководства ФГУП «НПО «Техномаш», поддержанной коллегией Федерального космического агентства в 2015 г., решением межведомственной комиссии города Москвы от 19 февраля 2016 г. имя Сергея Александровича Афанасьева присвоено ФГУП «НПО «Техномаш».

Министерство общего машиностроения СССР создано совместным постановлением ЦК КПСС и Совмина СССР от 2 марта 1965 г. №126-47 «Об улучшении руководства оборонными отраслями промышленности». Этой же датой Указом Президиума Верховного Совета СССР Министром общего машиностроения назначен С.А. Афанасьев, за плечами которого имелся почти двадцатилетний опыт работы по созданию ракетного вооружения в Министерстве вооружения СССР, Министерстве оборонной промышленности СССР, Совете народного хозяйства Ленинградского экономического административного района и Совете министров РСФСР. К тому времени разработка и производство ракетно-космической техники осуществлялись в 65 различных научно-исследовательских и опытно-конструкторских организациях, а серийное производство – на 120 заводах. До перехода на ракетную тематику ряд предприятий входил в состав артиллерийской, авиационной, судостроительной, радиоэлектронной и электротехнической промышленности.

Суммарные производственные мощности предприятий характеризовались следующими показателями [5, с. 346, 364]:

- 4,8 млн кв. метров производственных площадей;
- более 50 тыс. единиц металлорежущего оборудования;
- более 350 тыс. работающих;
- производственные мобилизационные мощности серийного изготовления в течение «расчётного года» на 1 января 1958 г. составляли более 5 тыс. шт. баллистических и крылатых ракет и 3 млн неуправляемых реактивных ракет и снарядов.

Кроме того, на ракетно-космическую отрасль в кооперации работало значительное количество смежников из других отраслей. Номенклатура закупаемых Министерством обороны СССР изделий включала баллистические и крылатые ракеты, зенитные ракетные комплексы, искусственные спутники Земли, космические аппараты военного назначения и средства борьбы с ними. Доля ракетной техники в общем государственном заказе Министерства обороны стремительно росла и достигла лидирующих показателей: с 8,5% в 1958 г. до 43,8% в 1961-м. Начали осуществляться крупные проекты совместно с Академией Наук СССР и другими министерствами и ведомствами по мирному использованию и освоению космоса.

По характеру применяемых производственных технологий названные изделия относились к специальной технике, требующей разработки уникальных технологий, относящихся ко многим отраслям промышленности. Уникальность связывалась с высокими требованиями к техническим параметрам по чистоте, прочности, точности, надёжности, условиям эксплуатации и другим характеристикам. Данная особенность явилась источником высоких рисков сокращения или прекращения заказов, которые угрожали неблагоприятными последствиями: утратой технологий, невосполняемыми затратами на содержание дорогостоящих основных фондов и сохранение технологических компетенций. Когда в 1990-х произошел резкий спад производства в отрасли эта специфика проявилась в полной мере.

Создание Министерства общего машиностроения, наряду с другими, созданными в 1965 г. министерствами, работающими на оборону страны, явилось результатом многолетних поисков оптимальных методов управления оборонно-промышленным комплексом СССР. Новому министерству необходимо было ликвидировать крупные недостатки и проблемы, накопившиеся в ходе предшествующих реформ: неудовлетворительное качество изделий, длительные сроки разработки новых образцов и постановки на серийное производство, большие сдвиги выполнения планов от установленных сроков, параллелизм в разработках, кадровое обеспечение, планирование и другие.

По словам С.А. Афанасьева, «министерство пришлось организовывать с нуля. Такого министерства в стране не было..., ...отрасль общего машиностроения создавалась комплексной, способной самостоятельно решать



все вопросы ракетно-космической техники от научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ до серийного изготовления на базе совершенной технологии и организации производства».

С.А. Афанасьев ставил и добивался решения задач по созданию ракетно-космической техники мирового уровня. Главным достижением в деятельности Министра стало создание отрасли с высочайшей технологией и организацией производства, уровень конкурентоспособности которой долгое время оставался самым высоким в мире. Для управления отраслью создан аппарат министерства и директорский корпус из опытейших руководителей и специалистов, прошедших все ступени профессионального роста. Важную роль играли коллегиальные формы управления, важнейшие стратегические решения принимались на коллегии и научно-техническом совете министерства. В то же время, Министр нес персональную ответственность за выполнение возложенных на министерство задач, опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы и планирование.

Большое внимание уделялось применению и развитию высокоэффективных инновационных технологий,

которых требовали разнообразие конструкций разрабатываемых изделий и их непрерывное усложнение. В период руководства С.А. Афанасьева НИТИ-40 – НИИТМ (ФГУП «НПО «Техномаш»), созданный в 1946 г., превратился в передовой научно-исследовательский технологический центр, основной задачей которого являлось технологическое обеспечение постановки на серийное производство новых видов ракетно-космической техники.

Для долгосрочного планирования и технико-экономического обоснования перспектив развития ракетно-космической техники и промышленности на базе ЦНИИмаш создана организация «Агат». Разработанные под руководством «Агата» нормативы трудоемкости и нормативные документы по оценке стоимости НИОКР и серийных изделий обеспечили создание лучшей среди других оборонных министерств системы планирования работ.

Одним из важнейших результатов деятельности Минобщемаша СССР в период руководства С.А. Афанасьева является достижение стратегического паритета американских и советских ядерных сил. В табл. 1 представлена динамика соотношения количества стратегических ракетных носителей ядерного оружия СССР и США.

**Таблица 1. Количественное соотношение стратегических ракетных носителей ядерного оружия СССР и США с 1960 по 1980 гг.**

Средство доставки/год	Соотношение СССР/США				
	1960	1965	1970	1975	1980
МБР	Единицы/20	200/865	1300/1054	1527/1054	1398/1050
БРПЛ	15/48	25/400	300/656	784/656	1028/656
Всего	20/68	225/1265	1600/1710	2311/1710	2426/1706

Источник: составлено авторами по данным <https://www.piezoelectric.ru/files/Gorish2013.pdf>

Необходимо отметить и значительные результаты по программе освоения космоса. В табл. 2 представлены показатели количества запусков ракет-носителей в период с 1960 по 1979 гг. с учётом их аварийности. Можно сде-

лать вывод, что с момента создания Министерства СССР за короткие сроки по количеству запусков космических средств и надежности ракетно-космической техники стал значительно превышать США.

**Таблица 2. Запуски ракет-носителей космического назначения в СССР и США и аварийность запусков с 1960 по 1979 гг.**

Период	СССР		США	
	всего, количество	% аварийных	всего, количество	% аварийных
1960-1964	100	24,0	239	19,7
1965-1969	339	10,9	296	6,4
1970-1979	909	4,6	273	5,9

Источник: составлено авторами по данным [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_космических\\_запусков](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_космических_запусков)

В заключение можно привести слова ветерана космонавтики России, доктора технических наук А.В. Гориша, проработавшего многие годы в Министерстве общего машиностроения СССР под руководством С.А. Афанасьева: «Обладая недюжинным умом и блестящими организаторскими способностями, он (С.А. Афанасьев) за короткое время создал передовую

высокотехнологичную многоцелевую отрасль по созданию и производству межконтинентальных ракет морского и наземного базирования, космических аппаратов и ракет-носителей различного назначения, включая многоразовую космическую систему «Энергия-Буран», орбитальных пилотируемых станций. Он также создал уникальные производственные мощности по массово-



му выпуску тракторов, трамвайных вагонов, цветных телевизоров, видеомагнитофонов, холодильников, пылесосов и другой бытовой техники. Благодаря деятельности Сергея Александровича на ответственных государственных должностях создан ракетно-ядерный щит нашей страны. С.А. Афанасьев вырастил плеяду крупных руководителей. Среди них: Б. Бальмонт, В. Догужиев, О. Бакланов, Г. Тюлин, В. Коновалов, В. Соколов, Ю. Коптев, М. Брежнев, В. Лобанов, Е. Желонов, Г. Табаков, В. Литвинов, Н. Хохлов, А. Матренин, Г. Ударов, С. Ванин, Е. Мазур, Л. Гусев, В. Сошин, А. Зубов, О. Антуфьев, В. Алавердов, В. Фролов, Б. Федченко и др. Сергей Александрович в отрасли создал настрой самоотверженности, который до сих пор сохраняется у тех, кто с ним работал».

#### Список литературы

1. С.А.Афанасьев – первый ракетно-космический министр. М.: Арт-Полиграфия. 2010. 192 с.
2. ГП «НПО «Техномаш» 60 лет// под редакцией В.В. Булавкина. М.: Техномаш. 1998. 352 с.
3. В.А. Исаченко. Творческое наследие С.А. Афанасьева//Технология машиностроения. 2016. №1. С.8–9.
4. В.М. Чебаненко. Воспоминания о министре общего машиностроения СССР С.А. Афанасьева. Невский бастион. 2017. URL: [http://nevskii-bastion.ru/afanasiev\\_sa\\_171210/](http://nevskii-bastion.ru/afanasiev_sa_171210/)
5. Н.С. Симонов. ВПК СССР: темпы экономического роста, структура, организация производства и управление. М.: Русский Фонд Содействия Образованию и науке. 2015. 504 с.
6. Фаворский В.В., Мещеряков И.В. Космонавтика и ракетно-космическая промышленность : в 2-х кн. М.: Машиностроение. 2003.

#### ◆ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018



УДК 629.7

*Чичварин В.Ф.*

## Роль С.А. Афанасьева в развитии ракетно-космической отрасли

В работе рассматриваются перечень боевых ракетных комплексов на жидкостных ракетных двигателях и ракетных двигателях твёрдого топлива, а также двигательные установки космического назначения, детали, изготовленные из композиционных материалов.

**Ключевые слова:** боевые ракетные комплексы, жидкостные ракетные двигатели, ракетные двигатели твёрдого топлива, двигательные установки космического назначения.

История создания ракетной техники берет своё начало с древнейших времён, когда в последнем тысячелетии до н. э. в Китае изобрели порох и создали первые ракеты, которые применяли как в военных целях (огненные стрелы), так и для развлечений (фейерверки).

В дальнейшем ракеты распространились по всему Востоку и к концу первого тысячелетия н.э. дошли до Европы.

В России в середине XIX века вопросами реактивного движения занимался Н.И. Кибальчич.

В 1903 г. К.Э. Циолковский впервые разработал основы теории реактивного движения, обосновав возможность применения реактивных аппаратов для полётов в космос и межпланетных сообщений. Ф.А. Цандер, Ю.В. Кондратьев, а затем М.К. Тихонравов, С.П. Королёв, В.П. Глушко продолжили тематику реактивного движения.

Аналогичные работы по реактивным аппаратам велись в США (Р. Годдард) и Германии (Г. Оберт).

В 30-е годы в СССР при Осовиахиме сформировались две группы энтузиастов ракетной техники:

- группа изучения реактивного движения (ГИРД) в Москве (руководители Ф.А. Цандер, затем С.П. Королёв);
- гидродинамическая лаборатория (ГДЛ) в Ленинграде (руководитель В.П. Глушко).

В 1933 г. на базе ГИРД и ГДЛ при Наркомате тяжёлой промышленности создан Реактивный Научно-Исследовательский Институт (РНИИ), который стал первой в мире государственной научно-исследовательской организацией, объединившей различные направления теоретической и практической разработки проблем ракетной техники.

17 августа 1933 г. на полигоне в Нахабино состоялся первый пуск отечественной ракеты на жидком топливе ГИРД-09 (проект М.К. Тихонравова). Ракета поднялась на высоту 400 метров, продолжительность полёта составила 18 секунд.

В начале 30-х годов в Германии также велись работы по созданию ракет на жидком топливе с пуском ракет на полигоне в Куммерсдорфе близ Берлина, которые особенно активизировались с приходом к власти Гитлера в 1933 г.

В работы по разработке и производству боевых ракет был включён Вернер фон Браун – последователь Германа Оберта. Под его руководством создана первая боевая баллистическая ракета ФАУ-2 («оружие возмездия»)

и инфраструктура для её промышленного производства, испытаний и пусков.

С осени 1944 г. началось боевое применение ФАУ-2, в том числе для обстрелов Лондона, которые продолжались по март 1945 г.

Оценив эффективность ракетного оружия, союзники по антигитлеровской коалиции СССР, США и Великобритания в преддверии окончания войны начали принимать меры по захвату немецкого ракетного потенциала в целях использования германского опыта создания ракетного вооружения.

Эти страны создали специальные команды, которые вывозили с занятых территорий Германии материальную часть, оборудование, документацию и специалистов.

В мае 1945 г. команда специалистов во главе с Вернером фон Брауном с полным комплектом технической документации по ракете ФАУ-2 сдалась американцам и была отправлена в США.

Из советской зоны оккупации вывезены в СССР остатки материальной части, оборудования и документации, а также некоторые немецкие специалисты.

Постановлением Совета Министров СССР от 13 мая 1946 г. №1017-419 принято решение о создании в СССР реактивного вооружения. Дата его подписания считается днём рождения отечественной ракетно-космической промышленности. В принятом постановлении определялись ближайшие задачи развития ракетного вооружения. Их реализация предусматривала создание научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, полигонов, а также необходимую государственную инфраструктуру для управления отраслью. Также был сформирован Специальный комитет по реактивной технике во главе с Г.М. Маленковым и определена структура новой отрасли, куда вошёл и Научно-исследовательский технологический институт №40 (НИТИ-40), сейчас – ФГУП «НПО «Техномаш».

Первоочередной задачей стало полное восстановление технической документации и образцов дальнобойной управляемой немецкой ракеты ФАУ-2.

Главным министерством по реактивным снарядам с жидкостными двигателями определили Министерство вооружения (министр Д.Ф. Устинов).

Головной организацией по ракетному вооружению в системе Министерства вооружения – Научно-исследовательской институт №88 (сейчас – ЦНИИмаш) в посёлке



Подлипки (в настоящее время – город Королёв). В структуру НИИ-88 входил отдел 3 баллистических ракет, под руководством С.П. Королёва, преобразованный затем в ОКБ-1.

В 1956 г. ОКБ-1 вместе с заводом 88 выделено из НИИ-88 в самостоятельную организацию – Центральное конструкторское бюро экспериментального машиностроения (ЦКБЭМ), ныне Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва.

РКК «Энергия» сыграла основополагающую роль в формировании ракетно-космической отрасли нашей страны. Под руководством С.П. Королёва впервые созданы отечественные баллистические ракеты (Р-1 и Р-2), ракета морского базирования Р-11 ФМ, стратегическая ракета Р-5М, впервые в мире пронёсшая через космос реальный ядерный заряд, взорванный на полигоне в СССР и ознаменовавший начало ракетно-ядерной эры, а также межконтинентальная баллистическая ракета Р-7 и созданные на её основе первые космические ракеты-носители, первый искусственный спутник Земли, первый спутник связи «Молния», первый пилотируемый космический корабль «Восток», первые межпланетные автоматические станции для исследования Луны, Марса, Венеры и другие изделия ракетно-космической техники.

Впервые созданные в РКК «Энергия» изделия РКТ передавались для организации новых направлений ракетно-космической деятельности на другие предприятия страны, где создавались конструкторские бюро и производства соответствующего профиля, в том числе:

- Р-1 и Р-2 (Днепропетровск) – боевые ракетные комплексы наземного базирования;
- Р-11 ФМ (Миасс, Златоуст) – боевые ракетные комплексы морского базирования;
- Р-7 и КА «Восток» (Куйбышев) – боевые ракеты, РН среднего класса и КА дистанционного зондирования Земли;
- КА «Молния» (Железногорск) – космические аппараты связи и телевидения;
- КА «Луна», «Венера», «Марс» (Москва, «НПО им. Лавочкина») – межпланетные станции и КА для космических исследований;
- РТ-2 (Пермь) – боевые ракетные комплексы с РДТТ.

Становление и развитие ракетно-космической отрасли складывалось под влиянием различных политических, научно-технических и социально-экономических факторов.

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 2 марта 1965 г. №126-47 образовано Министерство общего машиностроения СССР (МОМ), на которое возлагалось создание ракетных комплексов стратегического назначения и космической техники.

В новое министерство передавались все основные предприятия и организации ракетно-космической промышленности, чёткая координация деятельности которых обеспечила всестороннее развитие работ по укреплению обороноспособности страны и развитию космических исследований.

Координация работ и контроль за выполнением решений Правительства страны по развитию оборонных отраслей промышленности возлагались на Комиссию по военно-промышленным вопросам при Совете Министров СССР.

Министры общего машиностроения СССР:

С.А. Афанасьев (1965–1983); О.Д. Бакланов (1983–1988); В.Х. Догужиев (1988–1989); О.Н. Шишкин (1989–1991).

14 ноября 1991 г. Постановление Госсовета РФ упразднило Министерство общего машиностроения СССР. 28 ноября 1991 г. Указом Президента РФ №242 учреждено Министерство промышленности РФ с Департаментом общего машиностроения.

25 февраля 1992 г. Указом Президента РФ №185 образовано Российское космическое агентство (РКА) при Правительстве РФ. Генеральным директором РКА назначен Ю.Н. Коптев.

Указом Президента РФ от 25 мая 1999 г. №651 РКА преобразовано в Российское авиационно-космическое агентство (РАКА). Указом Президента РФ от 9 марта 2004 г. №314 РАКА преобразовано в Федеральное космическое агентство (Роскосмос).

Указом Президента РФ от 28 декабря 2015 г. №666 создана Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» путём преобразования Федерального космического агентства (Роскосмос).

Выдающаяся роль в создании и развитии отечественной ракетно-космической отрасли принадлежит дважды Герою Социалистического труда Сергею Александровичу Афанасьеву – первому «ракетно-космическому» Министру СССР, 100-летию со дня рождения которого отмечается в 2018 г.

Под его руководством отечественная ракетно-космическая отрасль объединила основные научно-исследовательские институты, конструкторские бюро и предприятия, создающие РКТ.

Именно Афанасьев взял стратегический курс на создание структуры Министерства общего машиностроения для сосредоточения под единым управлением и обеспечения единой слаженной работы научно-исследовательских и технологических институтов, конструкторских бюро и крупнейших промышленных предприятий.

Благодаря этому объединён огромный научно-технический, конструкторский и технологический потенциал для решения общей задачи – быстрого и интенсивного развития отечественной ракетно-космической техники для укрепления обороны, безопасности и социально-экономического развития страны.

Производственник высочайшего уровня, прошедший все ступени работы (технолог и организатор производства непосредственно на заводах в годы Великой Отечественной войны, начальник Технического управления Министерства вооружения СССР), руководя отраслью в течение многих лет, Сергей Александрович особое значение придавал технологии, её развитию и совершенствованию, технологическому обеспечению производства.



Решение всех технологических проблем возлагалось на головной технологический институт НИТИ-40 – НИИТМ (ФГУП «НПО «Техномаш»).

С.А. Афанасьев уделял большое внимание укреплению и развитию института: выросла численность работников, расширилась лабораторно-испытательная база, повысился научно-технический потенциал.

Для оперативного решения технологических задач созданы филиалы и базовые подразделения в Днепропетровске, Златоусте, Омске, Красноярске, Воронеже, Перми, Ижевске, Харькове, Томске, Ленинграде, Самаре, Оренбурге.

Сегодня ФГУП «НПО «Техномаш» – головное научно-исследовательское предприятие Госкорпорации «Роскосмос» по технологиям создания РКТ и метрологическому обеспечению ее производственно-технологической базы.

За заслуги в научно-технологическом обеспечении производства РКТ предприятие дважды (в 1966 и 1976 гг.) награждено орденом Трудового Красного Знамени.

На передовых предприятиях отрасли регулярно проводились Советы специалистов – главных технологов, главных сварщиков и других специалистов по основным видам технологий. Советы способствовали распространению передового опыта, оперативному решению отраслевых задач, взаимодействию науки и производства.

Важное место в деятельности С.А. Афанасьева занимало технологическое обеспечение производства РКТ, создание новых технологий, специального оборудования, средств технологического оснащения.

В отрасли были созданы специализированные заводы технологического оборудования, в том числе опытный завод в г. Лобня Московской области. На предприятиях отрасли осуществлялось централизованное изготовление специального оборудования и инструментов. Формировались и реализовывались планы технического перевооружения отрасли.

С.А. Афанасьев – не только организатор и технолог с большой буквы. Он – создатель кадровой политики, в основе которой – профессионализм, уважение к коллегам, воспитание высочайшей ответственности за порученное дело.

Стиль С.А. Афанасьева как руководителя – это деятельное утверждение принципов – «В нашей работе нет мелочей» и «Нас никто не дублирует».

В 2016 г. ФГУП «НПО «Техномаш» присвоено имя дважды Героя социалистического труда С.А. Афанасьева.

Необходимо в полной мере использовать полезный опыт работы МОМ, сохранять и творчески развивать научно-технологическое наследие С.А. Афанасьева для реализации стоящих перед отраслью задач.



Фотография на память. Награждение работников НИИТМ за успешное выполнение работ по программе «Союз-Аполлон». 1975 г. (из личного архива В.Ф. Чичварина)

#### ◆ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018



УДК 621.7

*Чебаненко В.М.*

### К 100-летию со дня рождения С.А. Афанасьева

Вспомним слова Мишеля Монтеня: «Во всей жизни Сократа нет, по-моему, более славной страницы, чем те тридцать дней, в течение которых ему пришлось жить с мыслью о приговоре, осуждавшем его на смерть, все это время сживаться с нею в полной уверенности, что приговор этот совершенно неотвратим, не выказывая при этом ни страха, ни душевного беспокойства, всем своим поведением и речами обнаруживая скорее, что он воспринимает его как нечто незначительное и безразличное, а не как». Эти слова французского философа XVI века имеют прямое отношение к Министру общего машиностроения СССР С.А. Афанасьеву, его мужественному и достойному поведению.



С.А. Афанасьев

Сергей Александрович Афанасьев – советский государственный деятель, Министр общего машиностроения СССР, министр тяжёлого и транспортного машиностроения СССР, дважды Герой Социалистического Труда и многих правительственных наград, лауреат Ленинской премии, Сталинской и Государственной премий, член ЦК КПСС.

Сергей Александрович Афанасьев – человек, не нуждающийся в комплиментах. Выступая в последний раз

на Пленуме ЦК КПСС 28 апреля 1989 г., Афанасьев подвёл итоги всей своей жизни: «Все мы прошли большой путь в жизни, в работе партии и ЦК, работали честно, отдавая все силы и здоровье... Мы уверены, что космическая техника и впредь будет на передовых рубежах технического прогресса и внесёт большой вклад в народное хозяйство».

Результаты самоотверженного труда С.А. Афанасьева, Министра общего машиностроения СССР с 1965 по 1983 год, хорошо известны всем, кто хоть как-то соприкасался с ракетно-космической деятельностью и вошли в историю нашей страны как грандиозные свершения по освоению околоземного и дальнего космоса, начало фундаментальных исследований Луны, Венеры, Марса и других планет Солнечной системы, поднявших политический и государственный престиж СССР на недосягаемые высоты.

Особый вклад в мировую космонавтику внесли получившие дальнейшее развитие отечественные пилотируемые комплексы – долговременные орбитальные станции «Салют», проектно-конструкторские и технологические решения которых позволили создать космическую станцию «Мир» и Международную (МКС), космические корабли «Союз» и «Прогресс», которые и сейчас обеспечивают транспортные и грузовые операции на МКС.

Но самое величайшее человеческое творение, создание которого потребовало всех сил, знаний и самоотверженности – это ракетно-космическая система «Энергия-Буран». Ракета-носитель «Энергия» с многооразовым кораблём «Буран» 15 ноября 1988 года ушла в единственный, но триумфальный орбитальный полёт вокруг Земли. За 205 минут полёта корабль совершил два витка вокруг Земли и с астрономической точностью осуществил посадку в автоматическом режиме в 1,5...2 метрах от «расчётной точки». В реализации этого масштабного проекта участвовали более 1200 предприятий и 87 министерств и ведомств СССР.

К деятельности С.А. Афанасьева непосредственно относятся слова Президента США Д.Ф. Кеннеди о вынужденном признании поражения США в соревновании с СССР в области космоса, сказанные чуть раньше: «Победило советское... Ребята, нам надо учить физику, иначе придётся учить русский язык».

События Карибского кризиса также сказались на деятельности Минобщемаш СССР: потребовались срочные и серьёзные решения по созданию и разворачиванию стратегических ракетных комплексов наземного и морского базирования – основы «триады» ядерного щита нашей Родины.

В чём же была причина успехов и такой эффективной деятельности Минобщемаш? Первое, что несомненно, –



легендарные и беззаветно преданные делу Главные конструкторы, объединившие вокруг себя знаменитые творческие и работоспособные коллективы: С.П. Королёв, М.К. Янгель, В.Н. Челомей, В.П. Глушко, Н.А. Пилюгин, В.П. Бармин, В.И. Кузнецов, Г.Н. Бабакин, М.С. Рязанский и многие другие. Они шли вперёд к осуществлению амбициозных целей – пилотируемому облёту и высадке экспедиции на Луну, созданию пилотируемой многоцелевой станции на околоземной орбите, пилотируемому полёту к Марсу и полётам автоматических станций к планетам солнечной системы и вне её. Всё это требовало огромных финансовых и материальных затрат и ресурсов, далеко выходящих за рамки возможностей не только Минобщемаш СССР, но и государства в целом.

К тому периоду также относится рациональное и перспективное техническое предложение доктора технических наук Д.Д. Севрука, одного из пионеров в создании ракетно-космической техники (РКТ), о строительстве единого для отрасли испытательного центра РКТ, который обеспечил бы повышение надёжности РКТ за счёт комплексной наземной отработки в условиях, максимально приближённых к реальным, что существенно сократило бы расходы и время отработки изделий РКТ. Правильность такого подхода позднее подтвердилась созданием в ЦНИИмаш мощного центра статических испытаний ракетной техники в натурную величину, через который прошла практически вся отечественная РКТ. На сопроводительном письме к техническому предложению Д.Д. Севрука стоит резолюция Генерального секретаря ЦК КПСС Л.И. Брежнева: «Тов. Афанасьеву С.А. Объясните товарищам, что таких возможностей у государства нет».

Отмечу, что ракетно-космическая отрасль, как никакая другая отрасль промышленности и народного хозяйства СССР, имела (и сейчас имеет) свои особенности:

- в отрасли значительный удельный вес занимали НИОКР (до 70% от общего объёма всех работ в стоимостном выражении), что объективно требовало инновационный характер деятельности организаций и предприятий, находящихся в ведении Минобщемаш СССР;

- основная деятельность Минобщемаш СССР, его организаций и предприятий по боевой ракетной технике и космическим системам и их результаты (успешные и неудачи) осуществлялась на виду у мирового сообщества, что повышало ответственность Минобщемаш СССР перед государством, так как по достижениям в космосе судят о состоянии экономики и обороноспособности СССР как государства;

- для обеспечения задач, возложенных на Минобщемаш СССР, требовалось постоянное обновление материально-технической базы: производственно-технологического комплекса, экспериментально-исследовательских и контрольно-испытательных стендов организаций и предприятий, а также технического развития полигонов и космодромов;

- как головная отрасль Минобщемаш СССР должен был способствовать и поддерживать развитие соот-

ветствующих отраслей и подотраслей промышленности в экономике СССР, продукция которых являлась необходимой для разработки и производства РКТ;

- для отрасли играли роль не только ограничения в виде госбюджетных средств, но и материально-технические ресурсы, что также отражалось в тематических планах НИОКР, обобщающим показателем которых являлись общие объёмы работ в стоимостном выражении (с учётом лимитов по предельным ассигнованиям на аппарат управления и оплату труда, а также собственные работы организации и предприятия).

Учитывая особенности Минобщемаш СССР, классическая балансовая модель В.В. Леонтьева «затраты-выпуск», по которой в соответствии с директивами Госплана СССР планировалась и отчитывалась вся промышленность СССР, а основной объём работ составляло массовое и крупносерийное производство изделий, и которая позволяла описывать внутреннюю структуру производства (технологии), а также взаимосвязь ресурсов и готовой продукции ракетно-космической отрасли, не подходила. В модели «затраты-выпуск» ключевыми характеристиками технологий, определяющими зависимости выпуска продукции и затрат производственных ресурсов, служат коэффициенты прямых затрат (технологические коэффициенты).

Перед Министром Минобщемаш СССР С.А. Афанасьевым был поставлен вопрос, как достигнуть баланса между тематическими планами НИОКР Главных конструкторов и руководимых ими организаций и возможностями Минобщемаш СССР (и государства). Следовательно, требовалось создать эффективную систему планирования и управления деятельностью организаций и предприятий ракетно-космической отрасли народного хозяйства СССР, которая учитывала особенности разработки, отработки и производства РКТ.

Первым шагом на этом пути стало создание в ЦНИИмаш отдела тематического планирования и технико-экономического анализа, который разработал отраслевой тематический план НИОКР на 1967 г. В созданном отделе началась целеустремлённая исследовательская и организационно-методическая работа по созданию автоматизированной системы тематического планирования НИОКР и оперативному контролю важнейших ОКР с переходом на новый в планировании СССР (поддержано Госпланом и ЦСУ) показатель «завершаемые работы» в номенклатуре по стадиям и этапам создания РКТ и по объёму в стоимостном выражении на основе сметных стоимостей.

Показатель «завершаемые работы» стал основным плановым показателем в отрасли, связавшим планирование и отчётность работ предприятия с технологическим процессом разработки, наземной отработки и опытного производства РКТ в отрасли, у истока которого стоял талантливый экономист, заместитель начальника ГППУ Минобщемаш СССР Б.М. Чернин и автор данной статьи.

Как плановый и отчётный инструмент показатель «завершаемые работы» доказал свою высокую эффективность в процессе разработки и производства РКТ со-



вместно с системой оперативного контроля важнейших ОКР с 1972–1992 гг. в Минобщемаш СССР и отражён в отраслевом директивном документе «Единое положение о планировании, учёте, отчётности и оперативном управлении научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами в отрасли» (1987 год).

Успехом и результативностью автоматизированного контроля важнейших ОКР, а также оценкой эффективности деятельности в области НИОКР организации Минобщемаш СССР обязаны заместителю начальника ГППУ, главному диспетчеру министерства, принципиальному и требовательному Б.Я. Федченко, возглавлявшему отдел контроля НИОКР «Организации «Агат». В 1969 г. на заседании Комиссии по военно-промышленным вопросам СМ СССР система тематического планирования НИОКР и оперативного контроля важнейших ОКР признана лучшей среди девяти министерств военно-промышленного комплекса СССР. На всех этапах работ по созданию и совершенствованию системы тематического планирования НИОКР и оперативного контроля важнейших ОКР, вплоть до инициативы создания полиэкрана коллективного пользования в зале коллегии (аналога полиэкрана в Центре управления полётами ЦНИИМаш), с автоматизированным выводом информации от ГВЦ по рассматриваемым на коллегии вопросам, непосредственно участвовал, поддерживал и направлял работы Министр С.А. Афанасьев.

Такое техническое решение позволило получить возможность параллельного функционирования в режиме передачи информации из калининградского Центра управления полётами, без права вмешательства в управление происходящим процессом, а только в форме наблюдения за происходящим на экранах ЦУП из зала коллегии министерства.

Во всех организациях отрасли создавались отделы координации работ, технико-экономического анализа и разработки сметных стоимостей, которые поставили на научную основу обоснование и разработку технико-экономических характеристик разрабатываемой РКТ и оптимальность принимаемых решений по предстоящим затратам на её создание. Всё это создавалось в виде автоматизированных систем тематического планирования и управления организаций и министерства в целом.

В таком процессе не работало ни одно из министерств и ведомств народного хозяйства СССР. Подчёркивая на ВПК СМ СССР значимость выполненной работы и масштабность достигнутых результатов, я как докладчик в конце выступления сказал: «Без помощи и постоянной поддержки Министра С.А. Афанасьева сделать подобное было невозможно».

Профессионализм и признание организациями и предприятиями отрасли работ по совершенствованию

системы тематического планирования НИОКР, а также работы по созданию АСУП на предприятиях и растущие задачи отрасли привели к необходимости создания в Москве филиала ЦНИИМаш – Организации «Агат» на самостоятельном балансе сформированной базе отделения №7 ЦНИИМаш и подразделений НИИТМ (в т. ч. Главный вычислительный центр министерства).

В интервью редактору журнала «Новости космонавтики» Н.П. Тарасенко в 1991 году С.А. Афанасьев, называвший «Агат» «Наш министерский Госплан», сказал: «Надо отдать должное экономическим службам отрасли, обеспечившим создание внедрение «Единой системы планирования, учёта, отчётности и оперативного управления НИОКР отрасли», позволяющей рачительно, по-хозяйски расходовать выделяемые государством бюджетные ассигнования». И далее: «Ни один разработчик не мог пройти мимо этих служб. Борьба за экономию начиналась с обоснования проекта, выбора наиболее «дешевого» варианта на ранних стадиях проектирования».

Вот, что говорил о С.А. Афанасьеве Генеральный конструктор ОКБ «Южное» В.Ф. Уткин: «Впрочем, глубочайшая ошибка, когда говорят, мол, «оборонка» никогда не считалась со средствами, сколько просили, столько и давали. Нет, это совсем не так! Да, с деньгами для обороны было легче, чем сейчас, но считались они намного тщательней! Составлялась смета, подавалась она на ревизию в институт «Агат», где изучалась и анализировалась каждая цифра, затем директор института докладывал министру Сергею Александровичу Афанасьеву...Кстати, хотя мы были с ним в разных «лагерях», но более удачного министра общего машиностроения у нас, конечно, не было. При нём шло становление министерства, завоевание «места под солнцем» между атомщиками, радиотехникой, машиностроением вообще и оборонным ведомством в частности... Это удалось во многом благодаря Афанасьеву. Это был крупнейший специалист, технолог, умница... Готовился к коллегии так, что ты на ней неподготовленным не появишься – стыдоба будет большая. Он настолько грамотно вёл коллегию, решал проблемы, что являлся примером для нас, Генеральных, Главных и директоров. Так что любые вопросы в прошлом решались тщательно, со знанием дела и деньги умели считать и пересчитывать. Ну, а на коллегию к Афанасьеву едешь, то, к примеру, не только знаешь всё об аварии, о которой докладываешь, но и большую «зону» вокруг изучаешь. А если о материале новом говоришь, то должен знать о нём до конца, вплоть до того, где и как он добывается. Требовательный был министр, но справедливый... Афанасьев для становления ракетной и космической техники сыграл огромнейшую положительную роль и собственно ошибки на начальство не стоит перекладывать».

## ◆ ПЕРСПЕКТИВЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТРАСЛИ

УДК 629.78: 620.3

Семенов В.В., Егоров А.В., Ахмедов Ф.А., Быков А.А., Кондратенко А.А., Агуреев Л.Е., Иванов Б.С.

### Технология создания лёгких наноструктурных алюмокомпозитов упрочнённых $Al_2O_3$ и $SiC$ для корпусов РКТ

В работе рассмотрена технология получения образцов алюмокомпозитов упрочнённых микродобавками тугоплавких наночастиц, в частности наночастицами  $Al_2O_3$  и  $SiC$ . Приводятся результаты исследований состава, структуры и свойств композитов, армированных наночастицами, полученных холодным прессованием и форвакуумным спеканием.

**Ключевые слова:** нанопорошок, композиционный материал, оксид алюминия, карбид кремния, алюмокомпозит, наночастицы.

Совершенствование и создание конструкций ракетно-космической техники (РКТ) связано в первую очередь с использованием новых материалов. Перспективы создания новых конструктивных и технологических решений связывают с разработкой и широким применением композиционных материалов (композитов) на основе алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы и композитные материалы на их основе широко применяются в авиации, РКТ и автотранспорте, т.к. сочетают в себе низкую плотность, высокую прочность и технологичность. Однако технология литейных алюминиевых сплавов сопряжена с большими потерями материала, наличием сегрегаций примесей, необходимостью дополнительной термообработки для упрочнения. К недостаткам порошковых материалов на основе спеченного алюминия можно отнести неравномерность структуры и свойств, а также низкую пластичность. В этой связи предпочтительным методом создания высокопрочных алюминиевых сплавов может служить порошковая технология с добавлением керамических наночастиц. Наночастицы приводят к повышению функциональных свойств порошковых материалов по ряду причин [1–4]: измельчают зёрна матрицы, препятствуют передвижению границ зёрен, формируя вокруг себя зоны упрочнения.

Влияние наночастиц оксидов алюминия и карбида кремния ( $Al_2O_3$  и  $SiC$ ) на прочностные свойства порошкового алюминия и композитов на его основе изучено в основном для концентраций более 1 % об. Открытым остаётся вопрос о влиянии микродобавок наночастиц на свойства металлов и сплавов в концентрациях менее 0,25 % об. Центральная роль в упрочнении металлов наночастицами принадлежит т.н. межфазному слою, на который влияют свойства шихтовых материалов, состояние (форма и состав) поверхности микро- и наночастиц. Даже малые доли примесных элементов (~0,001%) могут катастрофически влиять на диффузионную подвижность атомов по границам зёрен, что, в свою очередь, затрагивает механические и другие важные свойства материала. Частицы оксида алюминия и карбида кремния устойчивы в алюминиевой матрице и являются препятствиями для перемещения дислокаций. 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. Известен большой круг работ, посвящённых созданию алюминиевых порошковых композитов, упрочнённых наночастицами различной природы [5–9]. Данные исследования показали высокую перспективность порошковой технологии как метод получения прочных и лёгких материалов на основе алюминия и применения наночастиц и эффективного модификатора структуры сплавов. Ввод в матрицу на основе алюминиевого порошка наночастиц керамик может открыть новые возможности для применения его в ряде отраслей промышленности, например, материалы, упрочнённые микродобавками тугоплавких наночастиц, могут быть использованы для изготовления крыльчаток ракетных двигателей.

Таким образом, создание и исследование алюмокомпозитов, упрочнённых микродобавками тугоплавких наночастиц, в частности наночастицами  $Al_2O_3$  и  $SiC$ , является актуальным. В качестве матрицы для создания композиционных материалов на основе алюминия применяли порошок алюминия марки АСД-4 (ТУ 48-5-226-87). Диаметр частиц менее 20 мкм. Удельная поверхность порошка АСД-4, имеющего сферическую форму частиц – 0,58 м<sup>2</sup>/г. Для модификации алюминия применяли порошок меди ПМУ (диаметр менее 1 мкм).

Технология получения образцов композитов на основе алюминия, упрочнённых наночастицами, включает в себя следующие основные процессы: плазменный синтез нанопорошков  $Al_2O_3$  и  $SiC$ , рассев и седиментация полученных порошков, гомогенизация, прессование и спекание. Для получения нанодисперсных порошков оксида алюминия и карбида кремния размером частиц менее 0,1 мкм использовалась плазмохимическая установка, общий вид которой показан на рис. 1.



Рис.1. Плазмохимическая установка

После гомогенизации и определения дисперсоида, вводимого в матрицу, образцы прессовали при 400 МПа и далее спекали при 600–640 °С в течение 180 мин. в форвакууме 0,1 мм рт. ст. Спекание образцов проводилось в вакууме в нагревательной автоматической печи ВМС-22-10,5 (рис.2).



Рис. 2. Лабораторная печь ВМС-22-10,5

Микроструктуру образцов композиционного материала изучали на микроскопе FEI Quanta 600 FEG. Данный микроскоп с автоэмиссионным катодом интегрирован комплексной системой микроанализа EDAX TRIDENT XM 4, состоящей из энергодисперсионного спектрометра (EDS), спектрометра с волновой дисперсией (WDS) и системы анализа структуры и текстуры кристаллических материалов методом дифракции отраженных электронов (EBSD). Микроскоп позволяет получать изображения различных объектов с увеличением до 106×.

Исследование распределения используемых наночастиц по размерам проводили на лазерном анализаторе частиц Malvern Zetasizer Nano (рис. 3), принцип действия которого основан на рассеянии света и позволяет определять размер, зета-потенциал и молекулярный вес частиц или молекул, помещённых в жидкую среду.



Рис. 3. Лазерный анализатор частиц

Для определения пикнометрической плотности образцов использовался гелиевый пикнометр Ultrarupnometer 1200e. Испытание материалов при изгибе и растяжении проводили на универсальной установке для определения механических свойств материалов при комнатной температуре. Измерение микротвёрдости образцов производилось на приборе Micromet 5114 методом вдавливания алмазной пирамидки в образец под нагрузкой 50 г.

Нанопорошки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, синтезированные на плазмохимической установке, имели разброс по размерам от 20 до 100 нм (рис. 4), а порошки SiC оказались сильно агрегированными и состояли из первичных частиц с размерами 10–30 нм (рис.5).

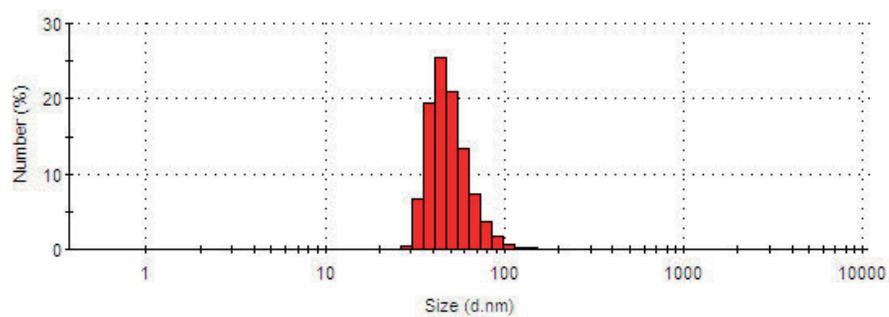


Рис. 4. Распределение по размерам наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

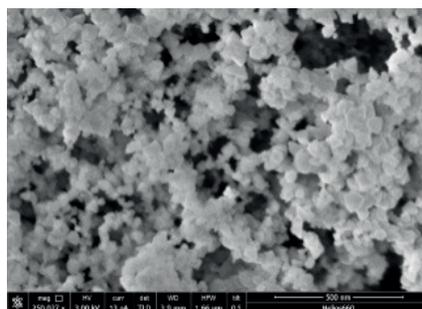


Рис.5. Нанопорошок SiC



Диапазон концентраций наночастиц в матрице находился в пределах 0,01–0,15 % об.

В табл. 1 представлены результаты исследований состава, структуры и свойств композитов, армированных наночастицами оксида алюминия и карбида кремния, полученные холодным прессованием и форвакуумным спеканием.

Исследования показали, что плотность полученных материалов находилась в пределах 2,68–2,88 г/см<sup>3</sup>. Отмечено повышение механических характеристик при добавлении наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или SiC по сравнению с немодифицированными материалами: предела прочности на растяжение на 20–50%, предела прочности на изгиб на 50–90%, микротвёрдости на 20–25%.

**Таблица 1. Результаты исследований состава, структуры и свойств образцов алюмокомпозитов**

Кол-во и тип наночаст., % об	Средний размер зерна, мкм	Элементный состав, % масс	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Микротвёрдость, ГПа	Предел текучести, МПа
0,01 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5	93,1%Al, 3,4%Cu 3,5% O	2,75-2,88	240±40	150±60	0,53	200±25
0,05 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2	94,0%Al 3,4%Cu 3,5% O	2,71-2,80	250 ±80	190±70	0,58	210±25
0,1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7	93,0%Al 3,4%Cu 3,5% O	2,70-2,85	247±25	130±60	0,55	207±30
0,01SiC	4,4	94,3%Al 3,4%Cu 3,5% O	2,73-2,86	300 ±83	200 ±80	0,50	254±14
0,05SiC	4,1	93,5%Al 3,4%Cu 3,5% O	2,68-2,81	280±66	155±40	0,53	221±19
0,1SiC	4,8	93,8%Al 3,4%Cu 3,5% O	2,74-2,86	264±37	142±52	0,52	212±28
Без наночастиц	6,3	96,4%Al 3,6%Cu	2,65-2,69	200±25	100±25	0,48	130±25

#### Список литературы

1. Панов Д.В. и др. Нанотехнологии в РКП // НТБ Вестник «НПО «Техномаш».2018. №6.

2. Ohji T. Particle/Matrix interface and its role in creep inhibition in alumina/silicon carbide nanocomposites/ T. Ohji, T. Hirano, A. Nakahira, K. Niihara // Journal of American Ceramic Society. 1996. №79. P. 33–45.

3. Schobel M. Internal stresses and voids in SiC particle reinforced aluminum composites for heat sink applications/ M. Schobel, W. Altendorfer, H.P. Degischer et al. //Composites Science and Technology. 2011. vol. 71.–P. 724–733.

4. Lurie S. The Application of the multiscale models for description of the dispersed composites/ S. Lurie, P. Belov, N. Tuchkova // Int. Journal "Computational Materials Science" A. 2004 №36(2). P.145–152.

5. Kang Y.C. Tensile properties of nanometric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulate-reinforced aluminum matrix composites/ Y.C. Kang, S.L.-I. Chan // Materials chemistry and physics-2004. – 85. P. 438–443.

6. Mazahery A. Investigation on mechanical properties of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced aluminum matrix composites/ A. Mazahery, M. Osfadshabani // Journal of Composite Materials.- 2011.- №45 (24). –P. 2579-2586.

7. Zebarjad S.M. Influence of nanosized silicon carbide on dimensional stability of Al/SiC nanocomposite/ S.M. Zebarjad, S.A. Sajjadi, E.Z. Vahid Karimi // Research Letters in Materials Science. 2008. – 4p.

8. Mahmoud T.S. Mechanical and corrosion behaviors of Al/SiC and Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix nanocomposites fabricated using powder metallurgy route/ T.S. Mahmoud, E.Y. El-Kady, A. Al-Shihri // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2012. vol. 47.- No.1. P. 45–53.

9. Ansary Yar A. Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy matrix composite reinforced with nano-particle MgO/ Yar A. Ansary, M. Montazerian, H. Abdizadeh et al.// Journal of Alloys and Compounds. 2009. №484. P. 400–404.



УДК 623:338.984

Жемердеев О.В., Кондратенко А.Н., Корнеев А.Я.

## Методика определения предельной стоимости разработки и экспертизы обоснований экономической целесообразности реализации инвестиционных проектов с государственным участием

В работе представлена методика расчёта предельной стоимости разработки и проведения экспертизы обоснований экономической целесообразности объёма и сроков осуществления капитальных вложений, основанная на использовании параметрических методов ценообразования.

**Ключевые слова:** параметрические методы ценообразования, метод удельной цены, обоснование экономической целесообразности, проектная документация, государственная экспертиза, публичный технологический и ценовой аудит.

### Введение

В настоящее время нормативная база для разработки, проведения экспертизы обосновывающих материалов для объектов капитального строительства и расчёта их стоимости охватывает в полной мере инвестиционную стадию, начиная с проектирования (проектная и рабочая документация) [1–4]. Состав и краткое содержание разделов обоснований экономической целесообразности, объёма и сроков осуществления капитальных вложений (ОЭЦ), разрабатываемых на прединвестиционной стадии, определены в постановлении Правительства РФ [5]. Для организаций ракетно-космической промышленности (РКП) состав и содержание разделов ОЭЦ детализированы приказом Госкорпорации «Роскосмос» [6]. Также в [6] сформулированы требования к заключениям по результатам проверки (экспертизы) ОЭЦ. Таким образом, существующая нормативная база не регулирует вопросы ценообразования в части стоимости разработки и проведения экспертизы ОЭЦ. Установлена лишь стоимость проведения публичного технологического и ценового аудита (ТЦА) крупных инвестиционных проектов с государственным участием [7].

Следует отметить, что в соответствии с [1] в проектной документации не установлен раздел «Эффективность инвестиций», который входил в состав проекта в условиях

ранее действовавшего СНиП 11-01-95 «Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений», введённого в действие постановлением Минстроя России от 30 июня 1995 г. №18-64 (отменён постановлением Госстроя РФ от 17 февраля 2003 г. №18). Расчёт эффективности инвестиций проводился в соответствии с методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования (фактически утратили силу), утверждёнными Госстроем России, Минэкономики России, Минфином России, Госкомпромом России (№7–12/47 от 31 марта 1994 г.). В настоящее время, в соответствии с [5], инвестиционные проекты подлежат проверке, проводимой Минэкономразвития России на основе интегральной оценки, которая определяется методикой оценки эффективности использования средств федерального бюджета, направляемых на капитальные вложения [8]. Нормативными актами [5, 6] не предусмотрен расчёт эффективности инвестиционных проектов в материалах ОЭЦ.

### Методика расчёта предельной стоимости разработки и проведения экспертизы ОЭЦ

На рис. 1 представлен перечень исследуемых в данной статье экспертиз (аудитов), и соответствующей документации, являющейся объектом их рассмотрения.



Рис. 1. Перечень исследуемых экспертиз (аудитов)



Здесь введены обозначения: ЗнП – задание на проектирование, ПД – проектная документация, ИЖ – материалы инженерных изысканий, ГЭ – государственная экспертиза. Стрелками на рис. 1 отражена зависимость платы за проведение ГЭ и ТЦА 1-го этапа от суммарной стоимости изготовления ПД и ИЖ, установленная нормативными актами [4, 7].

Цена за проведение ТЦА 1-го этапа установлена в [7] и составляет 0,2% суммарной стоимости изготовления ПД и ИЖ. Объект рассмотрения ТЦА 1-го этапа и экспертизы ОЭЦ один и тот же (рис. 1) – ТЦА материалов ЗнП в дальнейшем не учитывается в связи с тем, что большинство данных, в особенности в части технологических решений, для разработки ЗнП содержится в материалах ОЭЦ.

Следует отметить, что в соответствии с [7] предметом рассмотрения ТЦА 1-го этапа, являются не только оценка обоснования выбора технологических решений, технологического оборудования, оценка предельной стоимости реализации инвестиционного проекта, возможность сокращения сроков, этапов работ и стоимости реализации инвестиционного проекта, но и оценка обоснования выбора основных архитектурных, конструктивных и инженерно-технических решений.

В табл. 1 и 2, в соответствии с [2], приведены состав и стоимость разработки разделов ПД, а также проведена выборка (отмечена в табл. 1 знаками «+») из генеральной совокупности (состава разделов ПД), соответствующая предмету рассмотрения экспертизы ОЭЦ и ТЦА 1-го этапа.

Таблица 1.

№ п/п	Генеральная совокупность (состав разделов ПД)	Рекомендуемая относительная стоимость разработки разделов ПД, %	Соответствие предмету рассмотрения экспертизы ОЭЦ/ТЦА 1-го этапа
1	Пояснительная записка	1	+/+
2	Схема планировочной организации земельного участка,	3	-/-
3	Архитектурные решения	3,5	+/+
4	Конструктивные и объёмно-планировочные решения	5	+/+
5	Инженерное оборудование, сети, инженерно-технические мероприятия, технологические решения	62,9	+/+
6	Проект организации строительства	2,6	-/-
7	Проект организации работ по сносу и демонтажу	1	-/-
8	Охрана окружающей среды (ООС)	10	-/-
9	Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности	5	-/-
10	Мероприятия по обеспечению доступа инвалидов	1	-/-
11	Смета на строительство	5	+/+
Итого		100	

Таблица 2

№ п/п	Состав раздела «Инженерное оборудование, сети, инженерно-технические мероприятия, технологические решения»	Рекомендованная относительная стоимость разработки, %
1	Технологические решения	36,5
2	Электроснабжение	13,1
3	Водоснабжение	1,8
	Водоотведение	1,7
5	Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха	7,5
6	Связь	1,3
7	Газоснабжение	1,0
Итого		62,9

Следует иметь в виду, что степень раскрытия, детализации содержания разделов ПД, соответствующих выборке (элементов выборки), весьма существенно различаются при разработке ОЭЦ и изготовлении ПД. Так, например, элемент выборки «Смета на строительство» при изготовлении ПД содержит, в том числе, сводку за-

трат, сводный сметный расчет стоимости строительства, объектные и локальные сметные расчеты (сметы), а при разработке ОЭЦ, кроме расчета предельной стоимости строительства, может содержать только прайс-листы, локальные сметы на приобретение и монтаж оборудования или сметные расчёты на отдельные виды затрат.



Из данных табл. 1 следует, что элементы выборки из генеральной совокупности для экспертизы ОЭЦ и ТЦА совпадают. В связи с этим необходимо исследовать элементы выборки (параметрического ряда). Главным, наиболее значимым параметром ряда является раздел «Инженерное оборудование, сети, инженерно-технические мероприятия, технологические решения», относительная стоимость которого при изготовлении ПД и, следовательно, при проведении ГЭ составляет 62,9%, а относительная стоимость подраздела «Технологические решения» – 36,5% (табл. 2).

Применительно к разработке ОЭЦ, с учётом проведённой в табл. 1 выборки, относительная стоимость разработки решений по инженерно-техническому обеспечению и технологических решений, соответствующих указанному ранее разделу, составляет 81,3%, в том числе технологических решений – 47,2%. И первом, и во втором случае отношение стоимостей составляет 1,72 ( $1,72=62,9/36,5=81,3/47,2$ ).

Для расчёта предельной (максимальной) стоимости экспертизы ОЭЦ будем полагать, что предметом экспертизы ОЭЦ являются как технологические решения, так и решения по инженерно-техническому обеспечению, а предметом ТЦА – только технологические решения. В этом случае применение одного из параметрических методов – метода удельной цены позволяет рассчитать предельную стоимость экспертизы ОЭЦ для крупных инвестиционных проектов, стоимость которых превышает 1,5 млрд. руб.:

$$C_{\text{ЭОЭЦ}} = 1,72 * C_{\text{ТЦА}} = 0,0034 \quad (1)$$

В формуле (1)  $C_{\text{ЭОЭЦ}}$  – стоимость экспертизы,  $C_{\text{ТЦА}}$  – стоимость проведения ТЦА, 1,72 – корректирующий коэффициент, равный отношению стоимостей главных параметров параметрических рядов для экспертизы ОЭЦ и ТЦА (81,3/47,2),  $C_{\text{ПД}}$  и  $C_{\text{ИЖ}}$  – стоимость изготовления ПД и ИЖ.

Таблица 3.

Сумма $C_{\text{ПД}}$ и $C_{\text{ИЖ}}$ (млн руб., в ценах 2001 г.)	$C_{\text{ЭОЭЦ}}$ в процентах от суммы $C_{\text{ПД}}$ и $C_{\text{ИЖ}}$
0-0,15	2,43
более 0,15	2,11
более 0,25	1,97
более 0,5	1,46
более 0,75	1,20
более 1	0,91
более 1,5	0,86
более 3	0,79
более 4	0,63
более 6	0,51
более 8	0,44
более 12	0,34

Таким образом,  $C_{\text{ЭОЭЦ}}$  составляет 0,344% суммы  $C_{\text{ПД}}$  и  $C_{\text{ИЖ}}$ .

Для расчета  $C_{\text{ЭОЭЦ}}$  инвестиционных проектов, стоимость которых составляет не более 1,5 млрд руб. следует иметь в виду:

1. ГЭ и экспертиза ОЭЦ, в отличие от ТЦА, являются комплексным рассмотрением (экспертизой) соответствующих объектов: ПД+ИЖ и ОЭЦ, соответственно;

2. В приложении к нормативному акту [4] определены процентные соотношения, используемые при расчёте платы за проведение ГЭ ( $C_{\text{ГЭ}}$ ), от суммы  $C_{\text{ПД}}$  и  $C_{\text{ИЖ}}$ .

Стоимость инвестиционного проекта 1,5 млрд руб. в ценах 1-го квартала 2018 г. при пересчёте в цены 2001 г. составляет 391,6 млн. руб.  $C_{\text{ПД}}$  зависит от стоимости строительства, категории сложности объекта проектирования и применения корректирующих (понижающих и повышающих) коэффициентов. Вместе с тем, основываясь на практическом опыте проектирования,  $C_{\text{ПД}}$  составляет приблизительно 2,8% стоимости строительства. Таким образом, при стоимости строительства 391,6 млн руб.  $C_{\text{ПД}}$  составит приблизительно 11,0 млн руб. в ценах 2001 года. С учётом  $C_{\text{ИЖ}}$  для расчёта предельного (граничного) значения  $C_{\text{ГЭ}}$  следует использовать соотношение 4,76% от суммы  $C_{\text{ПД}}$  и  $C_{\text{ИЖ}}$  из приложения к [4]. Можно сделать вывод, что для расчёта предельного (граничного) значения  $C_{\text{ЭОЭЦ}}$  следует применять соотношение – 4,76% стоимости объекта рассмотрения, т. е. стоимости разработки ОЭЦ ( $C_{\text{ЭОЭЦ}}$ ).

Таким образом, принимая во внимание формулу (1) получаем:

$$C_{\text{ОЭЦ}} = 0,072 * (C_{\text{ПД}} + C_{\text{ИЖ}}); \quad (2)$$

В формуле (2) коэффициент 0,072 равен отношению 0,344/4,76.

Для инвестиционных проектов, стоимость которых составляет не более 1,5 млрд руб.,  $C_{\text{ЭОЭЦ}}$  в процентах от суммы  $C_{\text{ПД}}$  и  $C_{\text{ИЖ}}$  приведена в табл. 3.





УДК 629.7:628

Гапоненко О.В.

## Методический подход к формированию долгосрочных стратегических планов технологического развития национального аэрокосмического агентства США на примере технологий двигателестроения

В статье проведён обзор методических приёмов, используемых в NASA при создании отраслевых стратегических планов технологического развития, на примере технологий двигателестроения, а также анализ целесообразности использования методологии NASA при разработке документов стратегического планирования ракетно-космической промышленности России.

**Ключевые слова:** технологическое развитие, дорожные карты технологий NASA, критические, совершенствующие и трансформирующие технологии, принципы инвестиций в технологии, критерии отбора технологий.

США являются одним из мировых лидеров космической деятельности. Обладая мощной современной промышленной и научной базой в сочетании с лучшими в мире финансово-экономическими возможностями, американцы достигли выдающихся результатов в разработке и реализации в практических областях самых передовых космических и промышленных технологий.

Важную роль в успешном технологическом развитии аэрокосмической промышленности и науки США играет грамотное стратегическое планирование и управление финансовыми и временными ресурсами технологических исследований.

Целью данной работы является реферативный обзор документов долгосрочного планирования разработки технологий аэрокосмической промышленности США и определение методических особенностей формирования стратегического плана инвестиций в технологическое развитие национального аэрокосмического агентства (NASA), а также анализ возможностей использования методического подхода, применяемого в NASA, при разработке документов стратегического планирования ракетно-космической промышленности (РКП) России.

В настоящее время долгосрочная программа стратегического развития в области технологий аэронавтики и ракетостроения США основана на созданном в 2017 году стратегическом плане технологических инвестиций (Strategic Technology Investment Plan – STIP) [1], в котором изложены основные магистральные направления технологического развития NASA. основополагающим элементом STIP является пакет технологических дорожных карт (NASA Technology Roadmaps) [2]. Дорожные карты разработаны в 2012 году, существенно уточнены и расширены в 2015-м.

Дорожные карты технологий NASA 2015 года представляют собой набор документов, сфокусированных на прикладных научно-исследовательских и опытно-технологических работах, которые рассматривают широкий спектр необходимых технологий и путей развития аэронавтики и ракетостроения на ближайшие 20 лет (2015–2035). Пакет состоит из 15 дорожных карт, соответствующих основным направлениям технологического развития.

В отдельный раздел выделены технологии, которые охватывают более чем одно технологическое направление.

Дорожные карты технологий NASA 2015 года включают следующие технологические направления первого уровня, по каждому из которых построена отдельная дорожная карта:

1. Системы выведения на орбиту.
2. Технологии космических двигательных установок.
3. Космическая энергетика и бортовые системы энергоснабжения.
4. Роботизированные и автономные системы.
5. Системы связи, навигации, отслеживания и определения параметров орбитального мусора.
6. Системы жизнеобеспечения и сохранения здоровья человека.
7. Исследования пилотируемой космонавтики.
8. Научные инструменты и датчики, орбитальные обсерватории.
9. Системы входа в плотные слои атмосферы, спуска и посадки.
10. Нанотехнологии.
11. Процессы имитации, моделирования, информационные технологии.
12. Технологии производства материалов, структур, механических систем.
13. Системы старта и посадки.
14. Системы обеспечения тепловых режимов.
15. Аэронавтика.

*Системы выведения на орбиту – ТА<sup>1</sup>.*

Данная дорожная карта состоит из шести направлений второго уровня:

- 1.1. Твёрдотопливные ракетные двигатели.
- 1.2. Жидкостные ракетные двигатели.
- 1.3. Стартовые или маршевые системы с двигателями, использующими атмосферный воздух (ПВРД).
- 1.4. Вспомогательные ракетные системы.
- 1.5. Нетрадиционные ракетные двигательные системы.
- 1.6. Аэростатические системы с научными целями.

Каждое технологическое направление второго уровня состоит из набора направлений третьего уровня,

<sup>1</sup> ТА – technology area (технологическая область, технологическое направление исследований)

для каждого из которых проведён анализ, включающий цели и проблемы исследований, а также эффективность использования полученных результатов, и определены технологии-кандидаты, которые могут быть включены

в программу исследований NASA по этому направлению при выполнении определённых условий. Декомпозиция технологического направления ТА1 приведена на рис. 1.



1) к данной категории относятся, например, Mass Injected Pre-Compression Cooling (MIPCC) двигатели [3]

Рис. 1. Структура технологического направления ТА1 «Системы выведения на орбиту»

Часть технологических направлений третьего уровня в настоящее время не содержит ни одной исследовательской работы (на рис. 1 обозначены прямоугольниками серого цвета). Такая ситуация возникает при отсутствии в данной области технологий, которые могут быть использованы в запланированных или возможных миссиях NASA до 2035 года и, следовательно, в рамках дорожных технологических карт NASA не рассматриваются. Наличие таких направлений в рассматриваемой структуре объясняется тем, что они могут стать актуальными и получить соответствующее наполнение при будущих корректировках дорожных карт или включаться в дорожные карты исследований, не финансируемых из бюджета NASA, но в которых NASA принимает участие. В [4, с. 317] приводятся сведения о том, что космическую деятельность в США финансируют в значительных объёмах другие государственные структуры, использующие космические системы.

Это национальное управление авиационно-космической разведки (NRO), космическое управление национальной безопасности (NSSO), национальное агентство геопространственной разведки (NGA), управление перспективных исследований и разработок (DARPA), научно-исследовательская лаборатория военно-воздушных сил (AFRL) и морская исследовательская лаборатория (NRL), находящиеся в ведении Министерства обороны США. Примером является направление 1.3.5 ПВРД и ГПВРД. Разработки данного класса двигателей связаны с созданием гиперзвукового оружия и финансируются Министерством обороны США. Классификационная структура, приводимая на рис. 1, одинакова для всех космических исследований, независимо от источника финансирования.

В стратегических планах NASA определены главные цели инвестиций в технологическое развитие аэрокосмической отрасли США:



- расширение и поддержка присутствия и активной деятельности человека в космосе;
- получение новых знаний о Земле, Солнечной системе и Вселенной;
- революционные изменения в безопасности и экологичности авиации в США и во всем мире;
- стимулирование американской предпринимательской деятельности в космосе и увеличение преимущества США в космической деятельности.

Разумно предположить, что пятой, неназванной в открытом документе, целью является:

- обеспечение превосходства США в военной авиации и военных космических системах.

В соответствии с базовыми принципами программно-целевого планирования для каждого уровня иерархии сформулирована соответствующая стратегическая цель исследований в данном направлении. Общая цель технологий ТА1 – обеспечить доступ в космос, в частности на низкую опорную орбиту, и сделать его надёжным и экономически эффективным. Стратегическая цель – обеспечить доступ в космос и сделать его надёжным и экономически эффективным.

Также декларируется необходимость увеличения тяги маршевых двигателей, использующихся в пилотируемых миссиях. Далее для каждого уровня иерархии формулируется своя подцель. Причём, как показано в [5], цели нижнего уровня превращаются в решаемые задачи для цели вышестоящего уровня. На третьем уровне созданного таким образом дерева целей-задач к задачам добавлены ветви – «проблемы» и «ожидаемый результат». Пример описанной структуры приведён на рис. 2.

Актуальные технологические направления третьего уровня наполнены технологиями-кандидатами. Это четвёртый уровень иерархии. Отбор технологий происходит по критериям положительного влияния результатов исследований на достижение поставленных целей всех уровней. Технологии, включённые в дорожные карты, имеют статус технологий-кандидатов, то есть проектов технологических исследований, по которым до 2035 года возможны работы, финансируемые из бюджета NASA. Наполнение технологического направления ТА 1.1 «Твёрдотопливные ракетные двигатели» представлено в табл. 1.

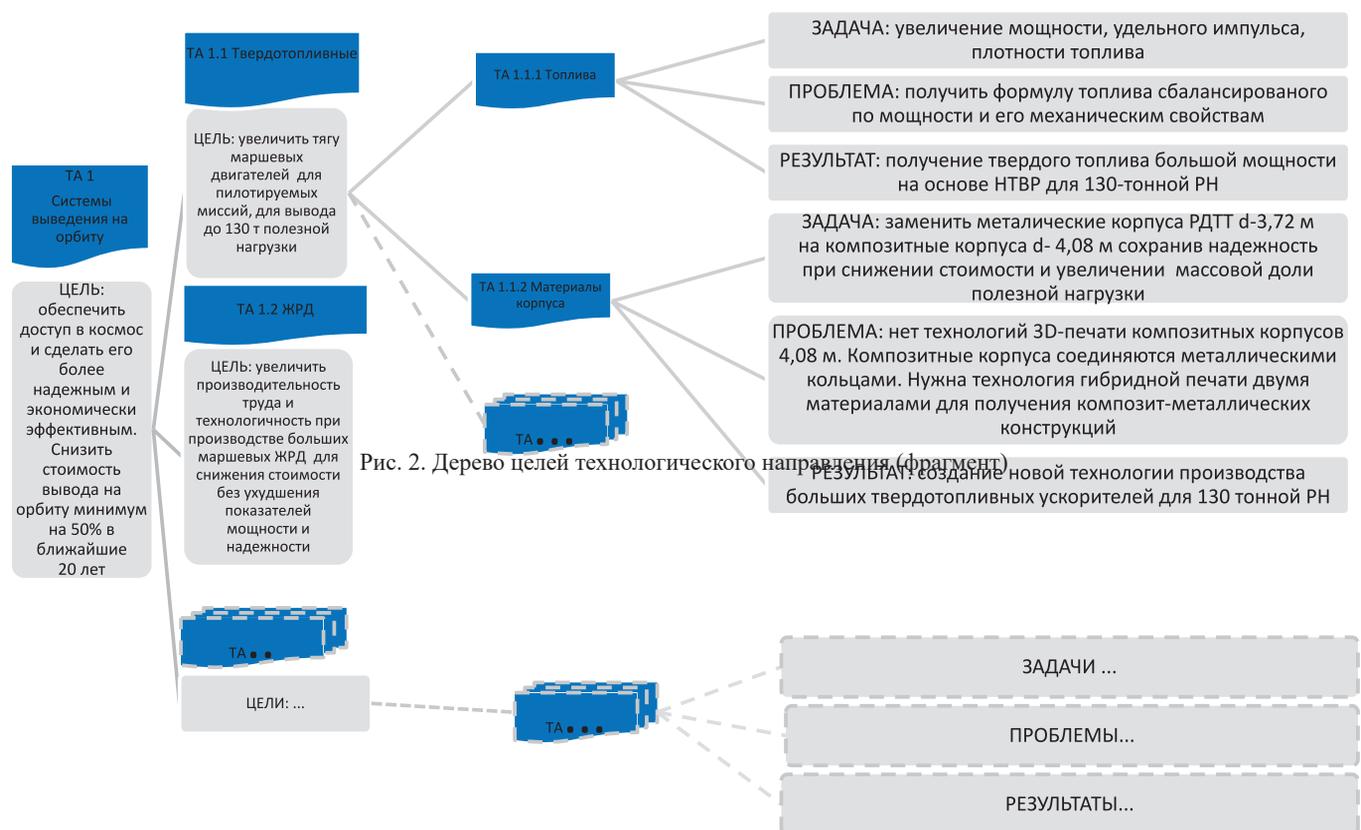


Рис. 2. Дерево целей технологического направления (фрагмент)

Таблица 1. Технологии-кандидаты по направлению 1.1 «Твёрдотопливные ракетные системы»

Направление	Категория технологий	Индекс и наименование технологии	Описание
ТА 1.1.1	Ближайшая критическая	1.1.1.1 Технология получения НТРВ-топлива. Полибутадиен с концевыми гидроксильными группами	Альтернативный вид твёрдого топлива повышенной мощности для РДТТ стартовых ускорителей РН
ТА 1.1.2	Усовершенствующая	1.1.2.1 Технологическая подготовка производства корпусов нового твёрдотопливного ускорителя диаметром до 4,08 м (13,4 фута)	Новые промышленные технологии изготовления композитных и металлических компонентов корпуса, которые позволяют использовать большие твёрдотопливные ускорители, сохраняя при этом высокую надёжность двигательных установок и снижая затраты на производство
		1.1.2.2 Допустимые повреждения композитных корпусов и методы обнаружения повреждений	Разработка методов обнаружения предельно допустимых повреждений, определение пределов допуска материалов и уточнения технологических процессов для изготовления перспективного твёрдотопливного ускорителя
		1.1.2.3 Технология получения композитных корпусных мембран, интегрированные с уплотнительными кольцами (изготовление методами намотки, препрегов, формования)	Разработка технологии изготовления композитных корпусных мембран с металлическими уплотнительными кольцами для корпусов РДТТ больших диаметров до 4,08 м
		1.1.2.4 Технология 3D-печати корпусных мембран и соединительных элементов	Изготовление элементов корпуса РДТТ (мембран и соединителей) при помощи аддитивных технологий
		1.1.2.5 Изготовление корпуса РД для РН для запуска наноспутников	Разработка корпуса РДТТ для недорогой РН для запуска наноспутников
ТА 1.1.3	Усовершенствующая	1.1.3.1 Облегченные малоэрозионные материалы	Разработка материала низкой плотности, устойчивого к абляционной эрозии для снижения веса двигателя
		1.1.3.2 Элементы управления расширяемым соплом с эродирующими регулировочными прокладками	Упрощение системы управления расширяемым соплом для снижения веса конструкции
ТА 1.1.4	Вспомогательная	1.1.4.1 Гибридный РД для недорогой РН для запуска наноспутников	Разработка гибридного РД для недорогой РН для запуска наноспутников
ТА 1.1.5	Вспомогательная	1.1.5.1 Моделирование физических процессов в РДТТ	Модели, имитирующие работу РДТТ, которые должны содержать тесно связанные газодинамические и тепловые, структурные и динамические инструменты для имитации поведения топливных зарядов, внутренней газодинамики и процессов горения. Модели композитного корпуса, вкладышей, изоляции и сопел двигателя. Модели оценки устойчивости к повреждениям и модели для исследования старения материалов



ТА 1.1.6	Ближайшая критическая	1.1.6.1 Перспективный пятисегментный твердотопливный ускоритель	Пятисегментный твердотопливный ускоритель для РН Block 1. Продолжение разработок четырехсегментного ускорителя для «Спейс Шатл». Обеспечит увеличение тяги РД, дающее возможность выведения на орбиту полезной нагрузки до 70 т
		1.1.6.2 Перспективный твердотопливный ускоритель повышенной мощности	Твердотопливный ускоритель для РН Block 1b и Block 2. Объединяет результаты разработок в направлениях 1.1.1 – 1.1.3 и 1.1.7 Обеспечит увеличение тяги РД, дающее возможность выведения на орбиту полезной нагрузки до 130 т
		1.1.6.3 РД для недорогой РН для запуска наноспутников	Разработка РД для недорогой РН для запуска наноспутников
ТА 1.1.7	Усовершенствующая	1.1.7.1 Полибензимидазол-акрилонитрил-бутадиеновый каучук (PBI NBR)	Разработка полимерного материала для термозащитных вкладышей и изоляции РД, не содержащего асбеста
		1.1.7.2 Изолирующие распыляемые вкладыши	Изготовление вкладышей из волокнистых полимерных каучуков. Обеспечивается улучшение целевых характеристик и снижение веса

В Дорожных картах технологий NASA также приведена информация о влиянии каждой технологии на планируемую или возможную в будущем космическую миссию NASA, причём технологии разделены на так называемые Pull- и Push-технологии. Под Pull-технологией понимается технология, «дающая возможность» (Enabling Technology в терминах Дорожных карт NASA), то есть технология, критичная для достижения неких новых желаемых потребителем свойств изделия в пределах приемлемых затрат и рисков. В противополож-

ность ей Push-технология – технология усовершенствования (Enhancing Technology), улучшающая технология, которая обеспечивает значительные преимущества по сравнению с современным состоянием изделия, но не критична для производства конкретного изделия, реализации определённой миссии или стратегического направления.

Каждая технология-кандидат представлена информационной карточкой стандартной структуры. Информационная карточка технологии 1.1.2.1 приводится в табл. 2.

Таблица 2 Информационная карточка технологии

1.1	Твёрдотопливные ракетные системы	1.1.2.1 Технологическая подготовка производства корпусов нового твердотопливного ускорителя диаметром до 4,08 м, разработка новых технологических процессов, использование новых материалов	
1.1.2	Материалы корпуса		
<b>Технологии</b>			
<b>Описание технологии:</b> новые промышленные технологии изготовления композитных и металлических компонентов корпуса, которые позволяют использовать большие твердотопливные ускорители, сохраняя при этом высокую надёжность двигательных установок и снижая затраты на производство.			
<b>Решаемая технологическая проблема:</b> технологий производства больших твердотопливных ускорителей в настоящее время не существует			
<b>Современное состояние:</b> существуют производственные технологии для изготовления корпусов малых диаметров.		<b>Цель разработки:</b> производство корпусов двигателей твердотопливного ускорителя с диаметром 4,08 м	
<b>Параметр, значение:</b>	<b>TRL</b>	<b>Параметр, значение:</b>	<b>TRL</b>
диаметр композитного корпуса РД: 1–1,5 м	3	диаметр: 4,08 м	9
<b>Разработка технологии зависит от базовых исследований или других технологий-кандидатов:</b> нет			



1.1	Твёрдотопливные ракетные системы	1.1.2.1 Технологическая подготовка производства корпусов нового твёрдотопливного ускорителя диаметром до 4,08 м, разработка новых технологических процессов, использование новых материалов			
1.1.2	Материалы корпуса				
<b>Функциональные возможности</b>					
<p><b>Необходимый потенциал:</b> технологии и технологическое оборудование для производства твёрдотопливных ускорителей диаметром 4,08 м, разработка новых технологических процессов, применение новых материалов.</p> <p><b>Описание возможностей:</b> Производство композитных и металлических компонентов для больших твёрдотопливных ускорителей при сохранении высокой надёжности двигательных установок и снижении затрат на производство. Большой твёрдотопливный ускоритель – одна из составных частей перспективной РН с грузоподъёмностью 130 т полезной нагрузки</p>					
<p><b>Современные возможности:</b> РДТТ повторного использования программы «Шатгл», металлические корпуса диаметром 3,72 м и графит-эпоксидные двигатели типа GEM – композитные корпуса диаметром 1,0–1,5 м</p>			<p><b>Цель:</b> диаметр ускорителей должен быть увеличен, чтобы соответствовать требованиям к РН Delta-V по мощности</p>		
<b>Параметр, значение:</b>			<b>Параметр, значение:</b>		
Диаметр корпуса – металлический: 3,72 м Диаметр корпуса – композитный: 1–1,5 м			Диаметр корпуса – композитный: 4,08 м		
<b>Технология необходима для следующих миссий NASA: класс миссии/DRM<sup>1</sup></b>	<b>Критичная/улучшающая</b>	<b>Дата начала миссии</b>	<b>Дата старта</b>	<b>Дата готовности технологии</b>	<b>Мин. время разработки</b>
EOW\DRM6 пилотируемый полет на астероид	Критичная	2027	2027	2021	5 лет
EOW\DRM7 пилотируемый полет на поверхность Луны	Критичная	2027	2027	2021	5 лет
PE\DRM9 пилотируемый полет на поверхность Марса	Критичная	2033	–	2027	5 лет

Отличительной особенностью данных о планируемых технологических разработках, содержащихся в информационной карточке, является оценка начального и ожидаемого по завершении работ уровня технологической готовности TRL. При оценке TRL используется шкала уровней готовности прикладных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, рекомендованная стандартами NASA [6]. Развёрнутые комментарии относительно системы оценивания уровней готовности технологий в NASA также даны в [4, с.336–339]. В приведённом примере (табл. 2) в настоящее время технология имеет TRL 3. Это означает, что проведены аналитические и лабораторные исследования, подтверждающие правильность концепции задуманных исследований, и существуют документированные аналитические и экспериментальные результаты проведённых работ, подтверждающие ключевые параметры создаваемого изделия. После завершения запланированных в проекте 1.1.2.1 работ технология будет иметь уровень готовности TRL 9, означающая, что система (в приведённом случае – комплекс технологического оборудования и технологических процессов производства корпусов большого твёрдотопливного ускорителя) создана в окончательном виде; проведены эксплуатацион-

ные и другие необходимые испытания; комплекс готов к штатной эксплуатации.

Также заслуживает внимания тот факт, что для каждой технологии в информационной карте приводятся сравнимые между собой количественные параметры, значения которых могут быть достигнуты перед началом и после завершения работ. В приведённом примере это – максимальный диаметр твёрдотопливного ускорителя.

Дорожные карты, таким образом, представляют структурированный массив данных - четырехуровневую древовидную иерархию, содержащий информацию о том, какие технологии NASA *может* разрабатывать до 2035 года.

Дорожные карты служат исходными данными для разработки стратегического плана технологических инвестиций STIP 2017, который определяет какие технологии NASA следует разрабатывать до 2035 года.

STIP, в свою очередь, является основой для формирования ежегодного бюджета NASA. По сложившейся практике STIP актуализируется каждые два года.

#### **Классификация технологий в STIP**

Разработчики STIP разделяют весь исходный материал – технологии-кандидаты из Дорожных карт на несколько категорий (классов).



Критические технологии (Critical technologies) – группа технологий, критически необходимых для реализации запланированных или проектируемых миссий, включённых в АМРМ<sup>2</sup>. Характеристическим признаком критической технологии является невозможность выполнения целевой задачи в полном объёме с заданным качеством и стоимостью без внедрения данной технологии.

Данный класс технологий разделяется на два подкласса «Ближайшие критические» (Near-term critical) и «Среднесрочные критические» (Mid-term critical). К первому относятся технологии, финансирование разработок которых уже идёт, или финансирование разработок, которых необходимо осуществлять строго в соответствии с планом. Ко второму – технологии, критичность которых не вызывает сомнений, но финансирование их разработки возможно отсрочить.

Исследовательские работы по улучшающим технологиям (Enhancing technologies) представляют собой усовершенствование эволюционным путём существующих технологий или свойств изделий и обеспечивают повышение производительности, безопасности и надёжности, снижение стоимости без потери качества, что может снизить общесистемные риски.

Трансформирующие технологии (Transformational technologies) – это инвестиции в революционные концептуальные проекты, дающие принципиально новые возможности для будущих ещё незапланированных «загоризонтных» космических проектов. Эти работы характеризует наибольший риск неуспеха, но и возможность технологического прорыва: получение изделий с принципиально новыми свойствами или кардинальные изменения в цене, надёжности или стоимости продукции. Такие исследования не только обеспечивают инновационный характер развития, но и определяют положение самой границы инноваций, двигают вперёд границу возможно, обеспечивают мировое лидерство.

Приведённые категории практически соответствуют понятиям перспективных, поддерживающих и прорывных технологий, использующихся при разработке программ технологического развития Госкорпорации «Роскосмос». Определения отечественных категорий даны в [9]. Отличие в том, что в российской практике поддерживающие и прорывные технологии включены в состав промышленных критических, что не соответствует самому определению «критичности». Американский подход представляется более корректным.

В дополнение к этому в практике NASA выделяется понятие вспомогательных технологий (Ancillary technologies), необходимых для поддержки и развития критических и улучшающих технологий. Такие технологии не требуют оценки со стратегической точки зрения, в стратегические планы не включаются и финансируются по мере необходимости.

Категории технологий для технологического направления ТА1 приведены в табл. 1.

Регламентирующие технологические документы NASA оперируют понятием «Базовые технологии» (Foundational engineering), под которыми понимаются технологии, влияющие на общий технологический уклад, культуру производства, испытаний, инженерного анализа и проектирования инженерных систем.

Базовые технологии в инвестиционном плане STIP 2017 в отдельную категорию не выделены, предполагается, что среди них есть критические, улучшающие и трансформирующие.

При разработке STIP проводится отбор и определение приоритета технологий-кандидатов в рамках дорожных карт с учётом стратегических приоритетов развития авиации и ракетостроения в США и руководящих принципов NASA для инвестиции в технологии.

Офис главного технолога NASA проводит ежегодную аналитическую оценку выполнения STIP и представляет её в Технологический исполнительный совет NASA (NTEC) и Дирекции управления миссиями. Информация может послужить причиной изменения стратегических приоритетов отдельных миссий.

Стратегический план технологических инвестиций определяет четыре принципа инвестиционной политики NASA в технологическое развитие, которые используются для анализа соответствия состояния и динамики развития портфеля инвестиций в технологии стратегическим целям NASA:

- поддержание обоснованного баланса инвестиций между всеми 15 технологическими направлениями;
- поддержание баланса инвестиций между всеми уровнями технологической готовности исследований от TRL1 до TRL9 (декларируется, что на исследования начальных уровней (TRL1 и TRL2) необходимо расходовать 10 % всех инвестиций);
- поддержание баланса между инвестициями в критические, улучшающие и трансформирующие категории технологий (NASA стремится обеспечить баланс 70/20/10, то есть целевыми уровнями инвестиций являются 70 % от общего бюджета – для критических технологий, 20 % – для улучшающих и 10 % – для преобразующих);
- открытый доступ и полная публичность структуры и содержания инвестиционного портфеля развития технологий.

В обеспечение реализации этого принципа, Дорожные карты и стратегический инвестиционный план технологического развития размещены на сайте NASA в открытом доступе [1, 2]. Также доступен любому желающему информационный ресурс Techport [7]. Techport является открытой через Internet информационно-аналитической системой NASA для поиска данных о финансируемых NASA мероприятиях по разработке технологий. Старто-

<sup>2</sup> Agency Mission Planning Model (AMPM) – план полётов (космических миссий), разработанный Агентством планирования миссий NASA [8]. В настоящее время разработан до 2035 года и периодически уточняется.



вая страница системы TechPort приведена на рис. 3. Представляя информацию о текущей деятельности, NASA позволяет научным кругам, промышленности и общественности страны оценить портфель технологических проектов, определить собственные конкретные области интересов, сравнить портфель с технологическими дорожными картами и приоритетами NASA, прогнозировать

будущие технические и технологические возможности NASA и определить потенциальные возможности партнерства в развитии технологий. TechPort делает информацию о разработке технологий легкодоступной и легко используемой, помогая NASA поддерживать предпринимательство, инновации и научные исследования в области технологий.



Рис. 3. Стартовая страница системы Techport

В STIP 2017 NASA определило десять широких инвестиционных направлений, содержащих ближайшие и среднесрочные критические технологии. В каждом направлении сгруппированы технологии из одной или нескольких Дорожных карт технологий NASA 2015 года. На финансирование данного раздела предусмотрено 70 % бюджета NASA.

Десять важнейших областей инвестиций в аэрокосмические технологии:

1. Двигательные установки.
2. Системы жизнеобеспечения и сохранения здоровья человека.
3. Целевая аппаратура, эксплуатируемая человеком на борту.
4. Робототехника и автономные системы.
5. Научные приборы, датчики и оптическая связь.
6. Легкие космические конструкции и материалы.
7. Вход в атмосферу, спуск и посадка.
8. Космические энергетические системы.
9. Информационные системы.
10. Аэронавтика.

Для каждой области экспертными методами выбираются приоритетные технологические направления третьего уровня из одной или нескольких технологических

карт. Эксперты технологического исполнительного совета NASA (NTEC) рассматривают AMPM – долгосрочный план пилотируемых и научных космических миссий NASA [8], согласованный по финансовым параметрам с Конгрессом США. Для каждой включенной в план миссии анализируются нерешенные технологические проблемы, критические для реализации миссии, выявляются технологические направления, нацеленные на решения. При этом дополнительно учитывают такие факторы, как направления и эффективность ранее сделанных инвестиций в развитие технологий, национальные приоритеты научных исследований США, внешние риски аэрокосмической промышленности США и экономики страны в целом, мнение акционеров предприятий-разработчиков и партнеров (в случае международных проектов).

Для области инвестиций «Двигательные установки» отобранные технологические направления представлены в столбце 1 табл. 3.

Важной для принятия решения о финансировании разработки технологии является информация о временных параметрах работ: даты миссий, для реализации которых данная технология критична, дата, к которой данная технология должна быть внедрена, и минимальное время, необходимое для разработки технологии. На рис. 4,



5, 6 представлены Дорожные карты миссий – диаграммы временных параметров технологий двигателестроения (рассматриваемое направление ТА1), критичных для запланированных NASA миссий: пилотируемый полет на Луну, пилотируемый полет на спутники Марса и серия исследований околоземного пространства при помощи нано-спутников, выводимых на орбиту сверхлёгкой РН. Стратегические планы NASA включают в себя гораздо большее число миссий. При формировании дорожных карт 2015 рассматривались 8 миссий директора пилотируемых полётов (HEOMD), 38 миссий директора науч-

ных исследований (SMD) и 16 стратегических направлений директора аэронавтики (ARMD) [8]. Указанные три миссии взяты исключительно для объяснения методического подхода к отбору технологий-кандидатов для финансирования их разработки из средств бюджета NASA.

Критерий отбора технологических исследований, которые подлежат финансированию в текущем году, выглядит следующим образом (рис. 4): разработка технологии финансируется, если технология включена в приоритетные технологические направления третьего уровня, критична хотя бы для одной миссии и выполняется условие.

Таблица 3. Двигательные установки

Направление третьего уровня	Индекс и технология	Описание	TRL начальный	TRL конечный
1.1.1 Топлива	1.1.1.1 Технология получения НТРВ-топлива. Полибутадиен с концевыми гидроксильными группами	Альтернативный вид твёрдого топлива повышенной мощности для РДТТ стартовых ускорителей РН	7	9
1.1.6 Интегрированные твёрдотопливные системы	1.1.6.1 Перспективный пяти сегментный твёрдотопливный ускоритель	пятисегментный твёрдотопливный ускоритель для РН Block 1. Продолжение разработок четырёхсегментного ускорителя для «Спейс Шатл». Обеспечит увеличение тяги РД, дающее возможность выведения на орбиту полезной нагрузки до 70 т	7	9
	1.1.6.2 Перспективный твёрдотопливный ускоритель повышенной мощности	Твёрдотопливный ускоритель для РН Block 1b и Block 2. Объединяет результаты разработок в направлениях 1.1.1 – 1.1.3 и 1.1.7. Обеспечит увеличение тяги РД, дающее возможность выведения на орбиту полезной нагрузки до 130 т	3	9
	1.1.6.3 РД для недорогой РН для запуска нано-спутников	Разработка РД для недорогой РН для запуска наноспутников	4	9
1.2.1 ЖРД жидкий водород/ жидкий кислород	1.2.1.1 Двигатель верхней ступени J-2X	Разработка регулируемого жидкостного криогенного ракетного двигателя для верхней ступени РН	7	9
	1.2.1.2 Модификация главного двигателя «Спейс Шатл» – RD-25D	Доработка существующего двигателя RD-25D для использования в качестве двигателя основной ступени РН Block 1	7	9
	1.2.1.3 Разработка на основе RD-25D перспективного ЖРД	Разработка перспективного ЖРД на основе RD-25D с сохранением мощности при снижении стоимости	3	9
	1.2.1.4 Объединение верхней ступени и разгонного блока	Создание двигателя, который может функционировать и для выведения на опорную орбиту, и как разгонный блок	3	9



1.2.2 ЖРД керосин/ жидкий кислород	1.2.2.1 ЖРД со стадией обогащения окислителя	Разработка большого ЖРД со стадией обогащения окислителя для использования как ускоритель первой ступени	3	9
	1.2.2.1 ЖРД с газогенераторной схемой	Разработка большого ЖРД газогенераторной схемой для использования как ускоритель первой ступени	3	9
	1.2.2.3 Недорогой ЖРД для РН для запуска наноспутников	Разработка недорогого кислород-керосинового двигателя для РН для запуска объектов нанокласса	4	9
1.4.3 Системы аварийного спасения	1.4.3.1 Двигатель с изменяемым вектором тяги	Технология использования в двигателях САС высокоманевренной системы управления вектором тяги, используемой в больших воздушных реактивных двигателях	3	6
	1.4.3.2 Интегрированный двухкомпонентный ЖРД для САС	Интегрированная с КА двигательная установка, которая используется как РД САС на высокой тяге и РД для маневрирования и ориентации на орбите на низкой тяге	3	6
	1.4.3.3 Твёрдотопливные системы выключения двигателей	Недорогие системы прекращения полёта и спасения полезной нагрузки при запуске наноспутников	3	3
2.1.2 Жидкостные криогенные двигатели КА	2.1.2.1 Основной двигатель (жидкий кислород/жидкий метан) с вытеснительной схемой	Разработка основного двигателя КА с вытеснительной схемой на жидком метане	4	6
	2.1.2.2 Основной двигатель (жидкий кислород/ жидкий метан) с турбонасосным агрегатом	Разработка основного двигателя КА с ТНА на жидком метане	3	6
	2.1.2.3 Двигатель системы ориентации и стабилизации (жидкий кислород/ жидкий метан)	Разработка двигателя системы ориентации и стабилизации КА на жидком метане	4	6
	2.1.2.4 Двигатель системы ориентации и стабилизации (жидкий кислород/ жидкий водород)	Разработка двигателя системы ориентации и стабилизации КА на жидком водороде. В ряде случаев может быть использован как основной двигатель КА	3	3
2.2.1 Электроракетные двигатели	2.2.1.1 Ионные двигатели	Ионные двигатели – электростатические РД, использующие различные методы генерации плазмы для ионизации рабочего тела. Высоковольтные решётки, которые извлекают ионы из плазмы и электростатически ускоряют их до высоких скоростей, имеют напряжение до и свыше 10 kV	5	6
	2.2.1.2 Холловские ЭРД	Разновидность ионных РД с использованием эффекта Холла	3	4



2.2.1 Электроракетные двигатели	2.2.1.3 Импульсные индуктивные двигатели 	Разработка безэлектродных импульсных электродвигателей с мощностью до 100 кВт и сроком эксплуатации до 50000 часов	3	6
	2.2.1.4 Магнитоплазодинамические двигатели 	Разработка двигателей, в которых тяга обеспечивается взаимодействием ионизированного рабочего тела с магнитными полями	3	6
	2.2.1.5 Электроспреевые двигатели	Разработка двигателей, в которых тяга обеспечивается ускорением электростатическим полем частиц проводящей жидкости (заряженных капель, скоплений молекул, отдельных молекул)	4	6
	2.2.1.6 Волновые двигатели	Разработка двигателей, которые обеспечивают тягу путём формирования плазмы с радиочастотным разрядом в осевом магнитном поле для развития геликоновой волны	3	6
	2.2.1.7 Миниатюрные холловские двигатели 	Разработка холловских двигателей мощностью менее 100 Вт для малых КА	4	6
	2.2.1.8 Миниатюрные ионные двигатели 	Разработка ионных двигателей мощностью менее 100 Вт для малых КА	4	6
	2.2.1.9 Оммические двигатели	Доработка двигателей для малых КА, в которых рабочее тело разогревается электронагревателем. Снижение массы, размеров, потребляемой мощности	9	9
	2.2.1.10 Дуговые двигатели	Доработка двигателей для малых КА, в которых рабочее тело разогревается электрической дугой	9	9
	2.2.1.11 VASIMR 	Разработка Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket (VASIMR) – мощного магнитоплазменного двигателя с переменным удельным импульсом и радиочастотным управлением плазмой	3	5
	2.2.3 Термические двигатели	2.2.3.1 Солнечные термодвигатели 	Разработка двигателя, в котором солнечная энергия через концентраторы большой площади и поглотитель передаётся рабочему телу. Обеспечивает высокий удельный импульс при низкой тяге	4
2.2.3.2 Ядерные двигатели		Разработка двигателя, использующего ядерную реакцию расщепления для нагрева рабочего тела. Дает высокий удельный импульс при высокой тяге	4	8
2.4.2 Системы хранения и транспортировки топлива	2.4.2.1 Системы пассивного термоконтроля для криогенных топлив 	Разработка термоизолирующих систем, экранов, систем отвода тепла для снижения испарения криогенных компонентов топлива	5	7



2.4.2 Системы хранения и транспортировки топлива	2.4.2.2 Системы активного термоконтроля для криогенных топлив 	Разработка интегрированных систем охлаждения баков для снижения испарения криогенных компонентов топлива	4	6
	2.4.2.3 Высокоэффективная транспортировка топлива «Бак-в бак» на КА 	Разработка технологии охлаждения баков и трубопроводов для заполнения приёмного бака без потерь на испарение	5	7
	2.4.2.4 Измерение количества топлива на космическом аппарате	Разработка технологии измерения количества криогенного жидкого топлива без импульсных манёвров КА	4	6
14.1.2 Активные системы обеспечения тепловых режимов	14.1.2.1 Криоохладители большого бака с рабочей $t = 20^{\circ}\text{K}$	Технология охлаждения баков жидкого водорода на борту КА	4	6
	14.1.2.2 Криоохладители большой емкости с рабочей $t = 50^{\circ}\text{K}$	Технология охлаждения баков жидкого кислорода и криогенных защитных систем широкого назначения на борту КА	4	6
	14.1.2.3 Криоохладители большой емкости для производства криогенных жидкостей на напланетной станции	Высокоэффективные малогабаритные системы производства жидкого кислорода на поверхности Марса	3	6
	14.1.2.4 Низкотемпературные криоохладители для систем отвода тепла	Низкотемпературные бортовые криоохладители для систем отвода тепла инфракрасных телескопов и интерферометров с температурой $18^{\circ}\text{K}$ , $4^{\circ}\text{K}$ и менее $1^{\circ}\text{K}$	4	6
	14.1.2.5 Распределённые контуры охлаждения	Системы охлаждения, уменьшающие испарение криогенного топлива из баков. Различного вида термостаты, теплообменники	5	6
	14.1.2.6 Насосы и вентиляторы 	Разработка устройств для перемещения криогенных жидкостей и газов в топливных системах и системах охлаждения КА	4	6
	14.1.2.7 Интегрированный радиатор/ криоохладитель для сжижения кислорода 	Разработка технологий сжижения кислорода на поверхности Марса и Луны производительностью $0,16 \text{ кг/ч}$ (Луна) и $2.2 \text{ кг/ч}$ (Марс)	5	6
	14.1.2.8 Криогенное топливо с высокой степенью охлаждения 	Разработка наземных криогенных топливных систем баков $1000\text{--}10000 \text{ л}$ для хранения жидкого водорода с возможностью охлаждения до $18^{\circ}\text{K}$ . Система даёт существенное снижение потерь на испарение	3	6
14.2.3 Системы теплоотвода и сохранения энергии	14.2.3.1 Система контроля загрязнённости радиаторов 	Специализированные пассивные покрытия или активный контроль загрязнённостью поверхности радиаторов	6	9
	14.2.3.2 Двухконтурная бортовая система охлаждения	Двухконтурная бортовая система охлаждения для объектов большой тепловой нагрузки	3	7



14.2.3 Системы теплоотвода и сохранения энергии	14.2.3.3 Теплообменники с изменяемой фазой	Разработка технологии получения материалов с изменяемой фазой, т.е. сохраняющих тепловую энергию в фазе нагрева в циклических процессах и отдающих тепло в фазе охлаждения	4	7
	14.2.3.4 Охлаждение через испарение	Технологии охлаждения с использованием мембранного испарителя воды	5	7
	14.2.3.5 Технология разработки радиаторов с переменным отводом тепла	Замерзающие и восстанавливающиеся радиаторы. Жидкость в них замерзает и отвод тепла прекращается в холодной среде и восстанавливается в горячей	4	7
	14.2.3.6 Радиаторы с изменяющейся геометрией	Радиаторы, регулирующие отвод тепла путём изменения излучающей поверхности	2	7
	14.2.3.7 Радиатор с переменным коэффициентом излучения	Специальные материалы покрытия, позволяющие электрически управлять количеством излучаемой энергии	3	9
	14.2.3.8 Ремонт радиаторов	Разработка оборудования, материалов и технологических процессов, необходимых для ремонта радиаторных систем КА в космосе	3	7

#### Значение фона столбца 2:

	Технология критична для миссии «Пилотируемый полет на Луну»
	Технология критична для миссии «Пилотируемый полет на спутники Марса»
	Технология критична и для миссии «Пилотируемый полет на спутники Марса», и для миссии «Пилотируемый полет на Луну»
	Технология критична для миссии «Наноспутники/сверхлёгкая РН»
	Для миссий в рассматриваемом примере технология не критична
	Технология отобрана для включения в бюджет NASA в 2018 году

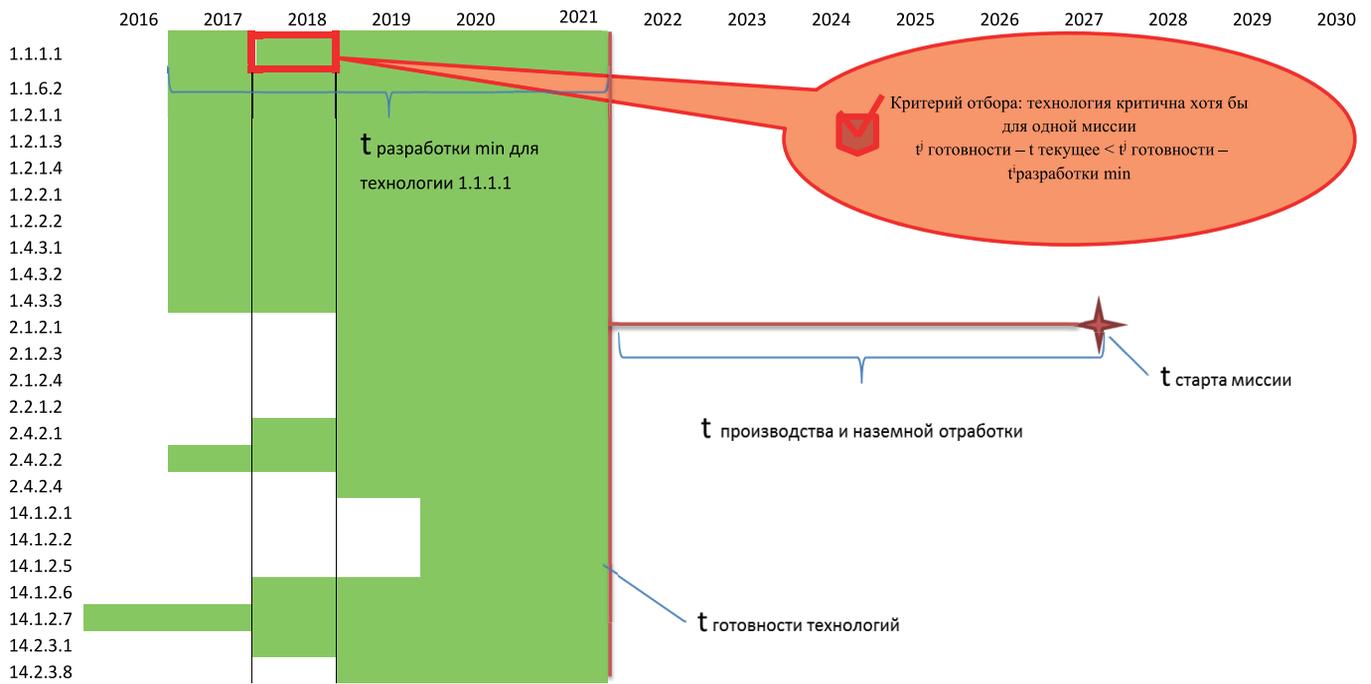


Рис. 4. Дорожная карта технологий двигателестроения, критичных для миссии «Пилотируемый полет на Луну»

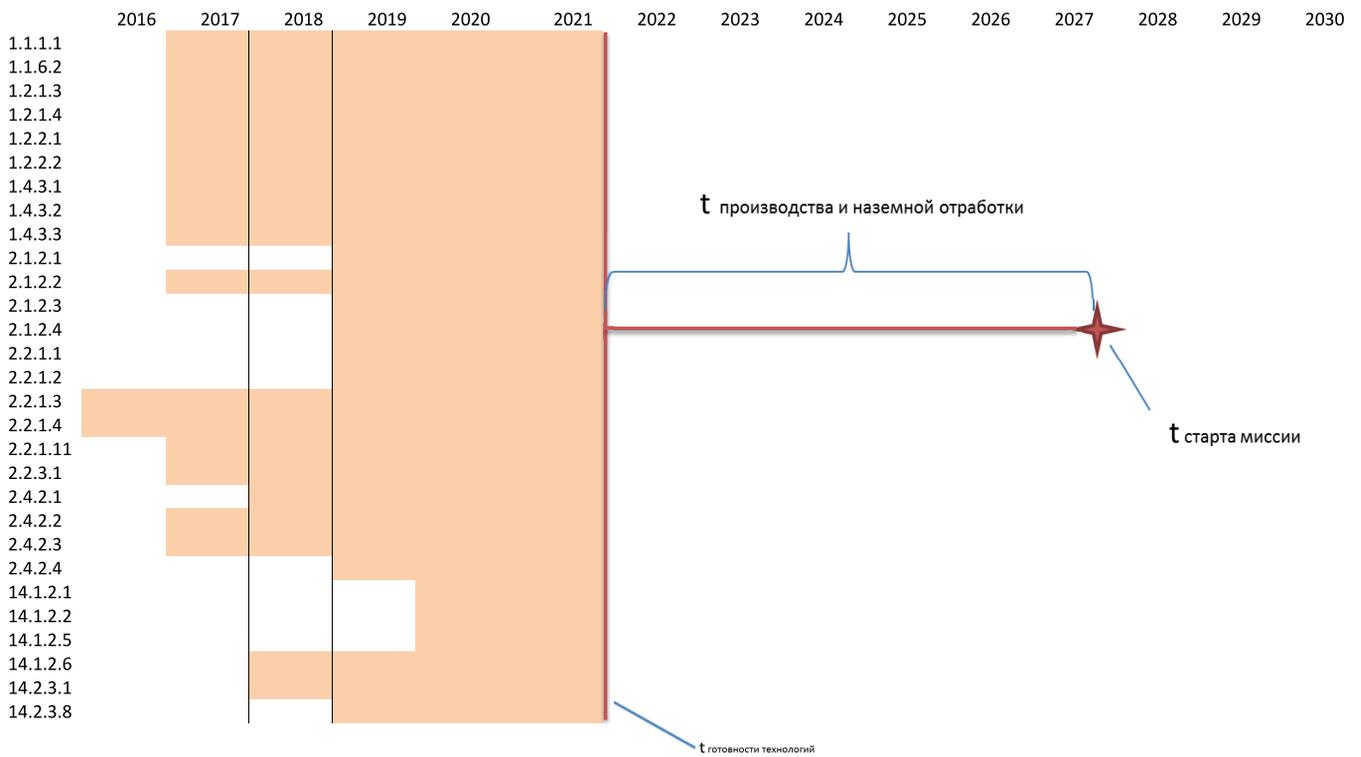


Рис. 5. Дорожная карта технологий двигателестроения, критичных для миссии «Пилотируемый полет к спутникам Марса»

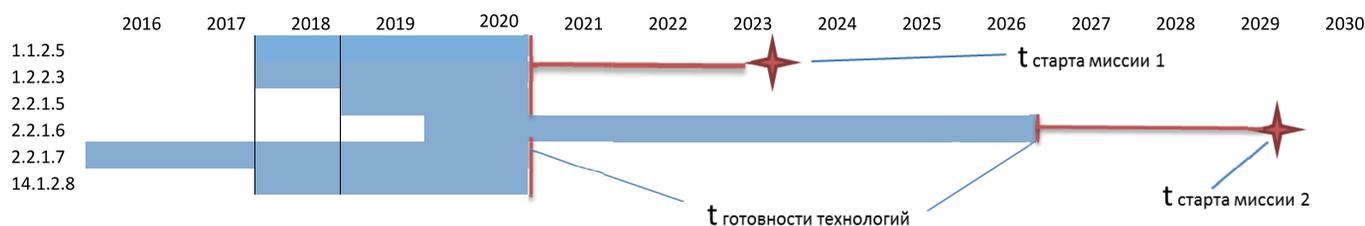


Рис. 6. Дорожная карта технологий двигателестроения, критичных для миссии «Исследования околоземного пространства при помощи наноспутников, выводимых на орбиту сверхлёгкой РН»

$$t_j^{\text{готовности}} - t_{\text{текущее}} < t_j^{\text{готовности}} - t_{\text{разработки}}^{\text{min}} \quad (1)$$

где  $t_j^{\text{готовности}}$  – срок готовности технологий  $j$ -ой миссии, зависящий от времени старта миссии и времени необходимого на производство и испытания всего комплекса технических средств миссии,

$t_{\text{разработки}}^{\text{min}}$  – минимально необходимое время разработки и внедрения  $i$ -ой технологии

$t_{\text{текущее}}$  – год, для которого формируется бюджет.

Критерий отбора последовательно применяется для каждой  $j$ -ой миссии, включённой в АМРМ, и для каждой  $i$ -ой технологии из рассматриваемого приоритетного направления третьего уровня.

Как видно из рис. 6, Дорожная карта миссии может иметь не одно время старта миссии, и, следовательно, не один рубеж готовности технологий. На рис. 6 показан запуск первого аппарата миссии в 2023 году, а затем, после готовности технологии плазменных двигателей с радиочастотным разрядом, запуск модернизированного КА с новыми двигателями.

Аналогичным образом проводится отбор технологий по каждому из 10 приоритетных направлений.

Количество работ, отобранных по каждому направлению, показано на рис. 7.

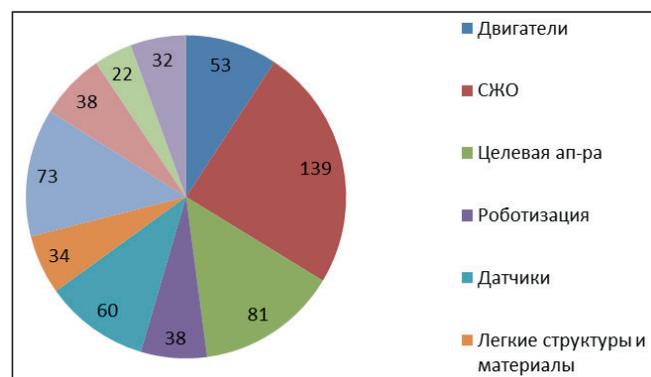


Рис. 7. Количество НИОКР, отобранных в STIP 2017 по направлениям

После формирования перечня критических технологий по каждому из 10-ти инвестиционных направлений отбираются технологии-кандидаты из категорий, улучшающих и трансформирующих. Финансирование указанных категорий должно составлять 20% и 10% соответственно.

Отбор технологий производится по критерию соответствия главным целям инвестиций в технологическое развитие.

Пример улучшающей технологии: Направление ТА 3.1.4 Радиоизотопные энергетические системы

Радиоизотопные бортовые энергосистемы длительного времени используются для питания бортовой аппаратуры КА для исследования дальнего космоса. Цель технологических исследований – повышение их мощности до 200-500 Вт, общей эффективности преобразования энергии более 30% и увеличение времени активного существования до 17 лет для возможности использования КА дальнего космоса с большим количеством энергоёмкой целевой исследовательской аппаратуры и более долгосрочных миссий.

Пример трансформирующей технологии: Направление ТА 2.3.6 Перспективный ядерный двигатель

Поиск альтернативы твёрдотельному ядерному тепловому двигателю, которая может дать более высокое значение удельного импульса. Концепции могут быть связаны с жидким или газообразным ядром реактора, специальной системой деления, требуется аналитическая работа, направленная на решение проблем размещения, запуска, охлаждения нового двигателя. Увеличение удельного импульса двигателя в 2–3 раза по сравнению с современными возможностями обеспечит кратное сокращение времени межпланетных перелётов.

Трансформирующие технологии, как правило, имеют TRL менее 3 и длительное время разработки (приведённом примере – до 13 лет).

В NASA разработкой и организационно-методическим сопровождением дорожных технологических карт и стратегического плана технологических инвестиций занимается Office of the Chief Technologist (Офис главного технолога), который напрямую подчинён директору NASA. В России аналогичную работу по созданию и сопровождению стратегических программ технологического развития выполняет центр сводного планирования – подразделение головного научно-исследовательского института Госкорпорации «Роскосмос» по технологическому и материало-ведческому направлениям ФГУП «НПО «Техномаш».

В методических подходах NASA и Госкорпорации «Роскосмос» много общего. Так, роль Дорожных карт технологического развития NASA 2015 в российской методологии выполняет Перечень базовых и критических технологий до 2025 года, одобренный решением Воен-

но-промышленной комиссии Российской Федерации от 25 мая 2016 года №18р, роль стратегического технологического инвестиционного плана STIP 2017 – разделы НИОКР ФКПР-2025 и государственной программы «Развитие ОПК на период до 2027 года» в части РКП.

Сравнительный анализ методов формирования стратегических планов отраслевого технологического развития NASA, приведённых в настоящей статье, и используемых при разработке и сопровождении российских государственных и федеральных целевых программ по развитию оборонно-промышленного комплекса и космической деятельности [5, 9, 10] позволяет выделить ряд методических положений, применяемых в NASA, которые, по мнению автора, целесообразно использовать в отечественной практике.

**Классификация технологий-кандидатов.** Разработка и сопровождение долгосрочных стратегических программ организационно оформлены как общесистемная НИР, объектом исследования которой является совокупность заявок НИОКР на разработку технологий. Первичная классификация объекта исследований – важный методологический этап в любой научной работе. Первым этапом обобщения данных о заявках предприятий на проведение НИОКР технологической направленности для включения их в государственную (федеральную целевую) программу (технологий-кандидатов в американской терминологии) целесообразно провести их классификацию по технологическим направлениям с использованием иерархической структуры, подобной изображенной на рис. 1. Создание такого классификатора, учитывающего специфику космической деятельности в России – серьёзная научно-методическая задача, которая ждёт своего решения. Причём, как указано в [9], ракетно-космическая техника (РКТ) вне зависимости от ее назначения характеризуется идентичностью технологий разработки, изготовления и использования, высокой степенью внутриотраслевой унификации и единой производственно-технологической и экспериментально-испытательной базой. Следовательно, такой классификатор должен быть единым для программ, относящихся к созданию РКТ военного, научного, социально-экономического и двойного назначения.

Использование стандартизированной **шкалы уровней готовности технологий** и других измеримых количественных параметров. Концепции шкалы TRL уже более 40 лет, шкалирование уровней технологической готовности широко используется американскими и европейскими специалистами в аэрокосмической, энергетической, химической и других наукоёмких отраслях промышленности. В частности, в информационной карте технологии-кандидата (табл. 2) приведены начальные и ожидаемые после завершения работ значения TRL. Применение единой шкалы TRL позволяет сравнивать между собой эффективность различных вариантов инвестиций в технологические НИОКР. Использование TRL и других измеримых

количественных параметров исследований способствует тому, что в STIP включаются преимущественно работы с конкретным результатом: изменение уровня готовности технологии, прогресс количественных параметров, таких как, например, увеличение диаметра корпусов твёрдотопливных ускорителей с 1,5 до 4 м в технологии 1.1.2.1.

По сути, шкала TRL является шкалой стадий жизненного цикла изделий.

В России также существуют государственные и отраслевые стандарты, характеризующие стадии жизненного цикла изделий. Но российские нормативные документы имеют принципиальное отличие от шкалы TRL: они устанавливают стадии жизненного цикла изделий и материалов, а не технологий, и по этой причине в процессе отбора НИОКР при формировании программ технологического развития не используются.

Разработка шкалы уровней готовности технологий и методик ее использования при формировании программ технологического развития с учётом российских институциональных и нормативных особенностей – актуальная задача, результат решения которой может быть использован в создании системы измеримых количественных параметров и критериев при обосновании приоритетов НИОКР технологической направленности.

**Управление временными ресурсами работ.** Проводится анализ дорожных карт технологий, критичных для той или иной миссии (рис. 4–6), что позволяет определить оптимальное время начала исследований. Дополнительно анализируется длительность выполнения исследований и их результативность т.е. количество миссий, которые смогут использовать результаты разработки технологии. Такие данные содержатся в информационных картах (табл. 2). Приоритет при прочих равных условиях отдаётся менее длительным и наиболее результативным работам.

Благодаря эффективной методологической системе, в частности, использованию приведённых методических приёмов, стратегический план технологических инвестиций NASA (STIP 2017) качественно отличается от Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы [13] по ряду системных параметров:

1. В STIP включены только исследовательские проекты с измеримой практической значимостью. Работы по фактической эксплуатации уже существующих систем под видом опытно-конструкторских работ или многолетние исследования абстрактных категорий без изменения уровня готовности технологии отсутствуют.

2. STIP составляют преимущественно краткосрочные и среднесрочные исследования. Средняя длительность работы в STIP 2017 – 4,46 года<sup>3</sup>, средняя длительность НИОКР в ФКПР – в настоящее время – 16 лет, к 2025 году сократится до 11,8 лет. Для STIP характерно гибкое управление временными ресурсами: сроки начала работ (и финансирования) обоснованы и привязаны к конкретной миссии.

<sup>3</sup> Рассчитано автором по данным [1] и [2], направление 10. Аэронавтика для чистоты сравнения с ФКПР не рассматривалось



3. Результаты большинства (86,2%) технологических разработок будут использованы более, чем в одной миссии.

4. Из инвестиционного плана исключены второстепенные работы, не имеющие стратегического значения.

5. Установлена заранее и выполняется квота на критические, улучшающие и трансформирующие технологические работы. Тем самым гарантирована не только реализация в срок запланированных миссий, но и модернизация существующих технологий и создание

научно-технологического задела для миссий «за горизонтом».

По мнению автора, внедрение в практику формирования и научно-методического сопровождения стратегических программ развития отечественной РКП изложенных в статье методических приёмов будет способствовать эффективности управленческих решений в обеспечение технологического развития российской РКП и, в конечном итоге, рациональному использованию государственных бюджетных средств, выделяемых на эту цель.

### Список сокращений

ГПВРД	Гиперзвуковой прямоточный воздушный ракетный двигатель
ЖРД	Жидкостной ракетный двигатель
ИАС	Информационно-аналитическая система
КА	Космический аппарат
НИОКР	Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ПВРД	Прямоточный воздушный ракетный двигатель
РД	Ракетный двигатель
РДТТ	Ракетный двигатель твёрдотопливный
РКП	Ракетно-космическая промышленность
РКТ	Ракетно-космическая техника
РН	Ракета-носитель
САС	Система аварийного спасения
СЖО	Системы жизнеобеспечения
ФКПР	Федеральная космическая программа России
ЭРД	Электрический ракетный двигатель
ARMD	Директорат аэронавтики NASA
AMPM	План полетов (космических миссий), разработанный Агентством планирования миссий NASA
DRM#	Идентификатор запланированной NASA миссии
NEOMD	Директорат пилотируемых полётов NASA
HTBP	Полибутадиен с концевыми гидроксильными группами. (Топливо РДТТ)
NASA	Национальное аэрокосмическое агентство США
NTEC	Технологический исполнительный совет NASA, экспертный орган по отбору технологий для включения в инвестиционный план.
SMD	Директорат научных исследований NASA
STIP	Стратегический план технологических инвестиций
ТА	Технологическая область, технологическое направление исследований
TRL	Уровень технологической готовности
VASIMR	Магнитоплазменный двигатель с переменным удельным импульсом и радиочастотным управлением плазмой
ВРД	воздушные ракетные двигатели



### Список литературы

1. 2017, NASA Strategic Technology Investment Plan. NASA, Office of the Chief Technologist: [Электронный ресурс].- URL:[https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2017-8-1\\_stip\\_final-508ed.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2017-8-1_stip_final-508ed.pdf) (дата обращения по ссылке 24.05.2018).

2. 2015 NASA Technology Roadmaps. NASA, Office of the Chief Technologist. s.l. : [Электронный ресурс].- URL:<https://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html> (дата обращения по ссылке 24.05.2018).

3. High Speed Propulsion Cycles. V.Balepin 2007 NATO Science and Technology Organization: [Электронный ресурс].- URL:[https://www.sto.nato.int/publications/STO\\_Educational\\_Notes/RTO-EN-AVT-150/EN-AVT-150-02.pdf](https://www.sto.nato.int/publications/STO_Educational_Notes/RTO-EN-AVT-150/EN-AVT-150-02.pdf) (дата обращения по ссылке 05.06.2018).

4. Рогозин Д.О., Шеремет И.А., Гарбук С.В., Губинский А.М. Высокие технологии в США: опыт министерства обороны и других ведомств // М.: Московский университет, 2013

5. Гапоненко О.В. Методическое и аналитическое обеспечение создания и сопровождения стратегической программы технологического развития ракетно-космической промышленности // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. №4. С.21–30.

6. NASA Systems Engineering Processes and Requirements 2013-2018, Appendix E. Technology Readiness Levels: [Электронный ресурс].- URL:<http://snebulos.mit.edu/projects/reference/NASA-Generic/>

NPR\_7123\_1B.pdf(дата обращения по ссылке 30.05.2018).

7. Информационно-аналитическая справочная система Techport: [Электронный ресурс]. URL: <https://techport.nasa.gov/home> (дата обращения по ссылке 30.05.2018).

8. Index of Technologies by Design Reference Mission (Appendix E) Introduction, Crosscutting Technologies, and Index, 2015 NASA Technology Roadmaps. NASA, Office of the Chief Technologist, p.50–67: [Электронный ресурс].- URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2015\\_nasa\\_technology\\_roadmaps\\_ta\\_0\\_introduction\\_crosscutting\\_index\\_final\\_0.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2015_nasa_technology_roadmaps_ta_0_introduction_crosscutting_index_final_0.pdf) (дата обращения по ссылке 21.06.2018).

9. Кондратенко А.Н., Олексенко И.А. Особенности планирования технологических НИОКР и капитальных вложений РКП в рамках государственных и федеральных целевых программ// НТБ Вестник «НПО «Техномаш». 2018. № 5. С.12–18.

10. Николаев В.Д. и др. Инвентаризация НИОКР и инвестиционных проектов, реализуемых в рамках ФЦП, как инструмент приоритизации программных мероприятий // НТБ Вестник «НПО «Техномаш». 2017. №3. С. 61–65.

### (Footnotes)

1. Класс миссии – группа миссий, объединённая общей схемой технического решения. EOW-Exploring Other Worlds (Исследование других миров), PE –Planetary Exploration (Исследование планет); DRM# – идентификатор запланированной NASA миссии.

### ◆ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ





УДК 338.27

Галкин Н.А., Чирюкин Е.В., Митин Н.Н., Свиридова Е.С.

## Оценка реализуемости космических и коммерческих программ на основе расчёта загрузки производственных возможностей предприятий РКП

В статье рассматривается определение реализуемости на основе расчёта загрузки производственных возможностей головных предприятий-изготовителей средств выведения, космических аппаратов и жидкостных ракетных двигателей, учитывая период выполнения опытно-конструкторских работ и темп снижения трудозатрат в зависимости от порядкового номера изделия с начала изготовления и до конца производства изделий.

**Ключевые слова:** ракетно-космическая промышленность, трудоёмкость, загрузка предприятия, производственные возможности.

Мировой рынок космических изделий характеризуется устойчивой конкуренцией между известными производителями ракетно-космической техники (РКТ).

Отечественная ракетно-космическая промышленность (РКП) характеризуется неритмичностью загрузки производственных возможностей головных предприятий-изготовителей. В связи с этим для поддержания конкурентоспособности отечественной РКП необходимы современные средства планирования производства [2, 5].

Конкурентоспособность отечественных предприятий космической отрасли на мировом рынке в значительной степени определяется качеством и объёмом выпускаемой продукции, которая зависит от производственных возможностей предприятия.

Специалистами центра сводного планирования ФГУП «НПО «Техномаш» в целях определения реализуемости рассчитывается загрузка производства на головных предприятиях-изготовителях по выпускаемой номенклатуре ракетно-космической техники (РКТ) и прочим работам, не связанных с производством ракетной тематики. Схема расчёта прогноза производственных возможностей показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчёта прогноза загрузки производственных возможностей головных предприятий-изготовителей РКП

Для определения трудозатрат на продукцию головных предприятий РКП используются «Математические модели для расчёта трудоёмкости изготовления РКТ». Данные модели использовались в рамках работ по НИР «НТС-ИП» и хорошо зарекомендовали себя при планировании и экспертизе проектно-конструкторских работ новых и модернизируемых изделий. В качестве базовой единицы расчёта трудоёмкости принимается трудоёмкость изготовления первого изделия лётно-конструкторских испытаний (ЛКИ). Расчётная трудоёмкость не учитывает трудозатраты на изготовление материальной части.

Оценка трудозатрат проводится с учётом статистики по изделиям, находящимся в производстве, и перспективным изделиям с учётом объёмов опытно-конструкторских работ (ОКР).

Математические модели разработаны на базе фактической трудоёмкости изготовления и статистических данных конструктивно-технологических характеристик изделий РКТ.

Необходимыми данными для расчёта программ производства головных предприятий служит перечень космических аппаратов (КА), запуск которых осуществляется в сроки, установленные Федеральной космической программой России, утверждённой постановлением Правительства Российской Федерации.

На уменьшение трудозатрат производства изделий РКТ влияют следующие основные факторы:

- уровень квалификации персонала;
- уровень развития технологий на предприятии;
- наличие и уровень соответствующего оборудования, технологической оснастки, приспособлений и инструментов, необходимых для производства актуальной и планируемой продукции.

Снижение трудозатрат единичного производства при выполнении ОКР не проводится. На этапе ЛКИ снижение трудозатрат производится в зависимости от порядкового номера изделия с начала изготовления и рассчитывается согласно формуле:

$$T_N = T_1 * N^{\alpha}, \quad (1)$$

где:  $T_1$  – трудоёмкость изготовления изделия с начала производства;

$N$  – порядковый номер изделия с начала производства;



$\alpha$  – темп снижения трудоёмкости в процессе производства.

#### Расчёт программы производства средств выведения с учётом коэффициента, характеризующего темп снижения трудоёмкости

Производство средств выведения (СВ) на этапе ОКР носит единичный характер.

Этап производства поставочных СВ является мелкосерийным производством с возможными конструктивными особенностями отдельных изделий под задачи полёта и полезной нагрузки.

**Таблица 1. Значения коэффициентов, характеризующих темп снижения трудоёмкости изготовления СВ, в процессе освоения производства**

Количество выпускаемых изделий в год	до 10 шт/год	более 10 шт/год	более 20 шт/год
Темп снижения ( $\alpha$ )	0,12	0,13	0,15

#### Расчёт программы производства КА с учётом коэффициента, характеризующего темп снижения трудоёмкости

Степень снижения трудоёмкости  $\alpha = 0,12$  характерна для годового масштаба выпуска КА в год от 1 до 3 шт. Данное значение  $\alpha$  справедливо как для автоматических, так и для пилотируемых КА. Для крупногабаритных КА (КА «НЭМ», КА «Ионосфера») индивидуального проектирования и производства, снижения трудоёмкости не предусмотрено [1].

#### Расчёт программы производства жидкостных ракетных двигателей с учётом коэффициента, характеризующего темп снижения трудоёмкости

Расчёт снижения технологической трудоёмкости изготовления жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на стадии освоения мелкосерийного производства, рекомендуется корректировать путём умножения на коэффициент  $K_{сн}$ , который учитывает динамику снижения технологической трудоёмкости в процессе освоения серийного производства ЖРД рассчитывается по формуле:

$$K_{сн} = N^{-0,11}, \quad (2)$$

где:  $K_{сн}$  – коэффициент, характеризующий темп снижения трудоёмкости в процессе освоения производства;

$N$  – порядковый номер изделия с начала производства.

Следует отметить, что расчёт производится для ЖРД тягой более 400 т/сил.

Практически все ракеты-носители (РН) (РН «Протон», РН «Союз» и т.п.) имеют жизненный цикл в производстве порядка 40–50 лет, разгонные блоки (РБ) (РБФ, РБ «Бриз») – 20–30 лет при модернизации и улучшении тактико-технических характеристик в течение всего жизненного цикла [3].

Расчётные значения полученных по статистическим данным коэффициентов  $\alpha$ , характеризующих темп снижения трудоёмкости изготовления СВ в процессе освоения производства, приведены в табл. 1.

Расчётные значения коэффициентов, характеризующих темп снижения трудоёмкости изготовления ЖРД новой разработки в процессе освоения производства представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Расчётные значения коэффициентов, характеризующих темп снижения трудоёмкости изготовления ЖРД новой разработки, в процессе освоения производства**

Порядковый номер с начала производства ЖРД	1	5	10	20	50	100
Коэффициент снижения ( $K_{сн}$ )	1,000	0,837	0,776	0,719	0,650	0,600

Расчёт загрузки производственных возможностей головных предприятий-изготовителей РКТ позволяет определить возможности для изготовления новых изделий, реализуемость программы ФКП в части затрат, выявление узких мест на производстве, необходимость совершенствования и внедрения современных технологий [4, 6].

Пример ритмичной загрузки производства показан на графике 1.

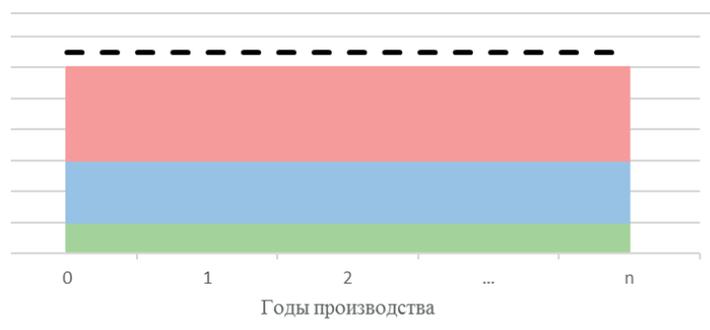


График 1. Структура загрузки производственных возможностей на «типовом предприятии» в тыс. н. час.



УДК 629.78:657.372

*Кузин А.И., Пырялин А.А., Серенков П.А.*

## Методический подход к оценке эффективности мероприятий реконструкции и технического перевооружения при реализации инвестиционных проектов

ФГУП «НПО «Техномаш» осуществляет работы по выдаче экспертных заключений обоснований экономической целесообразности реализации инвестиционных проектов на соответствие целям проекта. Изложенный методический подход может быть успешно использован при сравнительном анализе вариантов технологических схем производства при реализации планируемых инвестиционных проектов.

**Ключевые слова:** обоснование экономической целесообразности инвестиционного проекта, реконструкция и техническое перевооружение, имитационное моделирование, теория расписаний, технологический процесс, выявление узких мест, вероятность достижения цели инвестиционного проекта.

В процессе обоснования технической (технологической) и экономической эффективности планируемых инвестиционных проектов возникает необходимость проведения количественных оценок достигаемого эффекта от проводимых мероприятий по реконструкции и техническому перевооружению производственных мощностей предприятий ракетно-космической промышленности (РКП).

Существующие методы оценки опираются, главным образом, на экономические подходы, когда степень целесообразности выполнения того или иного инвестиционного проекта определяется сроком и динамикой окупаемости ресурсов, вкладываемых на начальном этапе его реализации. Вместе с тем, в целом ряде случаев полученные результаты носят общий характер и не полностью отражают влияние мероприятий, реализуемых в рамках инвестиционного проекта, на достижение его цели, которая в большинстве случаев заключается в обеспечении выпуска заданного объёма продукции с определёнными требованиями по качеству.

Особую остроту данная сторона проблемы приобретает при анализе правильности и целесообразности выбора технологического оборудования, приобретаемого в рамках конкретного инвестиционного проекта. При этом следует учесть, что стоимость технологического оборудования составляет значительную, практически определяющую, долю стоимости проекта в целом. В этой связи недоучёт технологической составляющей, как и недостаточно обоснованная оценка этой компоненты, может повлечь самые серьёзные последствия, включая необоснованные затраты на его реализацию.

Учитывая изложенное, особую актуальность на начальном этапе реализации инвестиционных проектов приобретает проведение обоснование степени (уровня) технической (технологической) эффективности.

В общем виде задача оценки технической (технологической) эффективности инвестиционного проекта может быть сформулирована следующим образом.

Дано:

1. Производственная программа выпуска изделий ракетно-космической техники (РКТ) (составляющих элементов, деталей и сборочных единиц и др.), реализуемая

на производственных мощностях промышленного объекта, подвергающегося реконструкции и техническому перевооружению.

2. Общие сведения о технологическом (директивном технологическом) процессе производства изделий РКТ в виде последовательности технологических операций, характеризующихся длительностью, очередностью выполнения и другими параметрами.

3. Перечень технологического оборудования, задействованного при реализации технологического процесса с набором технических характеристик, определяющих достижение требуемых показателей конечной продукции.

4. Взаимное расположение обрабатывающих центров, расстояния между ними внутри цеха, наличие и вместимость цеховых кладовых, характеристики и количество транспортных механизмов – для учёта влияния логистических факторов на свойства производственной системы. Аналогично – для межцеховых и межзаводских перемещений.

**Требуется:**

1. С использованием методов математического моделирования разработать методику оценки эффективности предлагаемых в рамках инвестиционного проекта технических (технологических) решений, применяя в качестве целевого показателя эффективности «вероятность достижения цели инвестиционного проекта при использовании принятого технологического процесса и предлагаемого набора технологического оборудования для его реализации».

2. С применением разработанной методики оценить уровень оптимальности выбора планируемого к приобретению и внедрению технологического оборудования и выработать рекомендации по изменению его состава (при необходимости).

Для решения сформулированной задачи возможности детерминированных методов весьма ограничены ввиду значительных сложностей однозначного описания всех элементов и связей между ними в производственной системе. Кроме того, ряд процессов, происходящих в такой системе, носит случайный характер. Поэтому для решения задачи оценки вероятности достижения цели того или



иного инвестиционного проекта целесообразно использовать методы имитационного моделирования.

Исторически сложились три направления имитационного моделирования сложных систем:

- дискретно-событийный подход;
- динамика систем;
- мультиагентные системы.

При проектировании производственных систем «с нуля» в настоящее время применяются все три указанных направления для выявления всех особенностей проектируемой системы, анализа чувствительности системы к тем или иным факторам, построения «поверхности отклика», планирования серии «имитационных экспериментов». В данном процессе формируется некое множество моделей для поиска оптимума по более чем одному критерию.

В общем случае набор критериев может содержать следующие показатели:

- производственная мощность;
  - надёжность (вероятность того, что система или процесс будет выполнять заданные функции без отказов в течение заданного времени при условии правильной эксплуатации в указанных условиях);
  - стоимость владения (т.е. не только стоимость оборудования и пуско-наладочных работ, но и стоимость владения в течение всего срока эксплуатации и утилизации);
  - время готовности системы к началу эксплуатации (дата запуска);
  - ресурс системы (срок жизненного цикла), учитывающий не только физический износ, но и моральный;
  - модернизируемость (возможность произвести апгрейд системы при изменении требований к системе в силу изменившихся внешних условий либо при выработке ресурса отдельных её элементов);
  - иные специальные критерии в зависимости от требований заказчика.
- Такая исследовательская работа требует значительных затрат времени на этапе проектирования (что компенсируется существенным сокращением затрат в дальнейшем).

Однако существующий в настоящее время порядок исследования обоснований экономической целесообраз-

ности реализации инвестиционного проекта (далее – ОЭЦ) на соответствие целям проекта накладывает ряд ограничений на сроки и стоимость такого исследования, соответственно, диктует необходимость упрощения процесса исследования (имитационного моделирования). Качество модели оценивается тем, насколько хорошо в ней сочетаются два противоречивых начала – реализм и простота. Модель должна быть, с одной стороны, достаточно хорошо приближена к реальной системе и, следовательно, включать наиболее важные аспекты последней, а с другой – достаточно проста, чтобы позволить понять её основные свойства для эффективного использования. К сожалению, реалистичные модели редко бывают простыми, а простые – зачастую далеки от действительности.

В случае исследований ОЭЦ требуется сравнить действующую систему с одним или двумя вариантами изменений в исходном составе оборудования, что несколько упрощает дело, однако не настолько, что возможно просто применение традиционных техник имитационного моделирования. Ключевое ограничение – время, выделяемое на подготовку данных для того или иного пакета специализированного программного обеспечения (ПО).

Предлагаемый подход состоит в том, чтобы при определенных допущениях сначала оценить теоретически возможную максимальную производственную мощность производственной системы «как есть» (до проведения модернизации/техпереворужения), затем при тех же допущениях оценить теоретически возможную максимальную производственную мощность производственной системы «как будет» в предлагаемых вариантах ОЭЦ.

Затем, используя данные о соотношении теоретически возможной и фактической производственной мощности производственной системы «как есть», интерполировать их на состояние «как будет» и сделать оценку фактической мощности системы «как будет».

Расчёт теоретически возможной производственной мощности предлагается проводить методами теории расписаний, в настоящее время достаточно хорошо изученной. Указанные методы реализованы в программных продуктах ведущих мировых производителей программного обеспечения для задач производственного планирования.

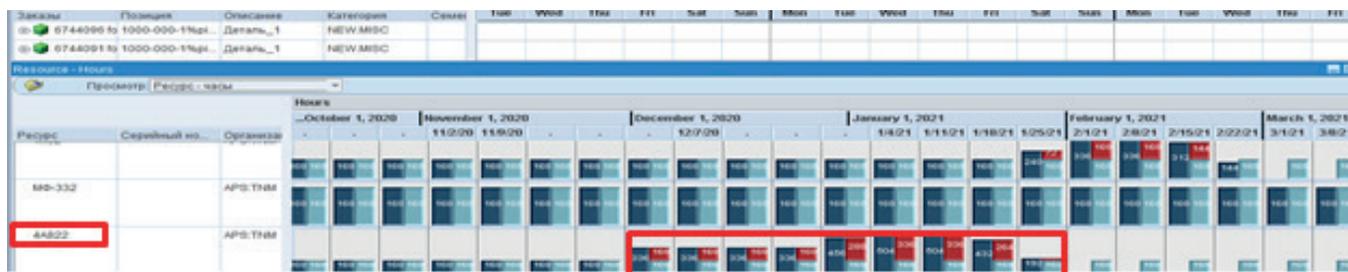


Рис. 1. В результате моделирования выявлен перегруз оборудования, соответственно, для реализации запланированной производственной программы требуются ещё ресурсы (станки)



Рис. 2. В результате перепланирования с учётом добавления одного дополнительного станка нет перегруза оборудования и можно сделать вывод что с данным ресурсным обеспечением заданная производственная программа реализуема в намеченные сроки

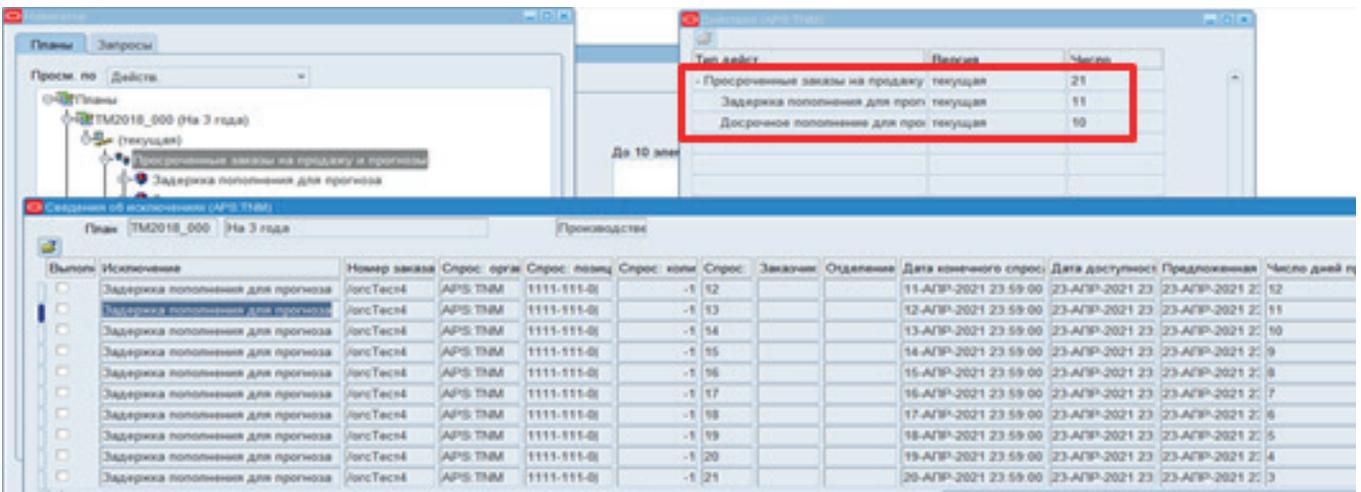


Рис. 3. В результате моделирования система сообщает, что часть изделий по заданной производственной программе на заданном оборудовании может быть выпущена только с просрочкой

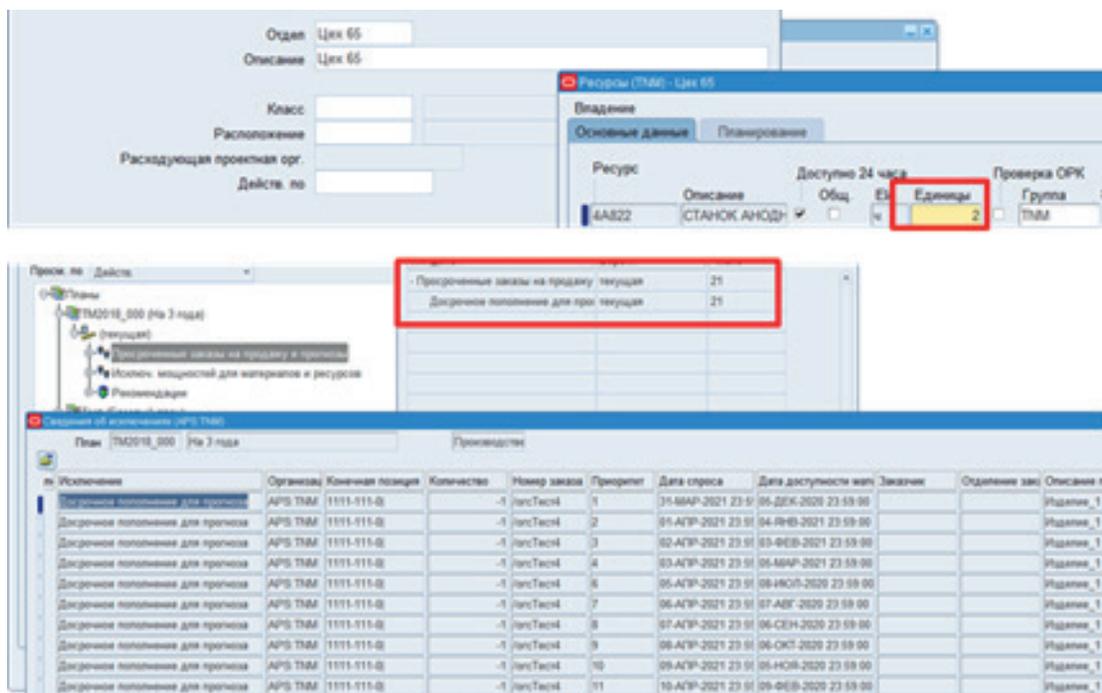


Рис. 4. В результате перепланирования с учётом добавления дополнительных ресурсов, система определяет, что все изделия по производственной программе будут изготовлены с опережением сроков



#### Проблемы:

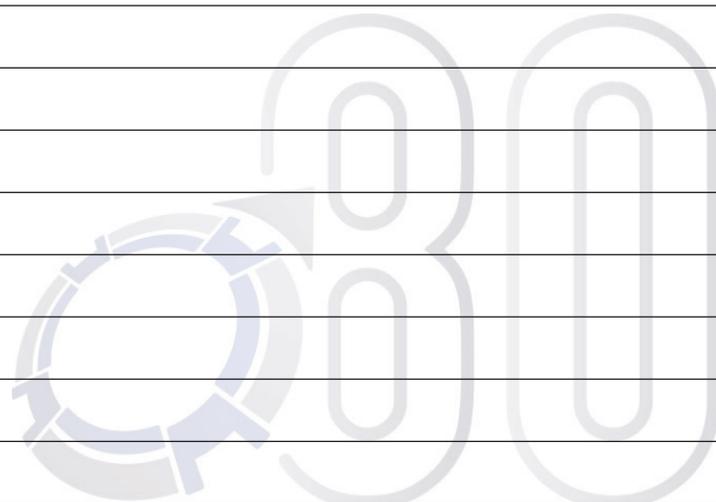
1. Оценка и сопоставление теоретически возможной максимальной мощности систем «как есть» и «как должно быть» производится, исходя из допущения: оборудование не выходит из строя, персонал работает строго в соответствии с установленным режимом труда и отдыха, смежники и поставщики сырья и комплектующих обеспечивают необходимыми материалами в соответствии с имеющимися планами, логистика работает с нулевыми задержками. Одним словом, условия идеальны. Однако «старая» и «новая» системы могут существенно различаться как по надёжности, так и по времени выполнения технологических операций, следовательно, сопоставление моделей может оказаться некорректным. Именно поэтому в исследованиях производственных систем моделированию влияния поломок оборудования и прочих причин внеплановых простоев уделяется много внимания. В данном исследовании вопросы надёжности остались за рамками работы.

2. При подготовке предложений по техпереворужению/модернизации отдельного предприятия его руководство действует, исходя из собственной информации, не обладая полной картиной по всей отрасли, т.е. происходит локальная оптимизация отдельных предприятий. Однако, как известно, сумма локальных оптимизаций подсистем не даёт оптимизации системы.

3. Снижение показателей эффективности деятельности предприятия в краткосрочной и среднесрочной перспективе при внедрении новых технологий заключается в высоком риске для руководителей предприятий. Для отдельного конкретного предприятия безопаснее ограничиться заменой оборудования, выработавшего свой физический ресурс, на аналогичное новое без изменения техпроцесса.

Несмотря на все отмеченные проблемы, изложенный методический подход может быть успешно использован при сравнительном анализе вариантов технологических схем производства при реализации планируемых инвестиционных проектов.

#### ♦ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

## ◆ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И ПАЙКИ

УДК 629.78:621.791

*Илюшкин В.Ю., Смирнов А.Г., Мучило Ф.М., Чубанов А.С., Сушко В.М.*

### Внедрение дуговой сварки в инертных газах с импульсным газодинамическим воздействием на сварочную ванну на предприятиях отрасли

В статье рассмотрены практические вопросы внедрения технологии ВИГ-сварки с импульсным газодинамическим воздействием на сварочную ванну за счет попеременной подачи защитных газов с разными теплофизическими свойствами и сформулирован ряд требований к автоматической установке для сварки продольных швов.

**Ключевые слова:** автоматическая сварка продольных швов, попеременная подача защитных инертных газов, гидродинамическое воздействие на сварочную ванну.

В настоящее время наиболее эффективным способом управления формированием сварного шва при сварке неплавящимся электродом в среде инертных газов является использование импульсных режимов сварочного процесса. Технические достижения в области силовой / управляющей электроники и мехатроники позволяют с высокой точностью и быстродействием задавать в импульсном режиме следующие параметры:

- сварочный ток  $I_{св}$ ;
- скорость подачи сварочной проволоки  $V_{пр}$ ;
- скорость сварки  $V_{св}$ ;
- скорость поперечных колебаний электрода  $V_{пк}$ ;
- подача защитного газа.

Возможность реализации импульсных режимов параметров 1–4 присутствует практически во всех системах управления производителей сварочного оборудования как российских, так и зарубежных, являясь обязательным маркером современного высокотехнологичного оборудования. В зависимости от реализованных алгоритмов указанные выше системы могут быть разомкнутыми или замкнутыми относительно параметров сварочного процесса. В случае замкнутых систем речь идёт о синергетическом управлении, которое обладает следующими особенностями:

- характеризуется неточностью работы при случайных изменениях параметров сварки;
- предъявляет высокие требования к подготовке сварного соединения под сварку;
- ограничивает возможности инженера-технолога в поиске решения проблем, возникающих при отработке технологии сварки.

Положительный эффект от попеременной импульсной подачи защитных газов с различным потенциалом ионизации (Ar/He) рассмотрен и обоснован в работах В.И. Кулика и О.М. Новикова. Установлено, что применение попеременной импульсной подачи аргона и гелия приводит к получению мелкозернистой структуры, улучшению механических свойств и повышению технологической прочности свариваемых материалов. Особенно отчётливо преимущества попеременной импульсной подачи защитного газа по сравнению с практикуемой ВИГ-сваркой в среде аргона или гелия проявляются при сварке изделий толщиной от 2 до 5 мм и из высокопрочных материалов.

Например, для алюминиевых сплавов 1201 и 1420 результаты испытаний на сопротивляемость образованию горячих трещин (проба «рыбий скелет») показали снижение коэффициента трещинообразования с 38% до 19% и с 45% до 28% соответственно.

По мнению В.И. Кулика и О.М. Новикова положительный эффект обеспечивается следующими факторами:

- комбинированным попеременным воздействием высокотемпературной дуги в гелии и низкотемпературной дуги в аргоне, при котором «гелиевый импульс» обеспечивает глубокое проплавление свариваемого стыка, а «аргоновый импульс» служит для стабилизации дуги и приповерхностной тепловой обработке;
- различные теплофизические свойства защитных газов (плотность и теплопроводность) приводят к тому, что динамическое давление аргона примерно в 24 раза больше, чем у гелия при одном и том же расходе газа и, тем самым, осуществляется импульсное ударное воздействие на кристаллизующийся металл шва, которое распространяется на всю глубину сварочной ванны.

По результатам проведённых работ получен патент RU 2 130 370 C1 (Патентообладатель: ФГУП «НПО «Техномаш»). Авторы: Новиков О.М., Кулик В.И.).

В настоящее время во ФГУП «НПО «Техномаш» в рамках опытно-конструкторской работы (ОКР) «Прогресс-2025» ведётся разработка технологии аргонодуговой сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с импульсным газодинамическим воздействием на сварочную ванну. По результатам данной ОКР будет создана установка (рис. 1) для сварки продольных швов обечеек из сталей и алюминиевых сплавов толщиной 2–4 мм и 2–6 мм соответственно и разработана технология их сварки. Отличительной особенностью создаваемой установки является специальная сварочная горелка для импульсной подачи газа (рис. 2) и система импульсной подачи газа. Конструкция специальной сварочной горелки позволяет создавать два газовых потока: внутренний, для осуществления импульсного газодинамического воздействия на сварочную ванну, и внешний, для защиты кристаллизующегося металла шва и ОШЗ.

Эксперименты, проводимые на макете установки (рис. 3.), решали следующие задачи:



– уточнение и подтверждение конструктивных решений по отдельным элементам установки, которые сложно предусмотреть на начальном этапе проектирования;

– определение граничных условий применения ВИГ-сварки с гидродинамическим воздействием на сварочную ванну, обусловленных физическими свойствами процесса;

– поиск режимов сварки с импульсным гидродинамическим воздействием на сварочную ванну для стали 12Х18Н10Т толщиной 4 мм и для алюминиевого сплава АМг6 толщиной 6 мм.

Выполненные на алюминиевом сплаве АМг6 эксперименты показали, что длина термостойкого внутреннего наконечника (создаёт внутренний газовый поток) должна быть на 3–5 мм короче среза внешнего газового сопла. Такое соотношение длин позволяет добиться:

– импульсной (порционной) доставки гелия и аргона в зону горения дуги;

– создания повышенного давления в зоне горения дуги и выдавливания жидкого металла;

– обеспечения надёжной защиты кристаллизующегося металла и ОШЗ;

– гарантированного горения дуги между концом электрода и изделием, а также отсутствия горения дуги между термостойким внутренним наконечником и изделием.

Последний пункт особенно важен при сварке продольных швов, потому что свариваемые края заготовки фиксируются прижимными клавишами, которые располагаются на сравнительно близком расстоянии от стыка, тем самым повышая вероятность возникновения ситуации, когда дуга будет гореть между внутренним термостойким наконечником и прижимными клавишами установки.

Расположение прижимных клавиш и, как следствие, создание «канала», в котором происходит сварка продольных швов, моделировалось путём фрезерования паза в пластине толщиной 10 мм на толщину 6 мм. Поперечный размер паза выбирался с учётом рекомендаций ОСТ 92-1186-81 на расстояние от прижима до стыка. В процессе поиска подходящих режимов сварки установлено и подтверждено, что расположение линии стыка под углом к линии движения горелки или смещение линии стыка от центральной линии между краями прижимных клавиш приводит к появлению дефектов: нарушению симметричности шва и появлению подрезов. С большой вероятностью можно предположить, что в этом случае происходит отражение от стенки внутреннего потока газа, истечение которого протекает с большей скоростью, чем внешнего. В результате нарушается параллельность / ламинарность движения потоков и импульсная (порционная) подача гелия-аргона в зону горения дуги, что и приводит к появлению дефектов. Поэтому при разработке технологических карт процесса сварки в реальном производстве необходимо будет предусмотреть определение допусков на смещение линии стыка от центральной линии и на угловое отклонение линии стыка от центральной линии.

В настоящее время при подборе режимов сварки алю-

миниевых сплавов и нержавеющей сталей используют рекомендации ОСТ 92-1186-81, согласно которому установлены следующие режимы:

а) при сварке аустенитных сталей типа 12Х18Н10Т для толщины 3 мм – сварка с присадочной проволокой, сварочный ток  $I_{св} = 180-200$  А и скорость сварки 15–20 м/ч, для толщины 5 мм – сварка с присадочной проволокой, сварочный ток  $I_{св} = 200-240$  А и скорость сварки 12–16 м/ч;

б) при сварке алюминиевого сплава АМг6 толщиной 6 мм – сварка с присадочной проволокой,  $I_{св} = 340-380$  А, скорость сварки 15 – 20 м/ч, диаметр присадочной проволоки – 2,5 – 3,0 мм.

Проведённые эксперименты показали, что надёжное формирование шва и гарантированное проплавление достигаются:

при сварке аустенитных сталей типа 12Х18Н10Т:

– с импульсной подачей аргона (Ar) (без подачи гелия):  $I_{св} = 110-130$  А, скорость сварки 10 – 15 м/ч, время импульса Ar – 0,1 с, время паузы – 0,1 с, расход Ar внешнего сопла – 18 л/мин, расход Ar по внутреннему каналу – 3–5 л/мин;

– с импульсной подачей аргона (Ar) – гелий (He):  $I_{св} = 85-95$  А, скорость сварки 10–15 м/ч, время импульса Ar – 0,1 с, время импульса He – 0,1 с, расход Ar внешнего сопла – 18 л/мин, расход Ar по внутреннему каналу – 3–5 л/мин, расход He по внутреннему каналу – 1–2 л/мин;

при сварке алюминиевых сплавов типа АМг6:

– с импульсной подачей аргона (Ar) (без подачи гелия):  $I_{св} = 245-260$  А, скорость сварки 12 м/ч, время импульса Ar – 0,1 с, время паузы – 0,1 с, расход Ar внешнего сопла – 18 л/мин, расход Ar по внутреннему каналу – 3–5 л/мин, диаметр присадочной проволоки – 1,2 мм, скорость подачи присадочной проволоки  $V_{пр} = 80$  м/ч;

– с импульсной подачей аргона (Ar) – гелий (He):  $I_{св} = 200-205$  А, скорость сварки 12 м/ч, время импульса Ar – 0,1 с, время импульса He – 0,1 с, расход Ar внешнего сопла – 18 л/мин, расход Ar по внутреннему каналу – 3–5 л/мин, расход He по внутреннему каналу – 1–2 л/мин, диаметр присадочной проволоки – 1,2 мм, скорость подачи присадочной проволоки  $V_{пр} = 80$  м/ч.

Эксперименты по определению максимальной производительности импульса проводились на следующих образцах и режимах:

– аустенитная сталь типа 12Х18Н10Т – толщина образца – 10 мм,  $I_{св} = 150$  А, скорость сварки 10 м/ч, расход Ar внешнего сопла – 18 л/мин, расход Ar по внутреннему каналу – 3–5 л/мин, расход He по внутреннему каналу He – 1–2 л/мин;

– алюминиевый сплав типа АМг6 – толщина образца – 6 мм,  $I_{св} = 175$  А, скорость сварки 12 м/ч, расход Ar внешнего сопла – 18 л/мин, расход Ar по внутреннему каналу – 3–5 л/мин, расход He по внутреннему каналу – 1–2 л/мин, диаметр присадочной проволоки – 1,2 мм, скорость подачи присадочной проволоки  $V_{пр} = 80$  м/ч.

Качество сварного соединения оценивали по внешнему виду сварного шва. На образце, представленном



на рис. 4, видно, что по мере увеличения продолжительности импульса происходит огрубление структуры шва и увеличение расстояния между линиями кристаллизации (чешуйчатость шва), которое может привести к ухудшению механических свойств сварного соединения. Также установлено, что по мере увеличения продолжительности импульса увеличивается вероятность внезапного обрыва дуги, что связано с увеличением продолжительности горения дуги в гелии и снижения сглаживающего эффекта горения дуги в аргоне.

#### Выводы

1. По результатам выполненных работ подтверждены и уточнены характеристики создаваемой установки для сварки продольных швов с применением ВИГ-сварки с импульсным гидродинамическим воздействием на сварочную ванну:

- максимальный сварочный ток  $I_{св} - 350 \text{ А}$ ;
- максимальная скорость сварки  $V_{св} - 20 \text{ м/ч}$ ;
- максимальная скорость подачи присадочной проволоки  $V_{пр} - 120 \text{ м/ч}$ ;

- максимальная продолжительность импульса –  $0,5 \text{ с}$ ;
- дискретность импульса –  $0,1 \text{ с}$ .

2. Применение внутреннего термостойкого наконечника позволяет получить положительный эффект от импульсного гидродинамического воздействия на сварочную ванну при использовании аргона как по внешнему, так и по внутреннему каналу. Применение попеременной подачи аргона и гелия по внутреннему каналу усиливает данный эффект и приводит к уменьшению тока более чем на 50% по сравнению с рекомендациями ОСТ 92-1186-81.

3. В разрабатываемой установке по сварке продольных швов будет использован относящийся к последнему поколению сварочной техники источник питания сварочного тока Rosweld TIG 350P AC/DC и современная система управления. В тоже время модульный принцип построения установки позволяет выделить относящиеся к импульсному гидродинамическому воздействию на сварочную ванну элементы в отдельный блок, который можно использовать для модернизации установок предыдущего поколения и, тем самым, расширить их технологические возможности.

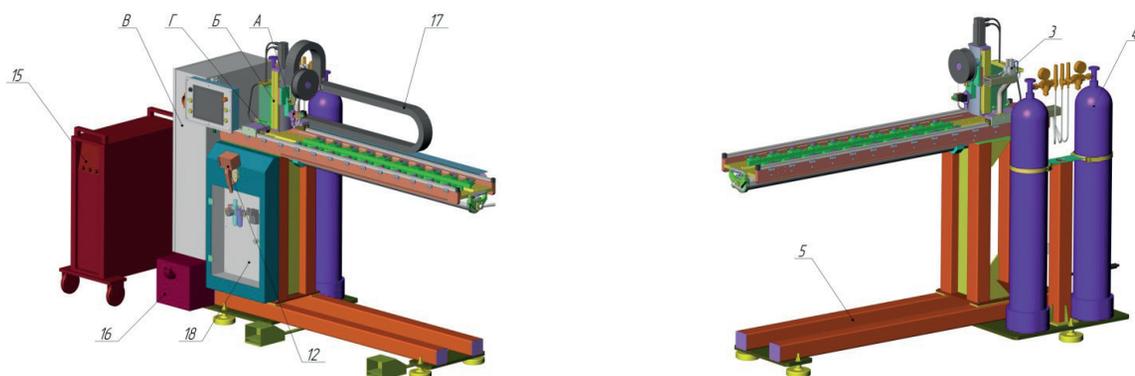


Рис. 1. Проектируемая установка для сварки продольных швов: А – сварочная горелка; Б – кинематический модуль; В – аппаратура управления; Г – система видеонаблюдения; 3 – устройство подачи газов; 4 – баллоны с защитным газом; 5 – основание; 12 – пульт управления ручной; 15 – источник сварочного тока; 16 – система охлаждения; 17 – кабелеукладчик; 18 – пневмосистема

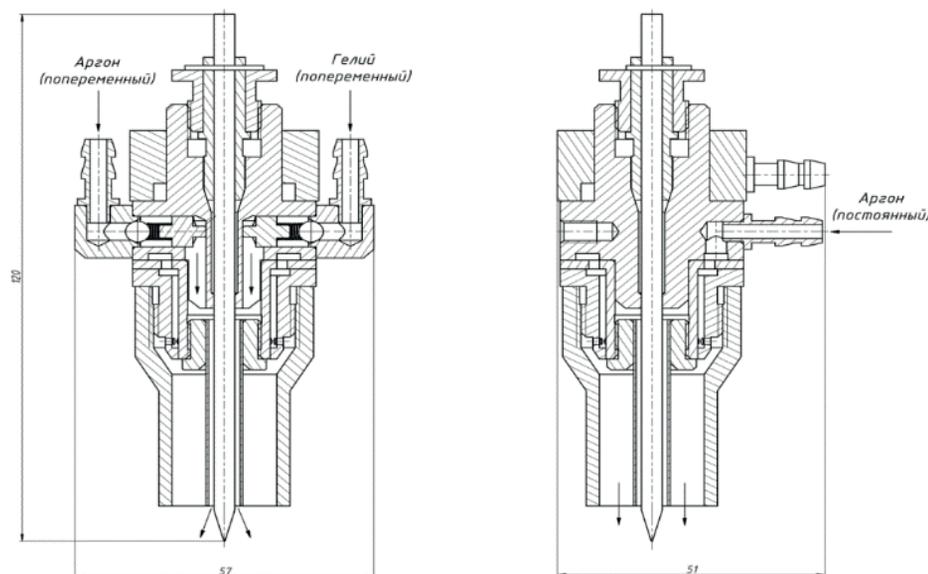


Рис. 2. Специальная сварочная горелка для импульсной подачи газа



## ◆ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ РКТ

УДК 629.78:657.372

*Бараев А.В., Илингина А.В., Стешин А.А., Жарков Д.Е., Володин Г.Г.*

### Технологическая экспертиза эскизных проектов как важный этап научно-технического сопровождения изделий РКТ

ФГУП «НПО «Техномаш» осуществляет научно-техническое и технологическое сопровождение изделий ракетно-космической техники на этапах проектирования, в том числе экспертизу представленных материалов (проектной документации) на этапе эскизного проекта на соответствие нормативным технологическим документам, а затем выдачу соответствующего заключения, а также разрабатывает соответствующую нормативную документацию.

**Ключевые слова:** научно-техническое сопровождение изделий ракетно-космической техники, технологическая экспертиза, лазерная сварка, трудоёмкость, порошковая краска, перспективный план технологической подготовки производства.

В 2017–2018 гг. в порядке выполнения работ по научно-техническому и технологическому сопровождению на этапах проектирования, наземной экспериментальной отработки, лётных испытаний, подготовки и серийного производства актуальных образцов ракетно-космической техники (РКТ) проведена экспертиза материалов эскизных проектов перспективных изделий: «Ресурс-ПМ», «КосмоАИС-М-2022», «Коронас-К», «АРКА», «Гироскоп-2025» (ВТГ), «Гироскоп-2025» (ВОГ) «Гироскоп-2025» (СГК), КА «Глонасс-К2» (ОКР «КК-В-Независимость»), КК «Луна-Ресурс», «ИБИС-КА-НКУ» (КА) и др. Одним из эскизных проектов, на которые специалистами ФГУП «НПО «Техномаш» разработаны экспертные заключения, стал эскизный проект (ЭП) на разработку технологии изготовления прецизионных щелевых антенных решёток (ПЩАР) лазерной сваркой. На примере данной работы рассмотрим порядок проведения технологической экспертизы ЭП.

Во ФГУП «НПО «Техномаш» осуществлена технологическая экспертиза Технического задания и документации ЭП АО «НИИ ТП» – «Прецизионная щелевая антенная решётка». Одной из конструктивных особенностей космических аппаратов (КА) нового поколения является использование в них длинномерных антенных конструкций с ПЩАР.

Экспертиза проводится в пределах:

- оценки общей технологичности предложенных АО «НИИ ТП» основных конструктивных решений опытного образца изделия;
- оценки возможности и целесообразности использования для её сборки технологии лазерной сварки, взамен используемой в настоящее время для изготовления подобных конструкций технологии высокотемпературной пайки;
- выбора защитных покрытий готовых изделий.

Для анализа представленных материалов привлечены специалисты основных производственных подразделений предприятия: сварочного, заготовительного, отделения неразрушающего контроля, центра метрологического обеспечения РКТ.

В экспертном заключении определены основные технические характеристики опытного образца изделия с учётом требований живучести и стойкости к внешним воздействиям, включая воздействие факторов космического пространства:

1. Подтверждена целесообразность использования в качестве конструкционного материала опытного образца изделия алюминиевого сплава АМц.

2. Проработана детализовка изделия и одобрены, как наиболее эффективные, выбранные исполнителем ОКР, технологии изготовления основных конструктивных элементов:

- гидроабразивная резка для раскроя заготовок и изготовления излучающего полотна с использованием установки Microwaterjet F4 (рис. 1);



Рис. 1. Установка Microwaterjet F4

- резка на проволочно-вырезном электроэрозионном станке ONA AF60 A0 для формирования непосредственно ПЩАР волноводов;
- автоматизированная импульсно-периодическая лазерная сварка изделия в сборе (лазерный технологический сварочный комплекс «Сварог-3» (рис.2) на базе иттербиевого волоконного лазера ЛС-4).

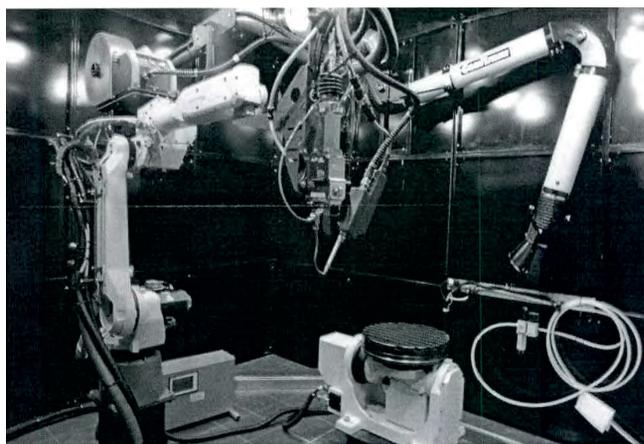


Рис. 2. Внешний вид сварочного комплекса «Сварог-3»

Отмечено, что с учётом габаритов изделия, представленного в эскизном проекте, существенными недостатками применявшейся ранее технологии высокотемпературной пайки можно считать:

- значительную трудоёмкость операций укладки припоя и нанесения флюса;
- сложность соблюдения локальной дозировки припоя;
- возможность искажения геометрии волноводных каналов;
- необходимость проведения трудоёмких операций по удалению остатков флюса с поверхности изделия.

Основными преимуществами внедряемой в данном ЭП, технологии лазерной сварки по сравнению с технологией пайки являются:

- возможность автоматизации процесса;
- значительное сокращение длительности производственного цикла изготовления ПЩАР, за счёт исключения операций укладки припоя, нанесения флюса и удаления остатков припоя и флюса после пайки.

Важно помнить, что лазерная сварка отличается сравнительно небольшими зонами термического влияния, что существенно снижает уровень внутренних напряжений и деформаций, изготавливаемых по этой технологии длинномерных маложёстких конструкций.

Также необходимо иметь в виду, что, учитывая особенности сплава АМц и так называемого эффекта обратного отражения, применение лазерной сварки для обеспечения надёжности и качества сварных соединений в рассматриваемых конструкциях из этого сплава с применением волоконного лазера, потребует тщательного выбора оптимальных параметров режимов сварки.

Вторым аспектом проведённой экспертизы явилась оценка решений эскизного проекта по выбору технологии нанесения покрытий для коррозионной защиты готовых изделий при хранении и эксплуатации.

В последнее время, в связи с особым вниманием к вопросам экологии, всё более широкое применение находят порошковые краски (ПК), не уступающие, а в ряде случаев даже превосходящие, характеристикам и эксплуатационным свойствам жидких ЛКМ.

Наиболее распространён процесс нанесения на изделие электростатически заряженной ПК, распыляемой специальным пневматическим распылителем (пистолетом-распылителем) и удерживаемой на поверхности заземлённого окрашиваемого изделия силой электростатического притяжения.

Следует отметить, что производственная база предприятия-исполнителя технологического ОКР обеспечивает создание данной технологии при условии создания новых рабочих мест. По итогам экспертизы выдано заключение в обоснованности выбора производственно-технологической базы, используемой в процессе разработки технологии изготовления ПЩАР ЛС.

Ключевые элементы разработки технологии изготовления ПЩАР ЛС признаны технологичными и имеющими достаточную степень реализуемости на производственно-технологической базе предприятия с учётом отработки новых технологических процессов.

Тем не менее, в результате анализа представленных материалов данного эскизного проекта выданы замечания к его технологическому разделу, в части несоблюдения требований ОСТ 92-9160-90 «Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий. Порядок разработки технологических частей пояснительных записок проектов изделий».

Как правило, основными замечаниями к разработчику ЭП являются отсутствие проработки разделов по описанию имеющейся производственной базы и отсутствие раздела «Перспективный план основных мероприятий по ТПП изделия».

Все недостатки и замечания отмечены в большинстве экспертных заключений. Чаще всего на этапе эскизного проекта предприятия мало уделяют внимания перспективным задачам технологической подготовки производства, перенося все вопросы на этап разработки рабочей документации, в результате чего появляются нарушения в сроках на этапе разработки рабочей документации и создании опытных образцов, а также незапланированные материальные расходы.

Следует отметить, что специалистами ФГУП «НПО «Техномаш» проводятся работы по совершенствованию нормативной базы в области вопросов технологической подготовки производства. Так, например, разработан ряд стандартов системы технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники, а также обеспечения производственной технологичности создания изделий ГОСТ Р57944-2017 и ГОСТ Р57945-2017.

УДК 006.91

*Опальницкий А.И., Жуков В.В.*

### Общие сведения о подготовке частных заключений о технологической готовности изделий РКК к лётным испытаниям

Статья посвящена методологии подготовки частных заключений о технологической готовности изделий ракетно-космических комплексов к лётным испытаниям.

**Ключевые слова:** ракетно-космические комплексы, заключение о готовности.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 22.07.1998 №819-31 определены наименования, функции и задачи головных научно-исследовательских организаций ракетно-космической промышленности (ГНИО РКП) в области создания, производства и эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ).

За ФГУП «НПО «Техномаш» как ГНИО РКП по направлению технологий создания РКТ и метрологическому обеспечению ее производственно-технологической базы закреплены следующие основные направления работ по вопросам разработки и выдачи частных заключений о технической готовности ракетно-космических комплексов (РКК), а также составных частей различного базирования и назначения к лётным испытаниям (ЛИ):

- технологии создания и технологическая готовность машиностроительных производств РКТ и метрологического обеспечения;
- оценка достаточности мероприятий по обеспечению чистоты в баках и полостях;
- анализ отступлений от принятой технологии изготовления основных составных частей изделий, анализ производственных отступлений, дефектов и отказов, выявленных в результате наземных и ЛИ изделий.

Общий порядок организации работ по подготовке частных заключений о технической готовности РКК к ЛИ ГНИО РКП определён нормативно-правовыми документами Правительства Российской Федерации и Госкорпорации «Роскосмос».

Частные заключения о технической готовности ФГУП «НПО «Техномаш» выдаёт по результатам экспертизы материалов головных организаций-разработчиков и изготовителей изделий, а также анализа результатов научно-технического сопровождения опытно-конструкторских работ (ОКР), заказчиком которых является Госкорпорация «Роскосмос», в том числе с отражением следующих вопросов:

- достаточности отработки конструкторской и технологической документации (КД и ТД) на изделия, отработки новых технологических процессов (ТП), включая критичные ТП;
- оценки обработанности технологических процессов, методов организации производства для условий

серийного изготовления, технологической готовности производственных и испытательных мощностей к изготовлению и поставке изделий в заданных объёмах и в установленные сроки;

- оценки технологичности КД и изделий;
  - оценки полноты и достаточности проработки вопросов технологичности конструкторских решений, технологии изготовления и испытаний, изложенных в технологических частях проектной документации (отчетов по научно-исследовательским работам (НИР), при проведении ОКР (разработке, производстве и испытаний));
  - оценки готовности цехов и предприятий к изготовлению изделия, включая метрологическое обеспечение производства, контроля качества и испытаний;
  - данных о результатах входного контроля КИ, входящих в состав изделия и испытаний, оформленных карточками разрешений, с указанием причин возникновения отступлений, заключением о невлинии их на качество и надёжность изделия (составных частей, КИ и т.п.);
  - анализа данных о дефектах и отказах составных частей и КИ, в том числе выявленных в процессе проведения предшествующих испытаний;
  - оценки эффективности принятых мер по устранению дефектов, отказов и неисправностей, выявленных при постановке изделий на производство, установившемся производстве, всех видах испытаний и в эксплуатации.
- В целях повышения ответственности головных НИИ и достоверности выдаваемых частных заключений проводятся мероприятия:
- сопровождение изделий на заводах-изготовителях;
  - выезд специалистов на предприятия-поставщики;
  - обработка данных результатов испытаний, причин возникновения технических и технологических проблем, изменений схемно-конструкторских и технологических решений, расчётных данных, причин выявленных отказов и неисправностей, отступлений от КД и ТД;
  - ведение баз данных по отступлениям от КД и ТД, отказам и неисправностям, выявленным в результате наземных и ЛИ изделий.

Частное заключение о технологической готовности РКК к ЛИ включается в Общее заключение о технической готовности комплекса в целом.

## ◆ ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.983.321

Вайцехович С.М., Бараев А.В.

### Инновационные технологии оребрения труб и разработка рекомендаций по совершенствованию теплообменников

Рассмотрен вопрос повышения коэффициента оребрения гладких труб для котлов утилизаторов и других высокотемпературных теплообменников, эффективности поверхности оребрения труб теплообменной аппаратуры, например, для парогазовых установок и замены гладких труб на трубы желобковые спирально-профильные – пассивными интенсификаторами теплоотдачи.

**Ключевые слова:** технология, поперечное оребрение, спирально-профильные трубы, теплообменник, гидравлическое сопротивление, течение вязкой жидкости, паяные оребренные трубы.

Доля теплообменных аппаратов в промышленной энергетике составляет 70% объёма технологического оборудования, при этом большая часть их базируется на гладкоствольных или профилированных накатных трубах.

Трубы со спиральным (поперечным) оребрением (ТСО) для высокотемпературных теплообменников производятся методом сварки токами высокой частоты. В Российской Федерации производство таких труб организовано на котельных заводах в Подольске, Таганроге и Бийске. Эти заводы обладают по сути монопольным режимом производства оребренных труб для котлов утилизаторов и других высокотемпературных теплообменников.

В настоящее время широкое применение получило производство оребренных труб с применением процесса пайки рёбер. Высота ребра колеблется от 5 до 25 мм соответственно росту диаметров труб, как это изложено в [1], рис. 1.

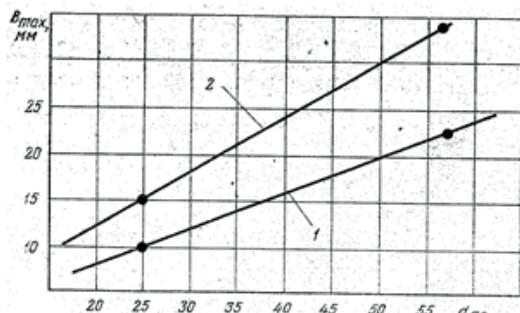


Рис. 1. Зависимость максимальной ширины привариваемой ленты от диаметра оребряемой трубы:

- 1 – для материала ленты ребра из углеродистой стали;
2. – для материала ленты из аустенитной стали

Одним из производителей оребренных труб для теплообменной аппаратуры является Подольский машиностроительный завод. Технологический процесс изготовления ТСО узкоспециализированный – высота ребра технологически ограничена размерами – 10–12 мм, предельно 15 мм, однако переналадка с высоты ребра 12 мм на высоту ребра 15 мм ведёт к повышению трудоёмкости процесса и снижению устойчивости ребра.

Применение ТСО в 90-х годах XX века обеспечило резкое повышение технико-экономических показателей

энергооборудования. При повышении площади поверхности на единицу длины в 5-8 раз, примерно на столько же снижается расход труб. Надёжность теплообменной аппаратуры находится в прямой зависимости от её компактности и снижения длины трубных поверхностей.

С 1990 по 2000 годы в отрасли энергетического машиностроения проводились исследования по совершенствованию производства оребренных труб. Главной задачей являлось повышение коэффициента оребрения и эффективности поверхности оребрения труб теплообменной аппаратуры, например, для парогазовых установок (ПГУ) и другого перспективного энергооборудования. Решение данной задачи являлось необходимым для малогабаритной энерготехники с высоко-компактной и эффективной теплообменной аппаратурой, однако до настоящего времени промышленное решение не найдено, и реализовано с ограниченными параметрами и типоразмерами оребрения, не обеспечивающими современного теплотехнического качества и уровня энерго- и ресурсосбережения.

Основная тенденция развития теплообменной техники за рубежом проводится в направлении увеличения наращивания величины оребрения труб. В России для регенеративных и утилизационных теплообменников предложен типоразмерный ряд штампованного поперечного оребрения, включающий в первом ряду – семь труб, во втором – шесть труб, всего 14 рядов с чередованием числа труб с нечётного на чётное. Трубный пучок спирального оребрения поставки ПО ТКЗ «Красный котельщик» приведён на рис. 2.

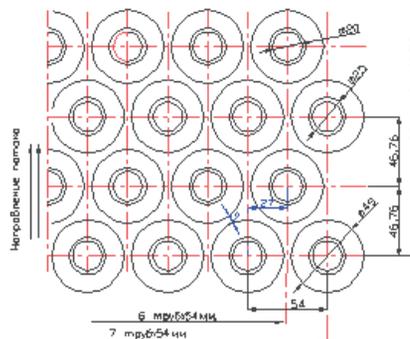


Рис. 2. Трубный пучок, черт. ХК01.01.000СБ, левая секция, правая – зеркальная



За основу в первоначальных технологических и конструкторских проработках взяты ТСО габаритами  $\text{Ø}25 \times 2,5$  мм Ст20, с площадью ребра с двух сторон –  $26,0 \pm 30,0 \text{ см}^2$ ; площадь кольца оребрения в плане составляет  $14,6 \text{ см}^2$  ( $\text{Ø}49$  мм). Принятый вид оребрения труб имеет недостаточную высоту ребра и малую площадь поверхности, что не позволяет должным образом оптимизировать теплообменники малых энергоустановок.

Характер течения жидкого теплоносителя в каналах трубопровода характеризуется турбулентным, ламинарным и переходным режимами. Ламинарный режим потока располагается в слоях, непосредственно прилегающих к стенке трубопровода за счёт прилипания к ней. Пристенный слой теплоносителя, движущегося в ламинарном режиме вдоль стенки канала, уменьшает приток тепла через стенку к другому теплоносителю. Открытие №242 «Пути интенсификации теплообмена в трубопроводных каналах тепловых установок» (Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Яхро, Г.И. Воронин, Е.В. Дубровский) позволило теоретически обосновать закономерность изменения теплоотдачи на стенках трубопроводного канала при дискретной турбулизации потока, обеспечивающего ускоренный рост теплопередачи в сравнении с ростом гидравлического сопротивления.

Альтернативой профилированным накатным и гладкостельным оребренным трубам, используемым в современных теплообменных аппаратах, могут стать спирально-профильные трубы (СПТ) с гофрированной желобковой винтовой поверхностью (рис. 3).

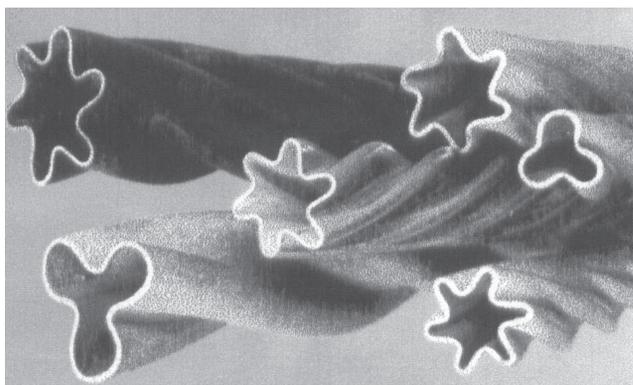


Рис. 3. Образцы спирально-профилированных труб

Многожелобковая винтовая форма трубы позволяет значительно повысить коэффициент теплопередачи стенки трубы и устранить солеотложения, сопутствующего составу воды химических образований, интенсифицировать теплообмен при одновременном снижении металлоёмкости аппарата в 1,5–2 раза или снизить в системе температурный напор.

До недавнего времени интерес к интенсификации теплообмена ограничивался в основном турбулентными и переходными процессами, где достигнуты значительные успехи [2]. В последние годы используются ламинарные течения. Доказано [3], что именно ламинарный и переходный режимы течения ( $\text{Pr} \gg 1$ ) являются наибо-

лее перспективными в области интенсификации теплообмена. Более того, в промышленной теплоэнергетике – подавляющее большинство рабочих тел обладают не-newтоновскими характеристиками. Сюда относятся процессы химической, нефтехимической, пищевой и других отраслей.

СПТ принадлежит к классу дискретно-шероховатых каналов с винтовой симметрией. Известно, что для подобных геометрий получена интенсификация теплообмена для ламинарных потоков до 10 раз, при росте сопротивления в 2–3 раза (оценка эффективности теплообмена основывается на сопоставлении двух величин – роста гидравлического сопротивления и величины теплосъёма (при превышении роста последнего, эффективность считается  $>1$ ). Таким образом, применение СПТ в качестве теплообменной поверхности в теплообменных аппаратах химической и нефтехимической промышленности (где используются ламинарные режимы течения теплоносителя с непростой реологией) или же в других отраслях энергетики (где используется ламинарный режим – мазутоподогреватели, маслоохладители и т.п.) принесёт несомненный выигрыш в массе теплообменных аппаратов от 2 до 10 раз и до 70% по площади теплообменного оборудования. Доказательством этому могут служить экспериментальные работы по исследованию гофрированных труб в ЦКТИ им. Ползунова [4].

Области применения СПТ:

#### *Сепарация*

СПТ можно применять в качестве сепарационных устройств вместо сложных по геометрии конструкций стандартного циклонного типа. Проведённые испытания опытных конструкций воздухоосушителей (вода – воздух) подтвердили данное заключение. Имеются положительные результаты по отбору пылевидных фракций из газовых потоков и т.п.

#### *Демпфирование. Упрочнение*

Специфические прочностные свойства СПТ позволяют использовать их для демпфирования термонапряжений в конструкциях теплообменников, в строительной технике, а также упрочнять строительные конструкции, например, в качестве силовой арматуры бетонных блоков, а также с функциями организации подогрева или охлаждения объектов.

#### *Шнурование*

При определённой геометрии гофр в СПТ может возникнуть эффект «шнурования», т.е. эффект сепарации в необычном «исполнении» – примесь собирается к центру потока. Данное свойство можно использовать при транспорте агрессивных газов, интенсификации излучения и др.

#### *Теплоизоляторы*

Известно, что при определённых режимах течения и определённой геометрии, теплоотдача труб подобной геометрии уменьшается (до 30%), а рост сопротивления составляет не более 5%. Применение подобных труб в этом случае возможно для специальных теплотрасс.



В настоящее время освоена опытно-промышленная технология производства СПТ широкого диапазона геометрических параметров по диаметру, толщине стенки, высоте и количеству гофров в поперечном сечении, углу наклона гофров из углеродистых, нержавеющей марок сталей, меди, латуни, алюминия и т.п. СПТ можно изготавливать практически из любого металла или сплава, обладающего удовлетворительными механическими и пластическими свойствами.

Высокая эффективность теплообмена таких труб в теплообменниках определяется влиянием следующих факторов:

- имеет большую площадь поверхности на единицу длины по сравнению с цилиндрическими трубами;
- обеспечивает высокую эффективность теплопередачи через стенку трубы за счёт наикратчайшего пути от внутреннего теплоносителя до наружного теплоносителя даже в вершинах рёбер труб;
- винтообразное движение внутреннего теплоносителя обеспечивает интенсивное перемешивание всех слоёв по сечению и более эффективное участие центральных слоёв в теплопередаче;
- траектория движения теплоносителя удлиняет путь прохождения каждой частицы потока посредством чередования профилей на участках вдоль длины трубы, и, тем самым способствует эффективности теплоотдачи;
- вихревые потоки внутри гофрированной трубы с применением «лунок» создают локальную турбулизацию на (вблизи) стенках, что наряду с улучшением теплоотдачи создаёт благоприятные условия по вымыванию осаждающихся частиц на стенках теплообменных труб;
- СПТ в продольном направлении обладает ощутимой упругостью (демпфирующей способностью), обеспечиваемой не за счёт изгиба трубы, как у цилиндрических труб, а за счёт возможности заметного упругого сжатия гофров трубы (типа сильфона). Такое свойство труб очень важно для теплообменников, где из-за высоких градиентов температур разные трубы в пучке могут находиться как под воздействием растягивающих, так и сжимающих напряжений, что зачастую приводит к вырывам труб из трубных досок;
- СПТ наряду с упругостью в продольном направлении обладают значительно большей жёсткостью на изгиб по сравнению с сопоставимой по сечению цилиндрической трубой, что конструктивно важно для уменьшения числа перегородок – подпорок между трубами;
- из-за большей удельной площади теплообменной поверхности на длину трубы, а также более плотной компоновки труб на трубной доске теплообменники на основе СПТ обладают высоким показателем отношения площади теплообмена на единицу объёма.

Таким образом, СПТ обладают уникальными свойствами, которые особенно важны в той или иной мере для различных типов теплообменных аппаратов.

Экспериментальные исследования, проведённые для различных типоразмеров СПТ [4] и условий теплообмена, показали, что эффективность теплопередачи зависит от множества факторов, важнейшие из которых: тип внутреннего и наружного теплоносителя, величины и угла наклона гофров и их количества.

Необходимо отметить, что наравне с ростом эффективности теплопередачи возрастает гидравлическое сопротивление потоку как внутреннего, так и наружного теплоносителя, однако рост гидравлического сопротивления в среднем почти в два раза отстаёт от роста эффективности теплообмена.

В любом случае СПТ гораздо более эффективны по сравнению с цилиндрическими, но их эффективность меняется от соотношения коэффициента теплопередачи для гофрированных и цилиндрических труб в 1,2–1,5 раза для теплообменников «газ-газ» и в 4,0–6,0 раз для теплообменников «вода-вода».

При разработке теплообменных и сепарационных устройств с использованием СПТ проведены исследовательские работы (испытания) совместно с рядом предприятий.

Технология производства СПТ защищена патентами [5-7] и содержит ряд решений, представляющих собой ноу-хау. Задача внедрения СПТ как основного элемента теплообменных устройств взамен простых гладких труб базируется на выборе конкретного объекта теплотехнического оборудования. Например, регенеративные подогреватели; сетевые подогреватели; испарительные установки; деаэраторы, охладители масла; подогреватели мазута и др. Каждое из перечисленных устройств характеризуется своими особенностями как в отношении гидродинамики, так и теплообмена. Так, например, мазутоподогреватели и охладители масла – ламинарным течением среды в трубном пучке, сетевые подогреватели – турбулентным. Отличия имеются и в межтрубном пространстве. Пучок может быть вертикального исполнения или горизонтального.

Получение основной характеристики какого-либо типоразмера СПТ в чистом виде даже для внутреннего течения – достаточно сложная задача. В некотором роде проще, соответствуя требованиям к конкретному типу теплообменного устройства, проводить расчёт-анализ о возможности использования тех либо иных СПТ с последующей экспериментальной проверкой, используя технологические возможности по изготовлению различных профилированных труб.

Отмечено, что одним из способов интенсификации теплообмена является создание на гладкой трубе пережимов по типу диффузор – конфузор, однако любой пережим приводит к резкому повышению гидростатического давления, что требует повышения мощности оборудования.

Известно также, что «облунение» гладкой трубы как внутренней, так и наружной стороны стенки приводит к интенсификации теплообмена (рис. 4).

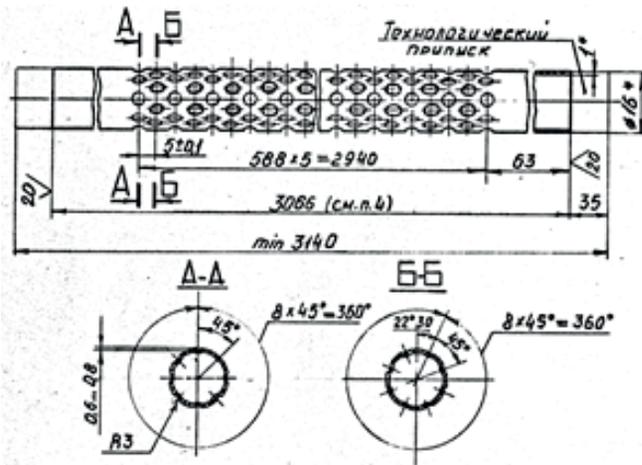


Рис. 4. Пример проекта трубы с лунками-интенсификаторами теплообмена для водоводяных подогревателей

Формирование лунок на внешней поверхности трубопровода приводит к увеличению поверхности теплообмена

$$\Delta S = S_T + [(S_B - S_{0,01.В})] \cdot n,$$

где  $S_T$  – внутренняя поверхность трубы до выполнения лунок;  $S_B$  – поверхность одной лунки;  $S_{0,01.В}$  – поверхность участка трубы у основания лунки;  $n$  – число лунок в трубе. При принятом допущении, что лунка имеет форму

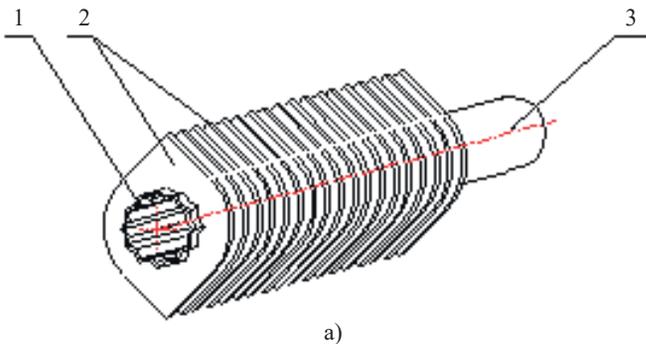


Рис. 5 – Пример СПТ с оребрением методом пайки:

а) пример сборки лепестков с СПТ; б) пример сборки трубного пучка;

1 – участок профильной трубы с заданным углом наклона профиля к оси трубы; 2 – оребрение профильного участка трубы с расчётными параметрами ребра и шага оребрения; 3 – цилиндрический участок трубы исходного диаметра для сварки с трубной доской, калачом или трубным коллектором

С учётом уровня рабочих температур и давлений в регенераторе исходную (гладкую) трубу целесообразно выбирать с толщиной стенки 1,5–2,0 мм и диаметром 48–60 мм. После профилирования труба приобретёт расчётную СПТ-размерность в зависимости от глубины профиля (например, диаметр внутри профильный – 30–36 мм) и может быть в таком виде использована в рядах трубного пучка на определённом температурном уровне. Для коррекции величины внешней поверхности возможна напайка штампованных рёбер с заданной величиной ребра и шага.

Технология оребрения труб позволяет при оптимизации характеристик высокотемпературных теплообменников применять набор нескольких типоразмеров оребрённых труб (порядное).

конуса, размеры которого можно выразить через диаметр отпечатка, боковую поверхность одной лунки можно выразить уравнением:

$$S_B = \pi \cdot 1,5d_0 \sqrt{(1,5d_0)^2 + (0,57d_0)^2},$$

$$S_{0,01.В} = \pi \cdot (1,5d_0)^2.$$

Боковая поверхность всей теплообменной трубы с лунками определяется зависимостью:

$$\Delta S = \pi \cdot D \cdot L + [\pi \cdot 1,5d_0 \sqrt{(1,5d_0)^2 + (0,57d_0)^2} - \pi \cdot (1,5d_0)^2] \cdot n.$$

Для дымогарных труб  $\varnothing 60 \times 2,5 \times 2000$  мм формирование лунок глубиной 0,6 мм, радиусом 2,5 мм и с шагом 66 мм даёт приращение к поверхности теплообмена порядка 4%.

Интересно создание СПТ с дискретно-винтовыми гофрами, облунёнными как на гладкой, так и на гофрированной поверхностях, что само по себе может повысить теплоотдачу до уровня 100%, практически без роста сопротивления, при этом дискретно-винтовые гофры будут выполнять функции вихревых генераторов.

Возвращаясь к оребрённым трубам можно отметить, что совершенствование СПТ, а точнее трубчатых поверхностей теплообмена, создаёт «гибрид» СПТ с облунёнными и оребрёнными трубами.

На рис. 5 приведён пример оребрённой трубы на основе СПТ с заданным рельефом применительно к регенератору установки ГТЭ 2,5.

## Выводы

1. Представлен конкретный набор типоразмерного ряда оребрённых труб как основа для дальнейшей систематизации по функциональному назначению теплообменной аппаратуры.

2. Высокая технологическая гибкость процесса оребрения труб с помощью высокотемпературной пайки штампованных из стальной полосы рёбер, напрессованных с заданным шагом, позволяет оптимизировать параметры теплообменников утилизаторов и регенераторов за счёт применения различных типоразмеров оребрения в одном аппарате.

3. Ряд зарубежных фирм наращивает производство паяных оребрённых труб для строительства «сухих» градиент применительно к ТЭС и АЭС, размещаемым в рай-





УДК 621.777

Овечкин Л.М.

## Совершенствование процессов интенсивной пластической деформации

Проведено исследование силовых характеристик процесса интенсивной пластической деформации на примере равноканального углового прессования с различными и неравными между собой радиусами сопряжения каналов.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, течение металла, сдвиговая деформация, силы прессования, угол пересечения каналов, компьютерное моделирование.

В настоящее время равноканальное угловое прессование (РКУП), являющееся разновидностью методов интенсивной пластической деформации (ИПД), известно как конкурентоспособный метод получения заготовок из сплавов на основе алюминия, меди, а также труднодеформируемых сплавов с ультрамелкозернистой структурой и высоким комплексом механических свойств [1, 2]. При реализации РКУП возникает необходимость циклического деформирования заготовки для эффективного измельчения структуры в целях достижения однородных свойств по объёму заготовки.

Для увеличения производительности и интенсивности обработки заготовок в настоящее время также применяется метод РКУП, предполагающий осуществление двух циклов сдвиговой деформации за один цикл РКУП (рис. 1). Данная разновидность метода РКУП предполагает продавливание заготовки через два канала равного поперечного сечения, соединенных третьим, равного им по сечению, промежуточным, каналом [3].

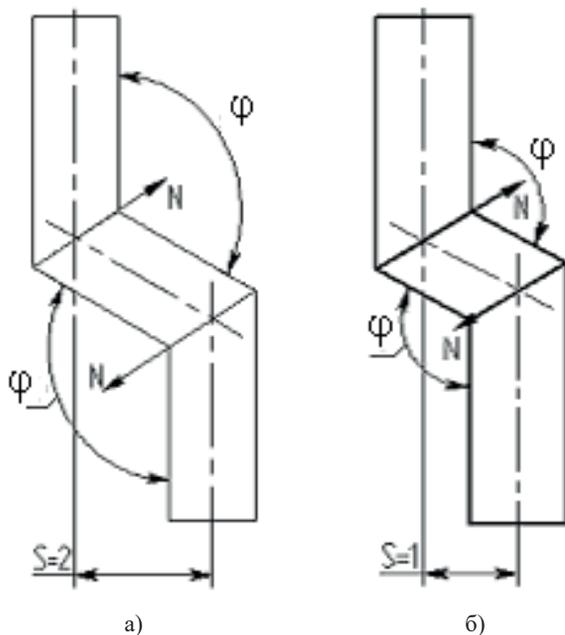


Рис. 1. Схема канала для реализации двух циклов сдвиговой деформации за один цикл РКУП

Возможны различные конструктивные варианты оснастки, которые характеризуются значением величины осевого смещения  $S$  вертикальных каналов. При этом величина  $S$  равна сечению канала.

Необходимо провести анализ влияния величин радиусов сопряжения каналов на кинематику течения металла в канале матрицы. Для этого провели компьютерное моделирование РКУП: исследовали следующие схемы деформирования заготовки длиной 100 мм через каналы с параметрами:  $S=1$ ;  $S=2$ , угол  $\varphi=130^\circ$

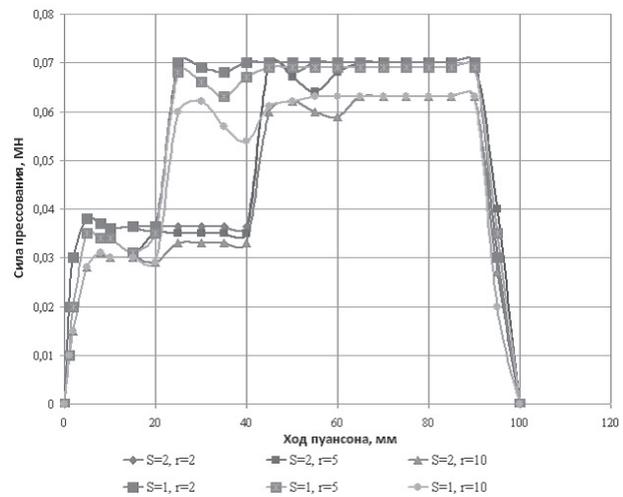


Рис. 2. Зависимость технологических сил от хода пуансона при различных геометрических параметрах канала

На основании результатов моделирования стоит отметить, что технологическая сила при начальном этапе деформирования торца заготовки сначала резко возрастает, затем при выходе РКУП на установившуюся стадию, которая характеризуется заполнением металла всего очага деформации, снижается. При параметре канала  $S=2$  по причине большей длины промежуточного канала происходит постепенный выход процесса на полную силу деформирования, характеризующейся проталкиванием заготовки сразу через два очага деформации, находящихся в местах пересечения каналов.

Общая технологическая сила, необходимая для обеспечения деформирования заготовки с учётом силы противодействия, создаваемой обработанной заготовкой, находящейся в выходном канале заготовкой, представлена выражением (1).

$$P_1 = F \cdot \left( \frac{\mu \cdot (k + 2,57 \cdot k \cdot \text{ctg}\varphi) + 2 \cdot k \cdot (\mu + \text{ctg}\varphi)}{1 - \mu \cdot \text{ctg}\varphi} + 2 \cdot k \cdot \text{ctg}\varphi \right)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения канала,  $\text{мм}^2$ ,  $k$  — постоянная пластичности металла заготовки.



При этом сила противодействия создаётся в выходном вертикальном канале посредством сил трения заготовки о стенки канала.

#### Выводы

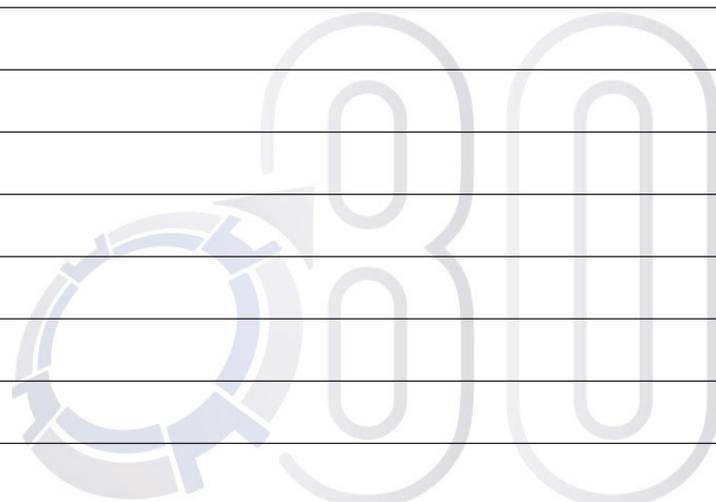
1. Для интенсификации процесса обработки металла заготовки и повышения производительности процесса РКУП следует применять схему с двумя очагами деформации.

2. При рассмотрении схемы РКУП с повышенной интенсивностью деформирования (с двумя очагами деформации) целесообразно задавать параметр  $S=2$  с целью осуществления плавного увеличения технологической силы.

#### Список литературы

1. Рааб Г.И., Семенов В.И., Савельева Н.В., Муштавина Э.Ф. Влияние термомеханической обработки на структуру и коррозионные свойства углеродистых сталей. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2008. №12. С. 34–36.
2. Лякишев Н.П. Конструкционные наноматериалы. // Технология лёгких сплавов. 2006. №3. С. 40–49.
3. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.

#### ◆ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

УДК 621.74.019

Ларичев Н.С.

## Особенности затвердевания стальных крупногабаритных корпусных отливок

В работе описывается применение разработанной методики прогнозирования усадочных дефектов и способ их устранения для крупногабаритных корпусных отливок.

**Ключевые слова:** усадочная пористость, затвердевание отливки, затруднённая усадка.

### Введение

Затвердевание отливки является сложным процессом, на который влияют большое количество факторов. На основе определения пороговых значений этих факторов и их комбинаций, при достижении которых в отливке образуются внутренние усадочные дефекты, разработано большое количество критериев пористости [1]. Критерием, который даёт более точную картину вероятности образования усадочной пористости в отливке, как показали расчёты, является критерий  $K_1$ , разработанный на кафедре «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана [2]:

$$K_1 = V_T \sqrt{t_3}$$

где  $V_T$  – скорость затвердевания,  $t_3$  – локальное время затвердевания.

В настоящее время появляются работы, которые описывают новые факторы, от которых зависит процесс затвердевания. Одним из них является затруднение свободной линейной усадки [3–8].

В [8] показано, что торможение свободной линейной усадки оказывает значительное влияние на образования усадочной пористости, и его учёт при проектировании технологии может привести к возникновению нежелательной пористости. Также в работе дана теоретическая оценка влияния затруднённой линейной усадки на образование усадочной пористости в отливке и предложен поправочный коэффициент  $n$  к критическому значению критерия пористости  $K_1^{sp}$ . В [9] приведена методика эксперимента по исследованию влияния торможения свободной линейной усадки на образование пористости в отливке и показаны результаты исследований и оценки усадочной пористости.

В настоящей работе показано применение разработанной методики прогнозирования усадочных дефектов и способ их устранения для крупногабаритных корпусных отливок.

### Особенности затвердевания отливки «балка надressорная»

Рассмотрим затвердевание отливки «балка надressорная» из стали 20ГЛ и покажем корректировку критерия образования пористости на действие затруднённой усадки. Отливка имеет коробчатое сечение. Одной из причин брака является горячая трещина по верхнему поясу отливки (рис. 1), которая появляется в тепловом узле №1 (рис. 2). При этом в нижнем поясе горячая трещина отсутствует (тепловой узел №2, рис. 2). Инициатором зарождения и развития горячей трещины может быть усадочная пористость, образующаяся в тепловом узле.

Рассчитаем значения поправочных коэффициентов для указанных тепловых узлов.

Согласно геометрии отливки, расстояние между боковыми стенками отливки, с которых локализуется деформация, равна  $L = 250$  мм (литейные уклоны не учитываются).



Рис. 1. Балка надressорная с горячей трещиной по верхнему поясу

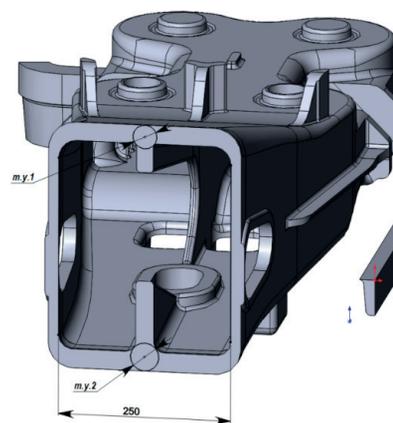


Рис. 2. Расположение тепловых узлов в поперечном сечении отливки «балка надressорная» (расстояние  $x = 225$  мм от центральной плоскости симметрии)

В качестве толщин тепловых узлов примем диаметры вписанных окружностей. В этом случае:

$$l_x^{m.y.1} = 35 \text{ мм}; l_x^{m.y.2} = 41 \text{ мм}.$$



Из геометрии тепловых узлов их приведённые размеры равны:

$$R_{m,y,1} = 10,9 \text{ мм}; R_{m,y,2} = 12,4 \text{ мм.}$$

Суммарный коэффициент локализации деформации:

$$\gamma_{\Sigma} = 2 + \frac{2L}{l_{m,y,1} + l_{m,y,2}} = 2 + \frac{2 \cdot 250}{35 + 41} = 8,6,$$

тогда коэффициенты локализации деформаций в первом и во втором узлах:

$$\gamma_1 = \frac{R_{m,y,1}^2}{R_{m,y,1}^2 + R_{m,y,2}^2} \cdot \gamma_{\Sigma} = \frac{10,9^2}{10,9^2 + 12,4^2} \cdot 8,6 = 3,75$$

Тогда значения поправочных коэффициентов на действие затруднённой усадки для тепловых узлов равны:

$$n_{m,y,1} = 1,59; n_{m,y,2} = 1,70.$$

Моделирование затвердевания балки выполнено в пакете программ Flow-3D. Результаты расчёта критерия пористости  $K_1$  представлены на рис. 3. Критическое значение критерия пористости для стали 20ГЛ равно  $0,01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1/2}$ .

$$\gamma_2 = \frac{R_{m,y,2}^2}{R_{m,y,1}^2 + R_{m,y,2}^2} \cdot \gamma_{\Sigma} = \frac{12,4^2}{10,9^2 + 12,4^2} \cdot 8,6 = 4,85$$

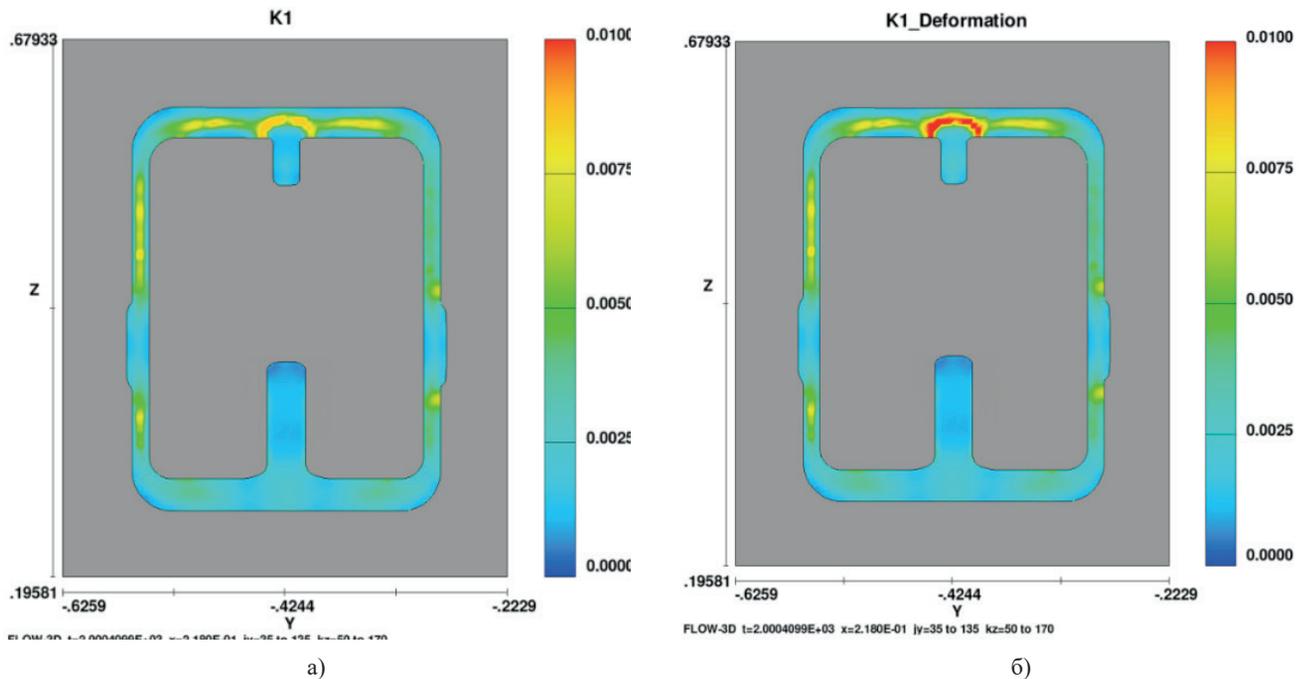


Рис. 3. Результаты моделирования отливки «балка надрессорная»:

- а) распределение значений бездеформационного критерия  $K_1$ ;  
б) распределение значений критерия пористости  $K_1$  с учётом влияния деформации

Из результатов расчёта бездеформационного критерия пористости (рис. 3а) следует, что пористость ни в одном из тепловых узлов не образуется. Однако введение поправочных коэффициентов (рис. 3,б) показывает, что в верхнем тепловом узле созданы условия для формирования усадочной пористости, которая будет инициатором трещинообразования в верхнем поясе отливки.

Ввиду большой протяжённости ребра верхнего пояса ( $\approx 650 \text{ мм}$ ), что значительно больше зоны действия прибыли (для стальных отливок ЗДП равна двум толщинам стенки, т.е.  $\approx 70 \text{ мм}$ ), для устранения усадочных дефектов по всей длине потребуется установка нескольких прибылей. Поэтому в целях уменьшения металлоёмкости формы можно рекомендовать другие подходы к решению проблемы:

1. Скорректировать тепловую составляющую путём установки в тепловой узел внутреннего холодильника (рис. 4).

2. Изменить механическую составляющую – увеличить податливость внутреннего стержня.

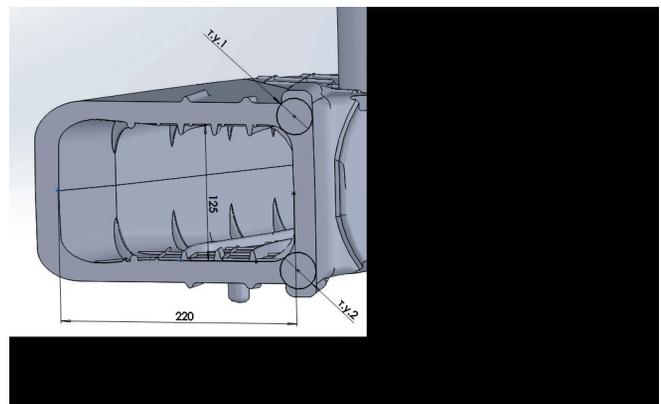


Рис. 4. Вариант расположения внутренних холодильников (обозначены красным цветом) относительно стержней (желтый)

#### Особенности затвердевания отливки «рама боковая»

Рассмотрим затвердевание отливки «рама боковая» из стали 20ГЛ. Отливка имеет коробчатое сечение. Одним



из проблемных мест является R55, в котором усадочная пористость служит очагом зарождения трещин (рис. 5).

Согласно геометрии отливки, расстояние между боковыми стенками отливки, с которых локализуется деформация, равна  $L_x = 220$  мм (литейные уклоны не учитываются), между верхним ярусом и нижним  $L_y = 125$  мм.

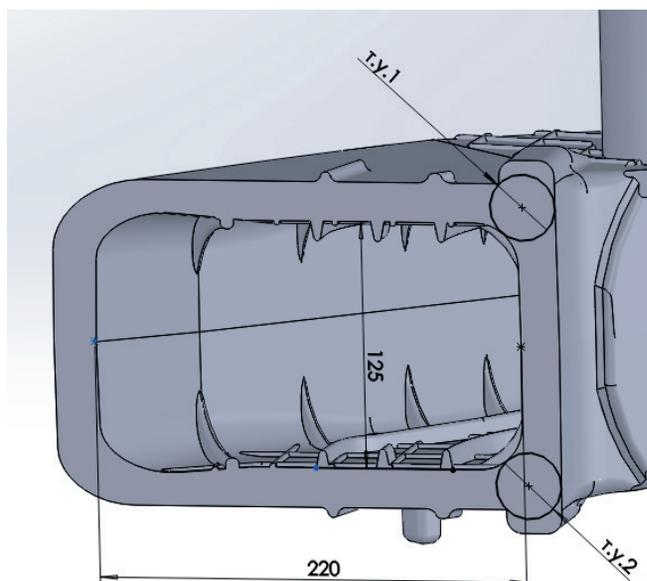


Рис. 5. Расположение тепловых узлов в сечении R55

В качестве толщин тепловых узлов примем диаметры вписанных окружностей. В этом случае

$$l_{m,y,1} = 34 \text{ мм}; l_{m,y,2} = 34 \text{ мм}.$$

Приведённые размеры указанных узлов

$$R_{m,y,1} = 11,6 \text{ мм}; R_{m,y,2} = 11,6 \text{ мм}.$$

Суммарный коэффициент локализации деформации:

$$\gamma_{\Sigma} = 1 + \frac{2L_x}{l_{m,y,1} + l_{m,y,2}} + \frac{2L_y}{l_{m,y,1} + l_{m,y,2}} = 1 + \frac{2 \cdot 220}{34 + 34} + \frac{2 \cdot 125}{34 + 34} = 11,15.$$

Тогда коэффициенты локализации деформаций в первом и во втором узлах:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \frac{\gamma_{\Sigma}}{2} = \frac{11,15}{2} = 5,58.$$

Значения поправочных коэффициентов на действие усадки для тепловых узлов равны

$$n_{m,y,1} = 1,76; n_{m,y,2} = 1,76.$$

Расчёт прибыли выполним для верхнего теплового узла. Исходными данными является объём теплового узла. В данном случае объём теплового узла равен:  $V_o = 624\,512 \text{ мм}^3$ . Коэффициент объёмной усадки для стали 20ГЛ примем равным  $\beta = 0,05$ . Коэффициент высоты прибыли примем  $k_e = 1,25$ .

Результаты расчётов прибылей по методикам Пржибыла и Василевского-Назаратина, стандартным и скорректированным, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчётов размеров прибылей

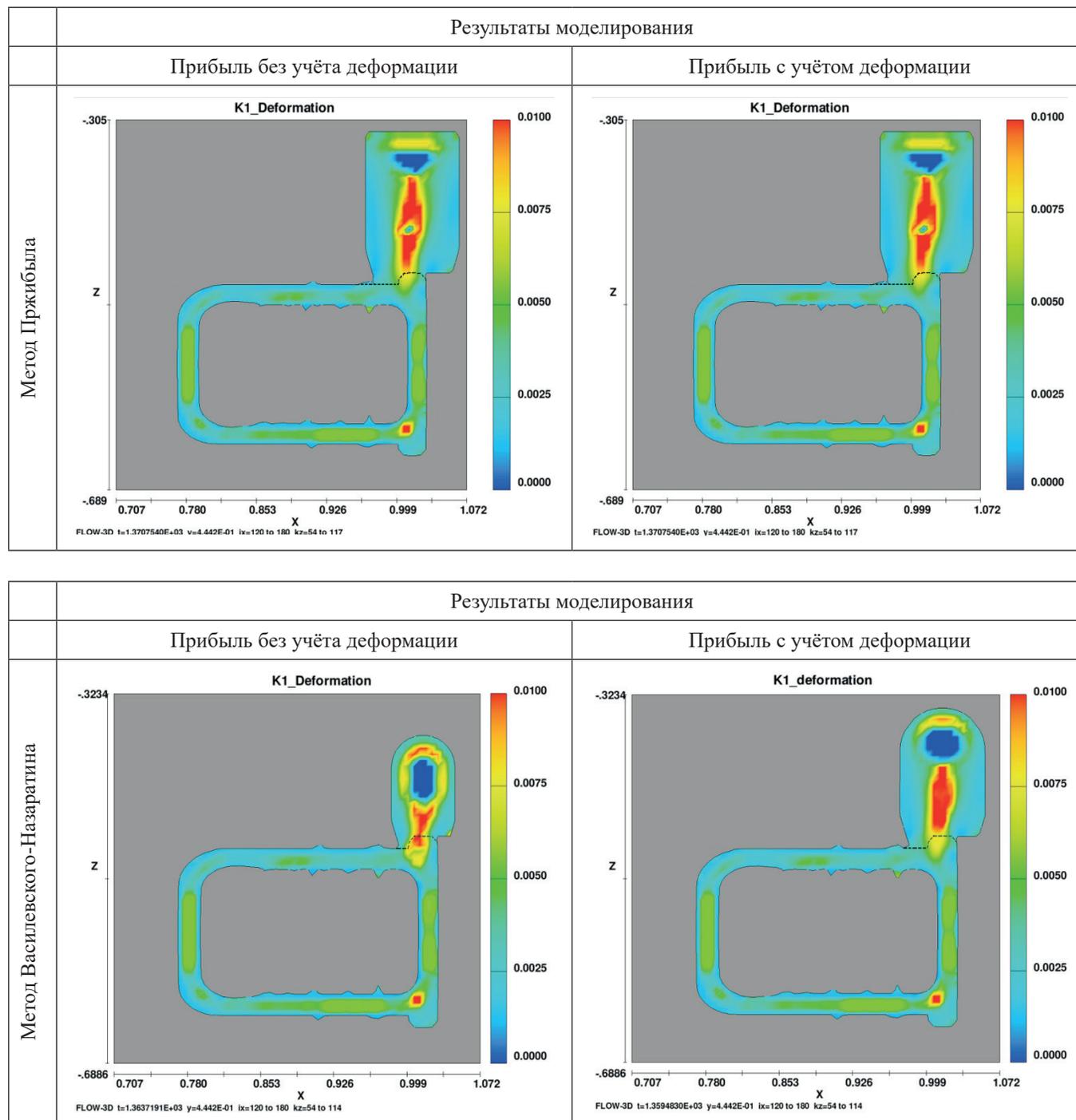
Метод расчёта	Пржибыл		Назаратин-Василевский	
	–	+	–	+
Учёт деформации	–	+	–	+
Объём прибыли, $V_{пр}$ , мм <sup>3</sup>	416 340	913 175	292 203	684 880
Диаметр прибыли, $D_{пр}$ , мм	75	98	64	85
Высота прибыли, $H_{пр}$ , мм	94	122	80	107
Приведённый размер прибыли, $R_{пр}$ , мм	15,65	20,34	13,9	18,5



Для проверки работы прибылей выполнено моделирование затвердевания отливок. Результаты представлены в табл. 2. Критическое значение критерия пористости для стали 20ГЛ равно  $0,01 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1/2}$ .

Из результатов расчёта рамы с бездеформационными прибылями следует, что пористость образуется в верхнем тепловом узле, но расчёт скорректированной прибылью показал, что в верхнем тепловом узле усадочный дефект устранен.

Таблица 2. Результаты моделирования R55 рамы боковой



Примечание: пунктиром показана граница «отливка-прибыль».

#### Вывод

Проведённые расчёты показали, что скорректированные методики расчёта прибылей с учётом действия за-

труднённой усадки на процесс затвердевания, позволяют уменьшить пористость в стальных и алюминиевых пробах. С учётом поправок к критерию пористости выполнено компьютерное моделирование затвердевания отливок типа «балка надрессорная» и «рама боковая», которое





УДК 621.073.7

*Бецкеков В.Г., Бараев А.В., Кулик В.И., Кондауров А.Е., Лесных Г.В.,  
Захаров И.А., Бочаров Ю.А., Синякова Т.И.*

### Исследование формообразования образцов сопел камер сгорания жидкостных ракетных двигателей методами сферодинамического и ротационного деформирования

Статья посвящена альтернативной технологии изготовления сопел камер сгорания жидкостных ракетных двигателей из жаропрочных сталей и сплавов методами сферодвижного и последующего ротационного формообразования, что позволяет повысить уровень прочностных эксплуатационных характеристик сопел двигателей изделий ракетно-космической техники.

**Ключевые слова:** сферодвижное формообразование, ротационная вытяжка, волновая природа пластичности, эффект Баушингера, спиральная объёмная морфология структуры материала.

Отечественное ракетостроение в своём развитии постоянно повышает требования к эксплуатационным свойствам двигательных установок (ДУ) летательных аппаратов (ЛА) и, в первую очередь, к работающим в экстремальных условиях соплам камер сгорания (КС) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).

Существующий уровень создаваемого поколения сопел КС ЖРД на предприятиях Госкорпорации «Роскосмос» не отвечает растущим требованиям, предъявляемым к тактико-техническим характеристикам (ТТХ) перспективных изделий ракетно-космической техники (РКТ). Сопла КС ЖРД работают в условиях высоких температур и газовых химически активных сред, что определяет уровень предъявляемых требований к их материалам по структурному состоянию, обуславливающему сохранение надёжности сопел при эксплуатации изделия РКТ.

В отечественной промышленности, в т.ч. ракетно-космической отрасли, детали типа «раструб» для высокотемпературных энергетических установок, а также сопла КС ЖРД изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов методом раскатки предварительно отформованных листовых полуфабрикатов. Однако детали, полученные подобным методом, имеют следующие недостатки: сформированная раскаткой геометрия детали значительно превышает её расчётную геометрию, следствием чего, является увеличенный объём механической обработки отформованной детали и повышенная вероятность нарушения сплошности металла готовой детали при воздействии на неё режущего инструмента, одновременно происходит снижение прочностных характеристик металла, сформированных при раскатке.

Наиболее перспективными методами изготовления следует считать методы изготовления деталей типа «раструб», реализуемых на фирмах «SCHMID» (Швейцария) и «Сумито Сейко» (Япония), которые применяют прессы орбитальной и планетарной штамповки с качающимися деформирующими инструментами, позволяющими реализовать волновые механизмы пластической деформации.

Специфика сопел КС ЖРД перспективных изделий ЖРД состоит в том, что уменьшение их полётного веса (снижение толщины стенки сопла) должно сопровождаться повышением прочностных характеристик их металла.

В результате проведения в течение последних трёх лет исследовательских работ в отделении технологии изгото-

вительного производства и отделении технологии сварки и пайки возникло новое технологическое направление: «сферодинамическая обработка прокатного листа с одновременной вырубкой полуфабрикатов в форме круга – штамповка из сферодинамического полуфабриката детали типа «стакан» – последующая ротационная вытяжка «стакана» и получение образца сопла КС ЖРД (рис. 1). Обозначим технологическое направление термином «сферовытяжка».



Рис. 1. Образцы сопел КС

Новизна направления «сферовытяжка» заключается в практическом использовании физического эффекта сферодинамики [1], открытого инженером В.Г. Бецкековым, при котором в процессе импульсного деформирования заготовки, размещённой на опоре, последняя, на определённом этапе обработки, приобретает свойства бесприводного источника деформирования заготовки и формирует в материал детали феноменологический комплекс структурно-чувствительных эксплуатационных характеристик.

Линейка оборудования нового технологического направления представлена на рис. 2, 3, 4.

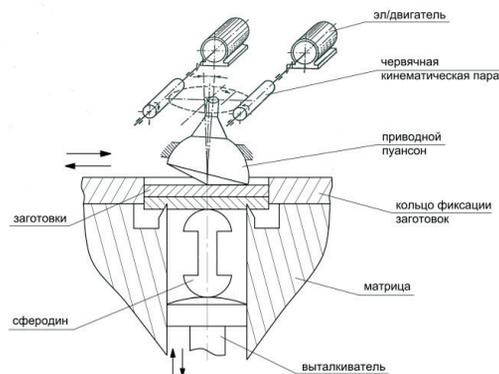


Рис. 2. Блок сферодинамической обработки



Рис. 3. Гидравлический пресс мод. RUE-160 (P=1,6 МН)



Рис. 4. Стан ротационной вытяжки мод. КЖ-9901

Линейка изменения формы исходной листовой заготовки представлена на рис. 5, где расположены (справа налево): сферодинамический круговой полуфабрикат – деталь «стакан» – образцы сопел КС ЖРД.

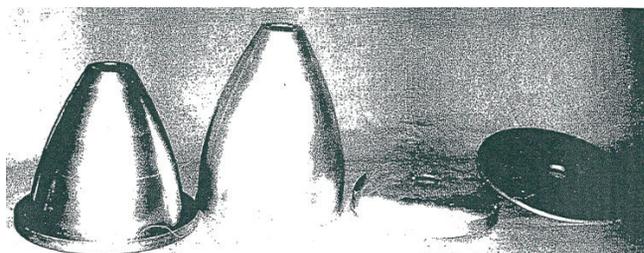


Рис. 5. Линейка изменения формы исходной листовой заготовки

Процесс сферовытяжки осуществляется следующим образом: две квадратные заготовки листового проката, сложенные пакетом, размещают в гравюре матрицы блока сферодинамической обработки (рис. 2) с упором на выталкиватель через сферодин; затем к пакету заготовок подводят приводной пуансон, который воздействует на пакет заготовок путём обкатывания и качания, создавая в поверхностном слое металла энергетические условия реализации эффекта Баушингера – «запоминание» материалом истории его нагружения [2]. При этом деформирование металла поверхностного слоя верхней заготовки происходит на уровне верхнего (большого) предела реализации эффекта Баушингера материала заготовки, соответствующего  $0,7\sigma_T$  ( $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки). В процессе обкатывания пуансоном пакета заготовок матрица режущей кромкой постепенно внедряется в металл нижней заготовки пакета; при этом сферодин отслеживает перемещения пуансона и по мере обработки пакета заготовок повышает своё энергетическое состояние, спонтанно (без внешнего возмущения) переходит в состояние динамической неустойчивости, производя, при этом деформирование металла поверхностного слоя нижней заготовки на уровне нижнего (меньшего) предела реализации эффекта Баушингера материала заготовки, соответствующего  $0,2\sigma_T$  ( $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки). В определённый момент обработки пакета заготовок пуансоном происходит разделение нижней заготовки на кольцевой отход и круглый сферодинамический полуфабрикат, который удаляют из гравюры матрицы и переносят на следующую позицию обработки полуфабриката – гидравлический пресс мод. RUE-160 (P=1,6 МН) (рис. 3), где формируют деталь «стакан», который, в свою очередь, размещают на оправке стана ротационной вытяжки мод. КЖ-9901 (рис. 4) и давящим роликом, установленным в суппорте стана (рис. 6), изготавливают образец КС ЖРД (на рис. 5 крайняя деталь слева). Рабочий цикл сферовытяжки завершён, а в гравюре матрицы блока сферодинамической обработки на оставшейся листовой заготовке размещают следующую деталь и процесс повторяют.



Рис. 6. Давильный ролик



Предварительные исследования по направлению «сферовытяжка» позволили определить оптимальную геометрию рабочего профиля давящего ролика (рис. 6, 7, 8) стана ротационной вытяжки (рис. 4), обеспечивающую формирование в металле образца КС ЖРД следующего структурного состояния по толщине образца сопла (рис. 9). На конструкцию давящего ролика подана заявка на получение патента РФ на полезную модель от 28.11.2017 №201714/403, по которой принято положительное решение о выдаче патента РФ от 26.04.2018.

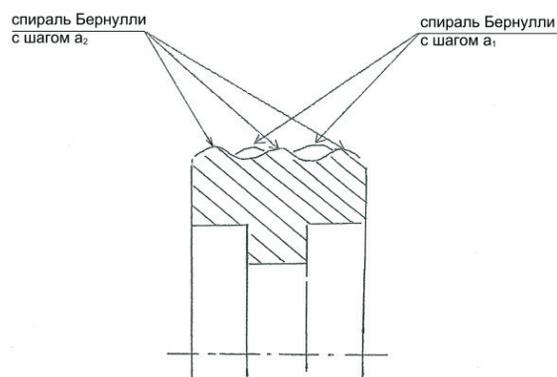


Рис. 7. Сечение давящего ролика

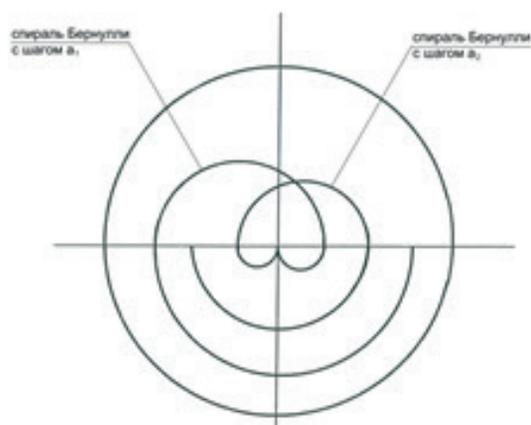


Рис. 8. Геометрия рабочей поверхности давящего ролика

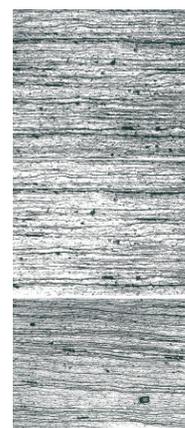


Рис. 9. Структура стенки образца сопла КС ЖРД

Анализ структуры металла иллюстрирует реализацию волновых механизмов пластической деформации, являющихся знаковым признаком проявления эффекта сферодинамики; структурным обращением упомянутых волновых механизмов является волокнистая морфология массива матричного металла и равномерное распределение скоагулированных упрочняющих фаз, что в итоге обеспечивает повышение прочностных характеристик металла с одновременным снижением вероятности нарушения его сплошности в условиях знакопеременных нагрузок, высоких температур и активных сред – являющихся эксплуатационным режимом функционирования сопел КС ЖРД.

Проведённый цикл экспериментальных работ, в том числе создание патентоспособного конструкторского решения дал основание для оформления требуемой документации на открытие НИР «Сферовытяжка» на период 2019–2021 гг.

#### Список литературы

1. Способ обработки материалов давлением и устройство для его осуществления Европатент W-097/39847 МПК В21Д 37/12//В.Г. Бещеков, В.В. Булавкин, Ю.Ф. Назаров// ВОИС, 1997.
2. Р. Хоникомб «Пластическое деформирование металлов», М.: Наука, 1972, 217 с.

#### ♦ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ



## ◆ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

УДК 620.163.29 (063.74)

*Новицкая К.А., Барышников В.И.*

### Новый взгляд на масс-спектрометрический контроль герметичности способом «накопления при атмосферном давлении»

В статье рассматривается контроль герметичности способом накопления при атмосферном давлении применительно к ОСТ-92-1527. Учитываются исторические аспекты возникновения и развития данного способа в ракетно-космической промышленности. Оцениваются возможности повышения чувствительности контроля в 20÷30 раз посредством применения новых течеискателей с цифровой обработкой информации. Отмечается роль допускаемой загазованности испытательного помещения гелием для получения хороших результатов течеискания. Даются рекомендации по совершенствованию отечественных гелиевых масс-спектрометрических течеискателей и технологического оснащения. Описываются операции по настройке приборов и уменьшению погрешностей измерений течей на объекте испытаний до  $\pm 20\%$ .

**Ключевые слова:** накопление в атмосферу, способ мешка, микроконцентрации, отбор пробы, ppm, объём накопления, категории объёмов накопления, составление эталонных концентраций, локальное течеискание, контроль степени герметичности.

Первый патент на использование приёма для оценки герметичности объектов содержащих, хорошо идентифицируемый (пробный) газ под давлением, появился в пятидесятых годах прошлого века в Германии. В западной литературе данный способ называется «метод мешка» и имеет множество нюансов, когда в начале поиска локальной течи определяется область утечки или направление для её поиска, а затем, сужая зону охвата мешка, постепенно выявляется точное место расположения течи.

Несмотря на большое число авторских свидетельств по этой теме, современное понимание технологии контроля герметичности способом «накопления при атмосферном давлении» (НАД) не отмечает значительных преимуществ данного способа перед другими способами контроля степени герметичности или способами локализации мест течей. Это связано с тем, что закрытые, в свое время от общего пользования, технологии течеискания в ракетно-космической промышленности (РКП) практически не развивались, а отечественные разработчики течеискательной аппаратуры ориентировались только на копирование приборов зарубежного производства. Однако эти приборы не могли принести с собой развития технологии, которая до сих пор отсутствует на западе.

Способ измерения накопленной при атмосферном давлении концентрации гелия в зоне мест расположения течей является естественным. Масс-спектрометр измеряет только объёмную концентрацию гелия (парциальное давление), перенесённую к области источника ионов, которую затем пересчитывают в поток по характеристикам вакуумной системы прибора. Порог чувствительности течеискателя к концентрации оценивают примерно на уровне  $5 \cdot 10^{-7}\%$ , но реализовать такую приборную чувствительность на объекте испытаний дело весьма проблематичное. Необходимо, чтобы течеискатель индицировал не только текущее значение потока гелия и приборную чувствительность в данном режиме, но и значение концентрации гелия во входящем газе, а также приборную

чувствительность к концентрации в реальной схеме течеискания.

Однако отечественные разработчики течеискателей не торопятся дополнить свойства приборов возможностью измерения микроконцентраций гелия и других полезных функций. Только один течеискатель ASM 340 фирмы Pfeiffer Vacuum измеряет микроконцентрацию гелия в ppm (одна миллионная объёмная доля), да и то, при строго заданном входном потоке.

Испытатели были бы благодарны разработчикам течеискателей, если приборы измеряли не только поток гелия, но и общий входной поток, а также концентрацию гелия, атмосферное давление, температуру воздуха в рабочем помещении и др. Для этого нужно сделать немного: поставить датчик атмосферного давления, измеряемую температуру вывести на дисплей, регистрируемое входное давление пересчитать в поток и, поделив ионный ток на входной поток, индицировать входную концентрацию гелия. В настоящее время специалисты течеискания осуществляют все расчёты полученной утечки вручную: переводят концентрацию в милливольты, затем из процентов в ppm, вводят поправки по температуре и атмосферному давлению.

**Современный течеискатель, имеющий большой резерв вычислительных мощностей, должен решать задачи операторов, присущие технологии контроля герметичности.**

Основным документом, регламентирующим технологию проведения испытаний на герметичность, в том числе и способом накопления при атмосферном давлении, является ОСТ 92-1527-89 «Методы испытаний на герметичность с применением масс-спектрометрических течеискателей». В отраслевом стандарте подробно изложены технологии НАД: конструирование объёмов накопления, отбор пробы газа, пользование эталонными концентрациями и расчёт значения полученной утечки. Однако ОСТ 92-1527-89 рассчитан на применение старых аналоговых течеискателей и не переиздавался более 25 лет.



Историческим просчётом данного стандарта является допуск большого (полтора кратного) изменения фона гелия в объёмах накопления, за счёт возможной загазованности испытательного помещения. При неуправляемом изменении фона гелия в объёме накопления, минимально регистрируемая прибавка за счёт накопления гелия ограничивается уровнем  $\geq 2,5$  ppm. На современных течеискателях при наличии стабильного фона гелия минимально фиксируемая концентрация составляет  $0,05 \pm 0,1$  ppm. Это зависит от величины отбираемой пробы, настройки течеискателя и других факторов, но, в любом случае, гарантирует определение течи с потоком гелия в  $20 \pm 30$  раз меньшей, чем принято по стандарту.

Причиной допуска в стандарте явилось недоверие к стабильности естественного фона из-за параллельной работы в одном помещении методом обдува или сброса гелия в помещения, прилегающие к испытательным.

При правильной организации дренажа (сброса) гелия в атмосферу выше крыши испытательного корпуса, осуществлении способа обдува в другом здании, хранения рампы с баллонами гелия на улице, будет обеспечена стабильность фона гелия на уровне 5 ppm в испытательном помещении.

Минимальный порог концентрации гелия, как и порог потока, обратно пропорционален уровню регистрируемого течеискателем фона гелия – чем больше забор воздуха через щуп, тем выше уровень фона и тем выше (хуже) порог чувствительности прибора. Кроме того, на современных масс-спектрометрах график шумов электронно-оптической системы имеет минимум по величине давления в камере. Электростатические шумы максимальны при самом высоком вакууме, а шумы дрейфа и рассеяния посторонних частиц максимальны при самом низком вакууме в спектрометре. Выбор оптимального вакуума в масс-спектрометре позволяет снизить дрейф и флюктуации ионного тока и, таким образом, снизить минимально фиксируемую концентрацию до уровня  $0,03 \pm 0,05$  ppm. Такое маленькое регистрируемое изменение концентрации позволяет говорить о нахождении течей с потоками гелия порядка  $10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

ОСТ 92-1527 содержит ещё одну грубую ошибку. В таблице пересчёта потоков из одной размерности в другую, обозначение  $\text{м}^3 \text{ Па/с}$  приравнено к 1 Вт. В системе СИ любые две физически разные величины не могут обозначаться одинаковыми размерностями.

Пригодность состояния течеискателя к контролю герметичности ракетно-космической техники (РКТ) обеспечивалась применением ОСТ 92-4655-85 «Методика метрологической аттестации и проверки течеискателей типа ПТИ», который рассчитан на применение аналоговых течеискателей. В 2015 году ОСТ 92-4655-85 изъят без замены, поэтому гарантировать пригодность течеискателей к контролю герметичности изделий РКТ невозможно. Целесообразно выпустить новый стандарт, аналогичный ОСТ 92-1527 для контроля герметичности с применением гелиевых масс-спектрометрических течеискателей с цифровой обработкой информации. В новом стандарте необ-

ходимо гарантировать пригодность течеискателей к контролю герметичности объектов РКТ, путём проведения ведомственной аттестации приборов.

Для эффективной работы с течеискателями типа ТИ1-50 способом НАД забор пробы из объёма накопления или от бачка с эталонной концентрацией необходимо производить нерегулируемым щупом-зондом в диапазоне натеканий из атмосферы  $2,0 \pm 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ : чем меньше натекание, тем меньше фон гелия, но больше время получения достоверного сигнала. При большем натекании порог чувствительности к концентрации выше. Нерегулируемый щуп-зонд даёт большую стабильность процессу измерения и может быть выполнен по ОСТ 92-3233-78 «Щупы-натекатели» с насадкой в виде иглы Льюера, интегрированной непосредственно в щуп.

Согласно ОСТ 92-1527-89 объёмы накопления по степени собственной не герметичности различают на три категории. Такое деление не включает в себя полностью герметичные объёмы накопления, которые можно отнести к нулевой категории и которые могут применяться для прецизионных измерений при высокой разрешающей способности течеискателя к концентрации гелия.

Объёмы накопления следует изготавливать минимальной ёмкости при максимальной площади охвата проверяемой поверхности объекта. Однако многоразовый отбор пробы из объёма накопления не должен существенно влиять на концентрацию гелия в последнем. Только работа с объёмами накопления нулевой и первой категорий даёт приемлемую точность измерений. Работа с объёмами накопления второй и третьей категорий не может оцениваться аналитически (по приведённым в стандарте формулам) и может рассматриваться как пороговые испытания. По окончании времени накопления, отсутствие повышения концентрации гелия в объёме накопления свыше планируемого гарантирует отсутствие утечки гелия свыше заданной. Объёмы накопления второй и третьей категорий, с точки зрения равномерности распределения гелия, могут быть длинномерными или даже незамкнутыми. Типичным примером незамкнутого объёма накопления является длинномерный объём, полость которого располагается над сварным швом и герметизирована по краям. Забор пробы в таком объёме накопления осуществляется с некоторым шагом по длине.

Обработка технологии контроля герметичности способом НАД может производиться только путём аттестации (моделирования) натуральных испытаний с типовой оснасткой. В типовой объём накопления вводят поток гелия от контрольной течи, выдерживают расчётное время накопления и анализируют изменение концентрации гелия в объёме. Стабильность результатов контроля герметичности определяется только идентичностью выполнения всех операций.

В качестве атмосферных контрольных течей можно с успехом использовать вакуумные контрольные течи Гелит-1 и Гелит-2. Дело в том, что количество вытекающего из диффузионной течи гелия не зависит от давления снаружи, а определяется разностью парциальных давлений

гелия снаружи и изнутри. На патрубков течи типа Гелит через резиновый переходник насаживают иглу Льюера с диаметром отверстия порядка  $0,8 \div 1,0$  мм. Контрольную течь устанавливают в вертикальное положение (иглой вниз) и выдерживают систему в течение нескольких часов. Готовая к применению течь должна все время оставаться в вертикальном положении. Иглу приготовленной контрольной течи Гелит вводят в объём накопления и фиксируют в вертикальном положении. По окончании расчётного времени накопления иглу течи выводят из объёма накопления и полученное изменение концентрации гелия фиксируют течеискателем.

Определение величины потока гелия от атмосферной контрольной течи при натекании в объём накопления нулевой категории показывает хорошие результаты по точности, (порядка  $5 \div 7\%$ ). Это связано с тем, что погрешность изготовления эталонных концентраций не превышает  $3 \div 4\%$ , что значительно ниже, чем погрешности калибровки контрольных течей. Путём направления потока от течи в вакуумный объём накопления и последующим напуском в него азота и анализа накопленной концентрации течеискателем можно весьма точно откалибровать любую вакуумную контрольную течь.

Для изготовления объёмов накопления лучше применять материалы, практически не пропускающие гелий за счёт диффузии – металл, стекло, металлизированные пленки, вакуумно-плотную керамику и т.п. Ограниченные по площади участки герметизируются липкой лентой ПХЛ.

В качестве баллончиков для приготовления и хранения эталонных концентраций лучше всего подходят фляжки из нержавеющей стали с резьбовой пробкой. Фляжка герметизируется прокладкой, а в пробке через прокладку прокалывается отверстие для забора пробы. Если ёмкость фляжки составляет 1 литр, то путём последовательного разбавления удобно сделать концентрации  $+1000$  ppm, а затем любые другие, например,  $+5$  ppm (удвоенная воздушная концентрация).

Если по условиям испытаний время накопления превышает несколько часов, то предпочтителен дистанционный отбор пробы в отдельные откакумированные ёмкости – до начала времени накопления и по его окончании. Обе пробы приводят к единым условиям (атмосферное давление, температура) и анализируют на одном и том же течеискателе одновременно.

Единица потока  $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$  привязана к температуре  $20^\circ\text{C}$  и к атмосферному давлению (760 мм) 101 325 Па. Это означает, что для прецизионных измерений при реализации способа НАД, необходимо учитывать реальные температуру и атмосферное давление. Прецизионные условия анализа концентрации гелия можно выполнить, если хорошо подготовить течеискатель, выдержать оптимальные условия отбора и хранения проб, стандартизировать систему хранения проб. При выполнении таких требований возможно получить разрешающую способность при измерении прибавки концентрации порядка  $0,005$  ppm. Данный подход позволяет говорить о высокочувствительном контроле герметичности крупных объектов в полевых

условиях. Так, например, для ракеты-носителя (РН) среднего класса, контроль герметичности в транспортно-пусковом контейнере, позволяет обнаруживать в полевых условиях (арсенал) утечки гелия порядка  $10^{-8} \text{ м}^3\text{Па}/\text{с}$  ( $10^{-4}$  л мкм рт. ст/с) и даже меньше.

В полевых условиях температура окружающего воздуха и атмосферное давление могут сильно отличаться от лабораторных условий. Поправочные коэффициенты определяются на момент взятия из объёма накопления второй пробы (по окончании времени накопления).

$$Q_r = 2,7710^{-5} K_t K_p \frac{\Delta C V_n}{t_n}; \text{ м}^3\text{Па}/\text{с}; \quad (1)$$

где  $Q_r$  – суммарный поток по гелию,  $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$ ;

$\Delta C$  – повышение концентрации гелия в объёме накопления, ppm;

$t_n$  – время накопления, час;

$V_n$  – вместимость объёма накопления,  $\text{м}^3$ ;

$K_t$  – поправочный коэффициент по температуре;

$K_p$  – поправочный коэффициент по давлению

$P$  – атмосферное давление при конечном заборе пробы, Па.

$Q - \text{м}^3\text{Па}/\text{с}$	$V_n - \text{м}^3$	$\Delta C, \text{ ppm}$	$t_n - \text{часы}$	$T - ^\circ\text{C}$	$P - \text{кПа}$
$5,75 \cdot 10^{-7}$	100	0,005	24	30	100

$$\Delta C = (C_2 - C_1); \quad (2)$$

где  $C_1$  – концентрация гелия до накопления, ppm;

$C_2$  – концентрация гелия после накопления, ppm;

$T$  – температура при конечном заборе,  $^\circ\text{C}$ ;

$P$  – атмосферное давление при конечном заборе пробы, кПа.

$$K_t = \frac{273}{(293 - T)}; \quad (3)$$

$$K_p = \frac{101,35}{P}. \quad (4)$$

Возникновение таких потребностей определяется, как правило, нарушениями нормального жизненного цикла объекта: длительное хранение в арсенале, дорожно-транспортное происшествие при передислокации, отклонения от теоретического контура объекта при длительном нахождении под давлением, обнаружение дефектов герметичности в партии изделий.

Способ НАД применим для испытаний на герметичность любых типовых элементов систем ПГС, например, ниппельных, фланцевых и сварных соединений трубопроводов, сварных швов баков, межбаковых пространств на собранном изделии и т.п. Если объект испытаний имеет ограниченный доступ к проверяемой поверхности, то кроме НАД найти место течи другим способом, не представляется возможным.

По окончании испытаний на степень герметичности в вакуумной камере при обнаружении недопустимой величины утечки будет уместно, не сбрасывая рабочего давления гелиево-воздушной смеси из объекта испытаний, выкатить изделие из камеры и приступить к нахождению зон расположения течей способом НАД, а затем уточнить точное место и величину утечки способом шупа.



УДК 620.163.29 (063.74)

*Кологов А.В., Соловьев В.Н., Тихомиров К.А., Новицкая К.А., Барышников В.И.*

## **Барокамерный контроль суммарной герметичности ракетно-космической техники: история и перспективы**

В статье рассматривается история начала вакуумных испытаний изделий ракетно-космической техники. Прослеживается этапность получения высоких технических характеристик как вакуумных камер, так и средств контроля герметичности. Приводятся принципы разграничения больших и малых камер, с акцентом на формирование систем течеискания в проекте камеры, а также требования соблюдения отечественных стандартов в области определения чувствительности вакуумных способов контроля герметичности. Даются рекомендации по обеспечению высоких норм определения суммарной степени герметичности и способов локализации мест течей.

**Ключевые слова:** вакуумная камера, двухбарьерные уплотнения, оптимизация вакуумной системы, контроль герметичности, измерительный канал, локализация мест течей, контрольные течи, газоотделение.

Потребность вакуумного контроля герметичности изделий ракетно-космической техники (РКТ) появилась со времени запуска первого искусственного спутника. Затем появились спутники разного назначения, но во всех аппаратах приборы работали в условиях близких к атмосферным. Это наложило особые требования по герметичности оболочек приборных контейнеров.

Барокамерные испытания разных агрегатов проводились и ранее, но сейчас появился особый класс испытаний: контроль суммарной герметичности изделия в специализированной вакуумной камере с применением масс-спектрометрических течеискателей. При испытаниях первых тяжёлых космических аппаратов (КА) серии «Протон» появилась необходимость метрологической оценки герметичности объектов испытаний.

Вакуумные камеры изготавливались на специализированных предприятиях в Сумах, Казани, Балашихе и некоторых других городах, прежде всего для обеспечения технологии вакуумирования. Главный недостаток такого подхода – элементы контроля герметичности не предусматривались изначально в проекте камеры, а устанавливались предприятиями-изготовителями РКТ самостоятельно. В некоторых случаях такой подход существует и сегодня.

**Для получения наиболее высоких характеристик течеискания вакуумная камера изначально должна проектироваться под свою основную задачу.**

В проекте камеры необходимо учитывать многие специальные требования: достаточность объёма, малое газоотделение, нормируемую герметичность уплотнений, ограничение материалов, пропускающих гелий, поддержание необходимого уровня чистоты поверхностей, оптимальную схему каналов течеискания. Многие ранее построенные вакуумные камеры не обладают соответствующими характеристиками.

Следует сразу разделить понятия «малая вакуумная камера» и «большая вакуумная камера». Вакуумная камера, в которой нет средств высоковакуумной откачки (кроме течеискателя) считается малой. Возможный объём малой камеры определяется эффективностью использования высоковакуумных откачных средств течеискателя

на камеру. Для повышения эффективности необходимо уменьшать длину и увеличивать диаметр соединительного трубопровода. Старые течеискатели типа ПТИ-6 имеют входной фланец ДУ-32 и, естественно, являются более эффективными против современных течеискателей с ДУ-25.

Уменьшение проходного сечения входного фланца современных течеискателей продиктовано соображениями далёкими от эффективности работы с малыми камерами: уменьшение габаритов, веса и потребляемой мощности новых моделей течеискателей. Теперь разработчики задумались об эффективности и наиболее передовые фирмы поставляют некоторые модели с входным фланцем ДУ-40. С таким течеискателем предельный объём малой камеры может достигать 500 л. Хороший течеискатель не должен ограничивать объёмы отбираемой пробы, это определяется технологическим процессом. Поэтому тенденция снижения мощности откачных высоковакуумных средств течеискателя порочна в своей основе.

Для больших вакуумных камер увеличение ДУ входного фланца не имеет решающего значения, так как подключение течеискателя осуществляется на выход одного из высоковакуумных насосов откачки камеры. Здесь необходимо, чтобы течеискатель мог забирать как можно большее количество газа из камеры через высоковакуумный насос, что можно достигнуть только увеличением скорости откачки высоковакуумного насоса течеискателя.

Некоторые модели современных течеискателей выпускаются с эффективной скоростью откачки турбомолекулярного насоса до 150 л/с и течеискатель может быть подключен на выход высоковакуумного, как правило, турбомолекулярного, насоса со скоростью откачки порядка 3200 л/с, что при установившемся типичном давлении в вакуумной камере ниже  $3 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. полностью поддерживает выхлоп турбонасоса измерительного канала. Конечно, идёт речь о режиме течеискателя только в «прямом режиме».

На больших вакуумных камерах старых образцов течеискатель, как правило, подключался к низковакуумному коллектору, соединяющему выхлоп всех высоковакуумных насосов, что серьёзно снижает чувствительность



способа и создает тупик при анализе загазованности полости камеры от течей на изделии. Необходимо, чтобы разделение потоков гелия между направляемыми в схему течеискания и на выхлоп осуществлялось по высокому вакууму, а на входе в турбонасос канала измерений стоял затвор пропорционального регулирования. Тогда возможно регулирование чувствительности метода в широком диапазоне и эффективный контроль вакуумной загазованности камеры гелием.

Большинство современных течеискателей занесены в реестр измерительных приборов и подвергаются соответствующей поверке. К работе в составе большой вакуумной камеры данный процесс не имеет никакого отношения. Прежде всего потому, что линейность показаний течеискателя по потоку гелия в зависимости от входного потока никак не поверяется, а на некоторых моделях течеискателей дополнительная погрешность показаний (ТИ1-50И) может достигать сотен процентов. Диапазон удовлетворительно калибруемых показаний течеискателя лежит на порядок выше его порога чувствительности. Отсюда, диапазон удовлетворительно нормируемых точностей в определении течи на изделии лежит также на порядок выше порога чувствительности течеискателя.

Определение характеристик масс-спектрометрического метода контроля на больших вакуумных камерах должно осуществляться только в соответствии с ГОСТ 53177-2008 «Вакуумная техника. Определение характеристик масс-спектрометрического метода контроля герметичности» по контрольной течи, установленной непосредственно на камеру.

#### **Предварительная откачка штуцера течи перед подключением к камере обязательна.**

При этом не снимается вопрос сохранения линейности показаний при изменении газоотделения элементов изделия и вакуумной камеры во времени. За время испытаний газоотделение от камеры и объектов испытаний может изменяться в десятки раз. Если величина показаний по течи (чувствительность) может изменяться, то необходимо поддерживать рабочую точку течеискателя по давлению в камере масс-спектрометра с помощью азотного натекавателя, установленного на входе течеискателя. Приемлемую точность определения течей на изделии  $\pm 20\%$  можно достигнуть, если погрешности калибровки контрольной течи, установленной на камере, не будут превышать  $\pm 10\%$ , погрешности самого течеискателя от нелинейности характеристик и изменений входного давления также не должны превышать  $\pm 10\%$  по каждому параметру.

Система откачки вакуумной камеры должна состоять из форвакуумных насосов, вынесенных за пределы испытательного помещения, средневакуумных насосов Рутса, присоединяемых к камере через соответствующие затворы и турбомолекулярных высоковакуумных насосов. Количество турбомолекулярных насосов должно быть не менее двух, один из которых (с пропорциональным затвором) задействован в канале с течеискателем. До подачи гелия в изделие все турбомолекулярные насосы участвуют в откачке камеры. После выхода камеры на заплани-

рованный вакуум, определяются параметры чувствительности системы по контрольной течи, установленной на камеру. Исходные параметры регулируются желаемым вскрытием затвора на входе турбомолекулярного насоса или настройкой эмиссии течеискателя. При величине течи гелия на изделии, превышающей возможности измерений, затвор на турбомолекулярном насосе канала измерения прикрывается до получения приемлемых показаний. Следует помнить, что при этом чувствительность показаний по камере, соответственно, меняется.

Опыт применения на вакуумных камерах, предназначенных для контроля герметичности, в качестве откачных средств, гетерононных и титановых (особенно дуговых) насосов даёт отрицательный результат. Нестабильность скорости откачки и возможная гелиевая «отрыжка» делают измерения в такой камере крайне недостоверными.

Локальный поиск утечки, обнаруженной в большой вакуумной камере создаёт ряд сложностей. Прежде всего, локализация течей в составе работающей вакуумной камеры чрезвычайно трудна и не надёжна. На эту тему с 1960 года зарегистрировано большое количество авторских свидетельств, но реальные результаты весьма скромны. Вакуумные камеры, разрабатываемые в настоящее время в Научно-исследовательском институте вакуумной техники им. С.А. Векшинского, как правило, содержат элементы систем локализации мест течей, а в МАИ регулярно защищаются дипломные работы на данную тему. И несмотря на это, предприятиям приходится держать одного-двух квалифицированных специалистов для выполнения работ по уточнению мест течей на изделии. Локальные методы контроля герметичности должны иметь возможности, превышающие заданную суммарную степень герметичности. Для дальнейшего поиска течей весьма важно установить величину обнаруженной утечки, определить конкретные меры поиска и имеющиеся ресурсы.

Наилучшие результаты локального поиска течей будут получены, если, не снимая рабочего давления гелиево-воздушной смеси (ГВС), в камеру напустить атмосферу, выкатить объект испытаний для удобства поиска и приступить к реализации локального поиска течей. В первую очередь, исследуются технологические магистрали подачи ГВС. При локальном поиске течей приточно-вытяжную вентиляцию следует отключить, а поиск начинать с нижней части объекта испытаний.

Доскональная статистика утечек, обнаруженных в производстве серийного изделия, позволяет влиять на технологию изготовления и проще обнаруживать места появления брака. Конечно, хотелось, чтобы течеискатели обладали рядом дополнительных функций, облегчающих локализацию мест течей: индикацию входного потока, измерение концентрации гелия в ppm, защиту от фона гелия в помещении, возможностью дополнительных технологических вычислений, более жёсткий контроль технологии применяемого способа течеискания и т.п. Всё-таки, самое главное – перенести отклонения по нормам герметичности на технологию производства и улучшить перспективу выпуска годных изделий.



Хорошая большая вакуумная камера, предназначенная для контроля суммарной герметичности изделий, должна изготавливаться специально для решения только этой задачи, так как любое совмещение функций приведет к ухудшению параметров течеискания. При изготовлении камеры следует придерживаться некоторых важных положений:

- предпочитать построение камеры с горизонтальным расположением основной оси;
- не допускать использование коллекторов, объединяющих выхлопы высоковакуумных насосов;
- изготавливать стенки камеры из коррозионностойкой стали;
- не использовать резиновые герметизирующие прокладки, применять прокладки из эластичных материалов типа «Витон» или фторопластовые прокладки, подпружиненные с наружной стороны эластичным элементом;
- осуществлять электрополировку элементов конструкции для достижения хорошего уровня чистоты поверхностей камеры;
- не допускать полировку внутренних поверхностей камеры с использованием разных полировочных паст (ГОИ и т.п.);
- не допускать на внутренних поверхностях камеры наличие следов окалины или коррозии, которые следует удалять абразивным инструментом;
- изготавливать выдвижную каретку камеры, на которой располагается изделие, из материалов, имеющих малое газоотделение, с высокой чистотой поверхности;
- следить, чтобы откатные крышки имели только двухбарьерные уплотнения с вакуумным промежутком;
- подключать системы наддува и дренажа только с использованием герметичных сильфонных рукавов из нержавеющей стали;
- осуществлять дренаж гелия в атмосферу выше крыши здания с испытательным помещением;
- хранить неработающую камеру под низким вакуумом;
- применять вымораживающие ловушки только на входе течеискателя;
- помнить, что применение цеолитовых насосов, как правило, не даёт ожидаемых результатов, так как порог чувствительности определяется, главным образом, уровнем фона гелия;
- помнить, что длительная выдержка изделия под вакуумом (до 12–14 часов) перед подачей гелиево-воздушной смеси, не только уменьшит газоотделение и улучшит

порог чувствительности, но и может пойти в зачёт односторонней вакуумной сушки проверяемых поверхностей перед испытаниями;

- проводить собственные испытания герметичности вакуумной камеры способом обдува с тем же течеискателем, при этом суммарное натекание из атмосферы не должно превышать  $10^{-2}$  л мкм рт.ст/с.

Выполнение современных требований к характеристикам течеискателей, точности калибровки контрольных течей и специализации камер по основному назначению, позволяет получать весьма высокие метрологические характеристики контроля степени герметичности изделий при проведении испытаний в больших вакуумных камерах.

Если считать приемлемую точность определения величины течи на изделии  $\pm 20\%$ , придерживаться приемлемого времени обезгаживания перед подачей гелия в изделие, то гарантированное определение минимальной течи на изделии можно рассматривать для разных вакуумных камер с типовым изделием в следующих величинах:

- вакуумная камера объёмом до  $1,0 \text{ м}^3 - 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ;
- вакуумная камера объёмом до  $3,0 \text{ м}^3 - 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ;
- вакуумная камера объёмом до  $10 \text{ м}^3 - 3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ;
- вакуумная камера объёмом до  $30 \text{ м}^3 - 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ;
- вакуумная камера объёмом до  $100 \text{ м}^3 - 3,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ;
- вакуумная камера объёмом до  $300 \text{ м}^3 - 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ;
- вакуумная камера объёмом до  $1000 \text{ м}^3 - 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

Для любой крупной вакуумной камеры должна быть составлена производственная инструкция по контролю герметичности в ней типовых деталей сборочных единиц предприятия. Инструкция должна учитывать реальные характеристики камеры, а также объектов испытаний и позволять в пределах типового технологического процесса оптимизировать средства откачки и течеискания.

В случае предстоящего аудита процесса контроля герметичности, следует предпочесть запись на бумажный носитель процесса испытаний в реальном времени. Бумажная лента самописца может вклеиваться в технологический паспорт изделия и в дальнейшем служить средством объективной отчётности.

**Если идёт речь об изготовлении новой большой вакуумной камеры или соответствующей модернизации, работающей большой вакуумной камеры, ФГУП «НПО «Техномаш» может обеспечить указанные характеристики течеискания при соблюдении рекомендаций, указанных в данной статье.**

## ◆ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ



## ◆ КОНСТРУКТОРСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.7

*Андреев М.Д., Долгополов М.И., Корнилов В.А.*

### Технология гибки трубопроводов РКТ с применением узкозонального индукционного нагрева

Статья посвящена перспективной технологии изготовления трубопроводов агрегатов ракетно-космической техники из специальных труднодеформируемых сталей гибкой с узкозональным индукционным нагревом, а также новейшему станку с числовым программным управлением СГИН-120, реализующему данную технологию гибки.

**Ключевые слова:** гибка, индукционный нагрев, узкозональный нагрев, станок с числовым программным управлением, трубопроводы ракетно-космической техники.

Трубопроводы – важная часть агрегатов и изделий ракетно-космической техники (РКТ), особенно жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), где к их качеству и надёжности предъявляются особенно высокие требования.

Развитие технологии изготовления трубопроводов в настоящее время придерживается следующих направлений:

1. Широкое применение специальных сталей, характеризующихся высокой жаростойкостью и жаропрочностью, взамен традиционных коррозионностойких сталей, позволяет значительно повысить прочностные характеристики трубопроводов, а также снизить общую массу изделия.

2. Изготовление многоколенных трубопроводов без стыков позволяет снизить количество сварных швов. Использование таких трубопроводов значительно повышает

надёжность работы агрегатов РКТ, снижает массу изделий за счёт отсутствия переходных деталей между коленами, а также повышает производительность сборочных работ.

Для изготовления трубопроводов, отвечающих новым повышенным требованиям, необходимо создание принципиально нового технологического оборудования, разработанного на основе современных принципов конструирования, способного обеспечить высокую автоматизацию технологических процессов и широкие технологические возможности.

В ходе работы по ОКР «Прогресс» (СО) специалистами ФГУП «НПО «Техномаш» спроектирован и изготовлен новый семиосевой станок с ЧПУ СГИН-120, реализующий технологию гибки труб с узкозональным индукционным нагревом. Конструкция станка защищена четырьмя патентами [1, 2, 3, 4].



Рис. 1. Станок СГИН-120

Станок спроектирован «с нуля» с учётом современных тенденций в станкостроении:

– полная автоматизация процесса гибки трубопровода с помощью системы ЧПУ с возможностью импорта

данных об изготавливаемой детали из систем автоматизированного конструирования («CAD» систем), что позволяет исключить «человеческий фактор» при изготовлении трубопровода и сократить время подготовки производства;



– построение схемы станка на основе принципов модульности и разомкнутой кинематики (система «Электронный вал»). При разомкнутой кинематике оси станка синхронизируются не механическими или гидравлическими устройствами, а с помощью системы ЧПУ, что повышает точность синхронизации, расширяет технологические возможности оборудования за счёт возможности перепрограммирования, а также упрощает конструкцию станка. Модульность конструкции даёт возможность быстрого изменения конструкции и комплектации станка по требованию заказчика;

– замена пар трения-скольжения трением-качения – применение шариковых приводов (ШВП) и шариковых рельсовых направляющих в узлах линейного перемещения, что позволяет значительно повысить точность и КПД станка, а также уменьшить его себестоимость;

– применение системы автоматической смазки ШВП и шариковых рельсовых направляющих;

– применение безредукторного прямого привода в узлах поворотного действия (система «Direct Drive»), что позволяет повысить точность и избавиться от люфтов во вращательном движении;

– система самодиагностики состояния основных систем оборудования. В течение работы система ЧПУ автоматически анализирует состояние основных систем и положения узлов станка и запрещает дальнейшую работу в случае возникновения неполадок, что предотвращает поломку оборудования и возникновение брака изготавливаемых деталей.

Основные технические характеристики СГИН-120:

– диаметр изгибаемых труб, мм	20...120
– толщина изгибаемых труб, мм	1...5
– радиус изгиба труб, мм	2D...∞
– максимальная длина заготовки, мм	6000
– точность позиционирования, мм	0,02
– мощность установки ТВЧ, кВт	
– полезная	60
– потребляемая из сети	100
– общая мощность станка, кВт	180
– расход воды на охлаждение max, л/час	100
– габариты станка, мм	
– длина	7000
– ширина	4300
– высота	2450
– общая масса, т	25

#### Гибка с узкозональным индукционным нагревом

Гибка с узкозональным индукционным нагревом – наиболее прогрессивный и единственным способ гибки труб из специальных сталей, не допускающих гибку в холодном состоянии, который позволяет полностью автоматизировать процесс гибки и получать многоколленные трубопроводы сложной формы без стыков.

Сущность данного способа гибки заключается в непрерывно-последовательном изгибе узкого, разупрочнённого нагревом в результате действия интенсивного электромагнитного поля, участка трубы. Труба проталкивается сквозь кольцевой индуктор и нагревается тока-

ми высокой частоты. Затем труба охлаждается, в результате чего нагретой получается лишь узкая зона трубы, в которой и происходят пластические деформации, в отличие от гибки в холодном состоянии или гибки с нагревом всей заготовки, где пластические деформации происходят практически по всей длине изгибаемой трубы (рис. 2).



Рис. 2. Гибка с труб с узкозональным индукционным нагревом на станке СГИН-120

Потенциал гибки с узкозональным нагревом гораздо шире гибки труб из специальных сталей – в ряде случаев данный метод может заменить традиционную холодную гибку труб из обычных сталей. Достоинства данного метода:

1. Возможность производить гибку труб с минимальной овальностью без применения наполнителей и дорнов, что особенно важно для труб агрегатов РКТ с повышенными требованиями к чистоте внутренней поверхности.

2. Отсутствует необходимость в изготовлении шаблонов под каждый радиусгиба, что позволяет значительно расширить номенклатуру изгибаемых труб в сравнении с холодной гибкой.

3. Повышение пластичности материала в горячем состоянии позволяет производить гибку на меньшие радиусы.

4. Отсутствие наклёпа деформированного участка трубы, что позволяет в ряде случаев не проводить дополнительную термообработку.

5. Значительное уменьшение упругого пружинения материала трубы, что способствует повышению точности изготовления трубопроводов.

Исключительно важное значение для качества изготавливаемых труб при гибке с узкозональным нагревом имеет ширина зоны нагрева. Уменьшение ширины зоны нагрева помогает уменьшить овальность поперечного сечения трубы и снизить вероятность гофрообразования.

Для обеспечения узкой ширины зоны нагрева (не больше 2–3 толщин стенки изгибаемой трубы) во ФГУП «НПО «Техномаш» спроектирован и запатентован индуктор [2], содержащий систему воздушно-водяного охлаждения (рис. 3).

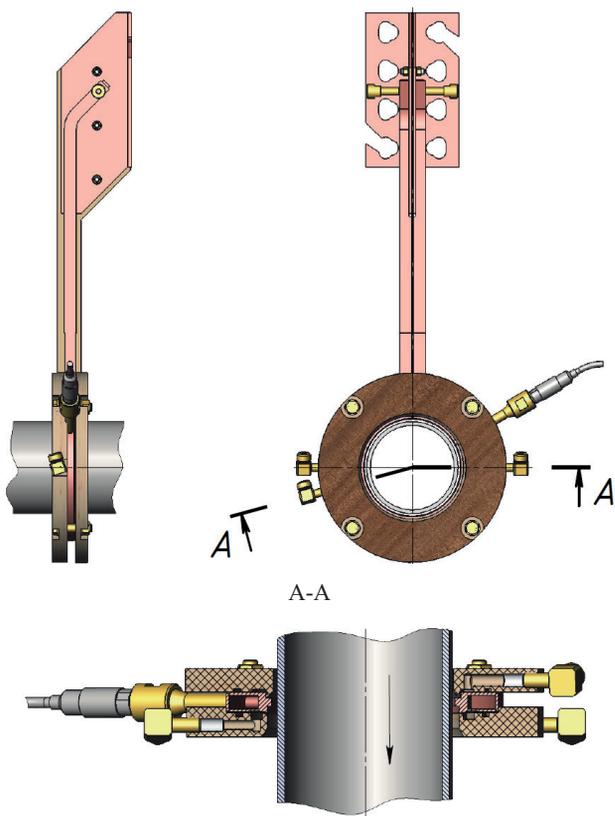


Рис. 3. Индуктор станка СГИН-120 (стрелкой показано направление движения трубы)

Индуктор оснащён бесконтактным пирометром, который измеряет температуру нагретой зоны трубы во время всего процесса гибки. Система ЧПУ, получая данные о температуре нагрева, автоматически поддерживает ее значение постоянным, меняя мощность индукционного нагрева.

#### Конструкция станка СГИН-120

Существуют две схемы гибки с индукционным нагревом [5, 6, 7]:

- гибка с гибочным роликом (рис. 4а).

При данной схеме гибки труба проталкивается через направляющую фильеру (1) и через индуктор (2), который находится сразу за фильерой. Одновременно на трубу воздействует гибочный ролик (3), который перемещается по траектории, перпендикулярной оси трубы, изгибая трубу. Данная схема гибки используется для получения изгибов большого радиуса и может применяться при изготовлении трубопроводов переменной кривизны;

- гибка с поворотным рычагом (рис. 4б).

При данной схеме гибки труба также проталкивается через направляющую фильеру (1) и через индуктор (2), который находится сразу за фильерой. Индуктор нагревает на трубе узкий участок. Другой конец изгибаемой трубы закреплён в зажиме, установленном на поворотном рычаге (3). Труба, под действием продольной силы проталкивается, поворачивая водило и изгибается. Центр изгиба трубы совпадает с осью поворота водила. Данная схема гибки используется для получения изгибов небольшого радиуса изгиба и позволяет получать изгибы высокой геометрической точности.

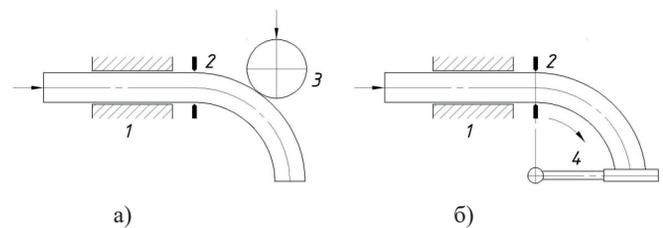


Рис. 4. Схема гибки гибочным роликом: а) гибка с гибочным роликом; б) гибка с поворотным рычагом

Станок СГИН-120 реализует обе существующие схемы гибки с узкозональным индукционным нагревом, а также позволяет проводить автоматическую смену способа гибки. Это позволяет изготавливать многоколленные трубопроводы сложной пространственной формы.

Работа станка СГИН-120 происходит следующим образом (рис. 5).

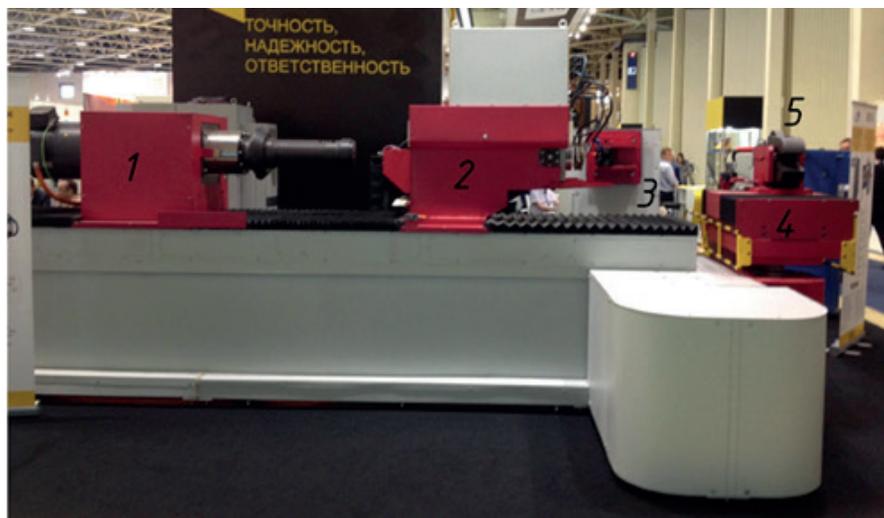


Рис. 5. Основные узлы СГИН-120:

- 1 – каретка продольной подачи; 2 – опорный узел; 3 – гибочный ролик; 4 – поворотный рычаг; 5 – зажим поворотного рычага



Труба устанавливается в каретку продольной подачи (1), оснащённую гидравлическим цанговым зажимом с регулируемым усилием, служащим для поворота трубы вокруг оси при смене плоскости гибки. Поворот осуществляется прямым безредукторным приводом. При этом труба проходит через фильеру опорного узла (2), на котором установлен трансформатор с индуктором, имеющим возможность продольного перемещения.

В случае гибки с гибочным роликом (3) опорный узел устанавливается в положение, определяемое плечом гиба. Затем включается индуктор, и труба начинает проталкиваться вперёд, одновременно с выдвиганием ролика в рабочее положение. Синхронизация движения ролика и каретки продольной подачи осуществляется системой ЧПУ станка. После достижения роликом рабочего положения, труба продолжает проталкиваться при неподвижном ролике до достижения требуемого угла гибки.

В случае гибки с помощью поворотного рычага (4) противоположный конец трубы зажимается в гидравлическом зажиме поворотного рычага (5). Опорный узел устанавливается в крайнее правое положение. Затем включается индуктор, труба начинается проталкиваться вперёд, поворачивая гибочный рычаг, который в рабочем режиме имеет возможность свободного вращения, за счёт применения прямого безредукторного привода. Установка радиуса изгиба происходит за счёт поперечного движения поворотного рычага (4).

#### **Выводы**

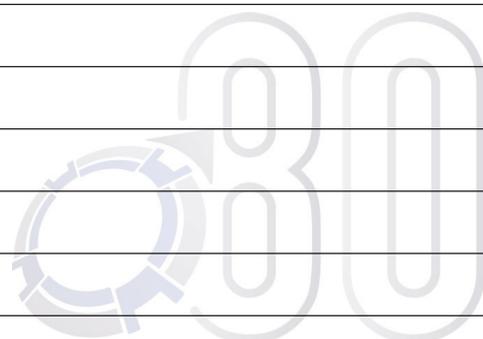
Создан современный станок, реализующий технологию гибки трубопроводов РКТ с узкозональным индукционным нагревом. Станок предназначен для пространственной многоколенной гибки как труб из специальных сталей, широко применяемых в агрегатах РКТ так и труб из обычных сталей. Гибка осуществляется по двум схемам – поворотным рычагом и гибочным роликом. Станок оснащен ЧПУ, сервоприводами и полностью автоматизи-

рован, а также способен производить диагностику состояния основных систем. Нагрев труб производится индуктором специальной конструкции со встроенной системой охлаждения, обеспечивающих узкую зону нагрева. Температура контролируется с помощью бесконтактного пирометра и поддерживается в заданных пределах автоматически.

#### **Список литературы**

1. Поворотный узел трубогибного станка / Д.В. Панов, М.И. Долгополов, В.А. Корнилов и др. // Патент РФ на полезную модель №154035, 2015.
2. Устройство для зонального нагрева / Д.В. Панов, М.И. Долгополов, В.А. Корнилов и др. // Патент РФ на полезную модель №144696, 2014.
3. Зажимное устройство / М.И. Долгополов, В.А. Корнилов, А.Н. Коротков и др. // Патент РФ на полезную модель №128265, 2013.
4. Трубогибный станок / Д.В. Панов, М.И. Долгополов, В.А. Корнилов и др. // Патент РФ на полезную модель №169825, 2016.
5. Альбов И.Н., Гальперин А.И. Гнутье труб с местным зональным нагревом. / И.Н. Альбов, А.И. Гальперин. М.: ВНИИЭГАЗПРОМ, 1969. С. 32–50
6. Корнилов В.А., Долгополов М.И. Изготовление трубопроводов жидкостных ракетных двигателей из труднодеформируемых и малопластичных сплавов / В.А. Корнилов, М.И. Долгополов и др. // Наука и технологии. Том 4. Материалы XXXIV Всероссийской конференции, посвящённой 90-летию со дня рождения академика В.П. Макаева. М.: РАН, 2014. С. 143–151.
7. Уменьшение предельного радиуса гиба при гибке с узкозональным индукционным нагревом труб изделий РКТ путём применения градиентного нагрева / Д.В. Панов, М.И. Долгополов, В.А. Корнилов // Технология машиностроения. 2015. № 11. С. 21–24.

#### **◆ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ**





УДК: 629.7.018

*Андреев М.Д., Пушкарёв С.А., Петров М.С., Антохин Т.А.*

## Изготовление изделий из ПКМ методами литья и компрессионного формования

В статье приведён обзор современных альтернатив процессу намотки и автоматизированной выкладки при производстве деталей из полимерных композиционных материалов. Приведены краткие данные по используемым материалам и рассмотрены достоинства и недостатки технологических методов инъекционного литья, трансферного прессования и компрессионного формования. Рассмотренные способы производства позволяют расширить номенклатуру изделий, производимых из полимерно-композиционных материалов, и открывают новые возможности для замены металлических корпусных деталей сложной формы более легкими аналогами.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, связующее волокно, формование, литьё, инъекция.

### Введение

Облегчение конструкций ракетно-космической техники (РКТ) всегда являлось важной составляющей снижения стоимости вывода грузов в космическое пространство. Традиционными средствами облегчения конструкций остаются изменение геометрических форм, как способ снижения объёма конструкционного материала при сохранении требуемых механических свойств, и замена самого материала более лёгким. Современный уровень развития технологий производства деталей из композиционных материалов на основе волокнистых структур и связующего позволяет заменять всё большее количество конструктивных элементов более лёгкими аналогами, изготовленными из новых высокотехнологичных материалов. Наиболее распространёнными и освоенными на данный момент технологическими процессами в данной области являются намотка и автоматизированная выкладка. Намотка позволяет создавать детали типа тел вращения и их производных – трубопроводы, баллоны, баки, элементы рамных каркасов. С помощью автоматизированной выкладки можно изготавливать детали со сложной геометрией поверхности и небольшой толщиной изделия – обтекатели, лонжероны, элементы обшивки крыла. Общим недостатком данных способов можно считать невозможность получения корпусных элементов с системой точных отверстий и полостей. Такие детали традиционно производят из металлических сплавов при помощи процессов литья, штамповки и механической обработки. В этой связи весьма перспективными выглядят технологии литья и штамповки из композиционных материалов (КМ). Применение таких технологий позволяет существенно расширить номенклатуру изделий, производимых из новых, более лёгких материалов и предоставит конструкторам больше свободы в решениях.

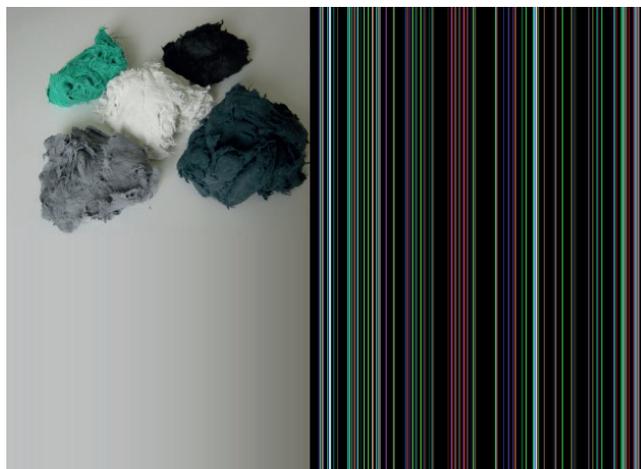


Рис. 1. Типовые детали, получаемые методом компрессионного формования

Изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ), полученные методами литья и компрессионного формования, можно встретить в изделиях зарубежных производителей авиакосмической, автомобильной и бытовой техники (рис. 1).

### Материалы, используемые в технологии формования ПКМ

Важную роль в таких процессах играет выбор материала – состав компонентов и их соотношение может кардинально изменить свойства готового изделия.

Двумя основными компонентами являются волокна – армирующее (углеродное, арамидное, стеклянное) и связующее (термопласты и реактопласты).

Показатели процентного соотношения «волокно – связующее» могут варьироваться в пределах от 10% до 60% в зависимости от конкретного технологического



процесса. Наилучшие прочностные показатели демонстрируют изделия с содержанием армирующего наполнителя 50–60%, а наилучшие технологические показатели процессов и сложность формы изготавливаемых деталей обеспечиваются за счёт меньшего содержания армирующего наполнителя, что позволяет повысить текучесть материала.

Основными параметрами армирующего наполнителя, определяющими свойства детали, вид и параметры технологического процесса (ТП) изготовления, являются его длина (от 5 до 50 мм) и модуль упругости волокна. Ведущими производителями готового углеволокна являются Hexcel (США), Toray (Япония).

Средний модуль упругости волокон (IM – intermediate modulus fiber) характеризует сопротивление волокна растяжению/сжатию при упругой деформации. Американские производители измеряют параметр в миллионах фунтах на квадратный дюйм (Msi), метрическая система использует гигапаскалы (ГПа). Стандартное значение упругости углеволокна для низко модульных марок начинается от 32 Msi, упрочнённые марки достигают значений 80 Msi. Помимо модуля упругости, важную роль играет количество тысяч нитей в пучке волокна. Изотропия свойств изделия зависит напрямую от длины нарезки волокон и их ориентации.

В роли связующего могут выступать термопласты (нейлон, полипропилен, РЕЕК, РЕИ) и реактопласты (эпоксид, винил, полиэстр, фенолы).

По сравнению с традиционными КМ на основе термореактивных смол (реактопластов) композиционные термопластичные материалы (КТМ) имеют достоинства:

а) эксплуатационные – на 20–40% выше стойкость к ударным нагрузкам и локальным повреждениям; высокая устойчивость к воде и дождевой эрозии; химическая стойкость, в том числе к авиационным маслам и топливным компонентам; огнестойкость, пониженное дымообразование и токсичность; ремонтпригодность (методом сварки);

б) технологические – возможность использования металлургического оборудования (штамповка, давление, прокат, литье); короткий цикл формования (10–60 мин); возможность переформовки бракованных изделий; коэффициент использования материала 95%; неограниченный срок хранения препрега.

К недостаткам следует отнести высокую температуру переработки (200–400°C) и трудность выкладки нелипкого препрега.

Термореактивные материалы за счёт сшитой трёхмерной структуры, как правило, обладают более высокими показателями твёрдости, хрупкости и упругости, более низким коэффициентом теплового расширения, чем термопластичные материалы, и имеют стойкость к органическим растворителям и слабым кислотным и щелочным средам. В отличие от термопластов могут эксплуатироваться при более высоких температурах. Однако процессы переработки несколько более сложны и требуют соблюдения временных промежутков и температур, за

пределами которых могут произойти необратимые реакции и, как следствие, возникновение брака изделий.

В производственном процессе удобно использовать готовые полуфабрикаты (препреги), поставляемые производителями волокон в различных формах.

Полиэфирный листовый прессматериал (Sheet molding comhound – SMC) – предварительно пропитанный, химически загущённый стеклонаполненный термореактивный прессматериал (рис. 2).

#### Типичная структура SMC:

- стекловолокно (15-50 мм) – 27%;
- наполнитель (тальк) – 40%;
- смола (полиэфирная, винилэфирная) – 28%;
- прочие добавки – 5%.

Производится в форме листа посредством пропитки рубленого стекловолокна связующим (ненасыщенной полиэфирной смолой с порошкообразным наполнителем и добавками, регулирующими технологические и эксплуатационные свойства композиции). Обычно толщина листа SMC составляет около 4 мм, ширина – 1500 мм. С обеих сторон материал покрыт защитной антиадгезионной плёнкой, которая удаляется непосредственно перед переработкой. SMC является основным материалом в компрессионном формовании тонкостенных деталей различного размера и формы. Легко поддается нарезке и ручному или машинному размещению в пресс-форме. Наполненность стекловолокном составляет от 15 до 65%, длина волокон достигает 20 мм. Цвет может быть практически любым, материал имеет отличные физические термические, огневые и химические свойства, характерные термореактивным материалам.

#### Основные характеристики SMC:

- содержание стекловолокна 20–40%;
- плотность 1,4–1,8 г/см<sup>3</sup>;
- технологическая усадка –0,1 – +0,25%;
- прочность на изгиб 100–150 МПа;
- модуль изгиба 10–14 ГПа;
- прочность на растяжение 40–100 МПа;
- ударная вязкость 30–120 кДж/м<sup>2</sup>;
- водопоглощение 0,03–0,05%.



Рис. 2. Полиэфирный листовый материал



SMC производится на непрерывных линиях (рис. 3). В смесителях с мешалкой готовится паста связующего – смесь компонентов: ненасыщенная полиэфирная смола, минеральные наполнители (мел, гидроксид алюминия), добавки, снижающие усадку, пигменты, инициаторы отверждения и загустители. Смесь наносится на два полотна полиамидной или полиэтиленовой плёнки при помощи дозирующей ванночки с раклей. Одновременно со шпулярника в рубящее устройство подаётся стеклоровинг. Нижнее полотно плёнки с нанесённым связующим подаётся под устройство, которое рубит рассыпающийся ровинг на отрезки заданной длины. Рубленое стекловолокно падает на плёнку. Количество стекловолокна регулируется скоростью подачи пленки. Длина отрезков стекловолокна составляет 12–50 мм и зависит от назначения материала. Волокна падают хаотично, но в целом немного ориентированы параллельно направлению движения плёнки. После этого полученный пакет накрывается верхним полотном плёнки с нанесённым слоем связующего. Полученный «сэндвич» пропускается через сжимающие валки для обеспечения пропитывания волокна. Готовый материал сматывается в рулоны или складывается «зигзагом» в коробки и направляется в термокамеры для «созревания». Поскольку материал содержит стирол, он дополнительно упаковывается в стиролонепроницаемую (обычно полиамидную) плёнку. Первоначальная вязкость связующего невелика (20000–40000 мПа\*с), что позволяет хорошо пропитать стекловолокно на валках. Но затем под действием добавленных в пасту загущающих добавок (обычно оксида магния MgO) вязкость связующего в SMC нарастает и через 3–5 дней составляет  $4-10 \cdot 10^7$  мПа\*с. Лист SMC становится похож на лист кожи.

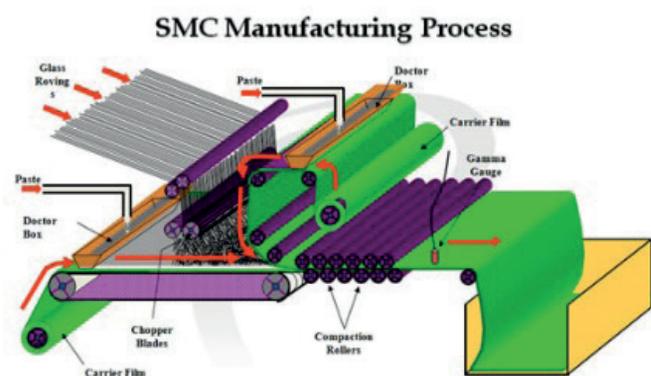


Рис. 3. Линия по производству SMC материала

Разновидностью листового SMC является его утолщённая версия TMC (Thick molding compound), толщина которого в шесть раз выше типовой, что позволяет сократить количество слоев при укладывании заготовки в пресс-форму (рис. 4, 5).



Рис. 4. TMC-материал

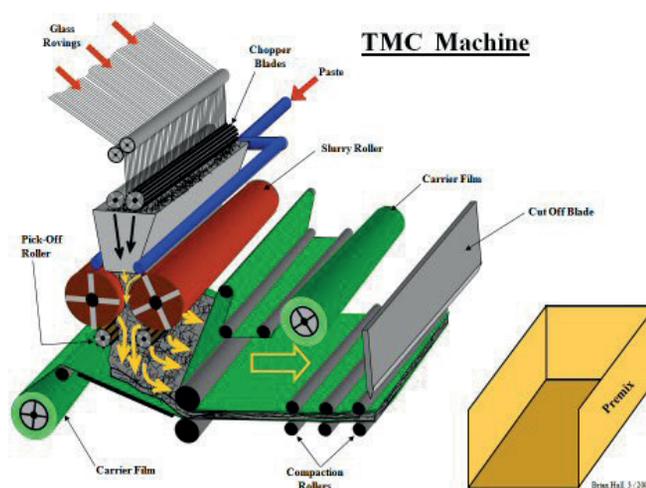


Рис. 5. Линия по производству

**BMC (Bulk Mould Compound)** – материал, представляющий собой особую пасту, содержащую смолу, наполнители, армирующие волокна. **BMC-материал**, который может перерабатываться прессованием или инъекцией (рис. 6).



Рис. 6. BMC-материал



Типичная структура BMC:  
стекловолокно (5–20 мм) – 20%;  
наполнитель – 45%;  
смола (полиэфирная, винилэфирная) – 30%;  
прочие добавки – 5%.

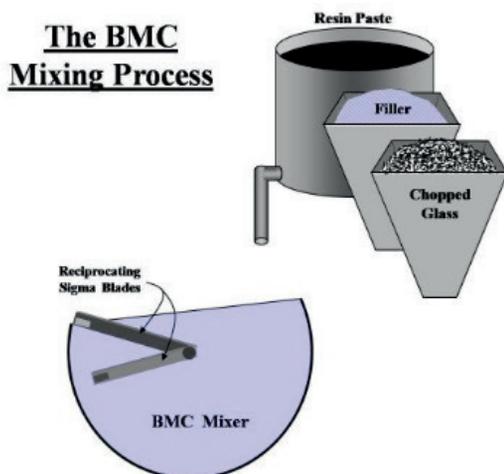


Рис. 7. Линия по производству BMC-материала

Масса получается предварительным замешиванием в промышленном миксере и расфасовывается в мешки (рис.7). Цвет может быть практически любым, материал имеет отличные физические термические, огневые и химические свойства, характерные терморезистивным материалам.

Основные характеристики BMC:

- содержание стекловолокна 10–30%;
- плотность 1,4–2,4 г/см<sup>3</sup>;
- технологическая усадка –0,1 – +0,25;
- прочность на изгиб 70–140 МПа;
- модуль изгиба 8–15 ГПа;
- прочность на растяжение 20–60 МПа;
- ударная вязкость 10–60 кДж/м<sup>2</sup>;
- водопоглощение 0,03–0,05%.

При прессовании используются металлические подогреваемые матрицы. Давление от 30 до 100 атм. Температура нагрева 100–160°C. Время смыкания форм составляет 2–3 минуты, в течение которого осуществляется дополнительный подогрев и инициируется реакция полимеризации.

При инъекционной формовке используются шнековые инъекционные машины, подающие материал в полость закрытой формы.

Технология BMC получила распространение при производстве деталей сложной формы, например, корпусов насосов, компонентов электроприборов и т.п.

Наилучших механических характеристик позволяет добиться материал на основе длинных волокон, поэтому для нагруженных изделий используется ровинг (нарезанные волокна) с длиной волокна до 50 мм. Обычно для изготовления подобной рабочей смеси (BMC) используется ровинг препрега – предварительно пропитанного связующим волокна (рис. 8).



Рис. 8. Нарезанный препрег Zoltec-Toray Type 45

#### Виды технологических процессов литья и КФ

Прессование ПКМ заключается в пластической деформации материала при одновременном воздействии на него тепла и давления и в последующей фиксации формы изделия. Прессование композитов проводится, как правило, в пресс-формах, конфигурация полости которых соответствует конфигурации будущего изделия. Пресс-формы устанавливаются в прессы или термопластавтоматы, назначение которых создание необходимого давления исходного материала. Предварительно разогретый или расплавленный материал заполняет под давлением пресс-форму, после чего подвергается температурной обработке. Отверждение материала происходит под воздействием температур и давления.

Типовыми разновидностями технологических процессов являются:

- инъекционное литье (Injection Molding)
- трансферное прессование (Transfer Molding)
- компрессионное формование (Compression Molding)

#### Технология инъекционного литья ПКМ

Инъекционное литье является технологическим процессом, в ходе которого расплав полимера (обычно термопластического) смешивается с коротко нарезанными армирующими волокнами, составляющими до 40% смеси, и подаётся под давлением в литейную форму (рис. 9). Использование смеси мелконарезанных волокон и связующего является дешёвой альтернативой использованию цельных волокон.

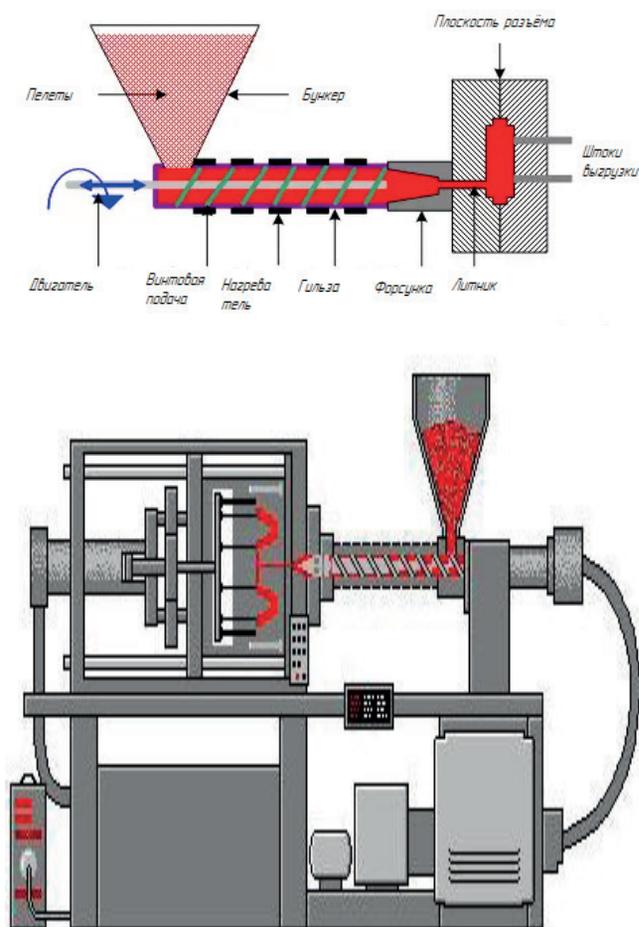


Рис. 9. Процесс инъекционного литья

Подготовленная смесь в форме пеллет или ВМС подается из бункера в формовальную машину, где разогревается и посредством винтового штока нагнетается в разъемную литейную форму через литник. Разогрев, необходимый для размягчения и перемешивания материала, осуществляют нагревательные элементы, обвивающие гильзу-камеру нагрева. Литейная форма оснащена активным охлаждением, позволяющим контролировать параметры отверждения, и штоками, позволяющими извлечь отливку после разъема формы. Инжекционное литье используется в основном для термопластических матриц, хотя термореактивные также могут быть использованы при условии замены системы охлаждения на систему нагрева. Допускается заполнение множественных форм через единый литник.

Инжекционное литье имеет активную разновидность – инжекционное обжатие (Injection compressing), при котором процесс заполнения формы разбивается на несколько этапов (рис. 10):

- закрыть форму, оставив зазор;
- заполнить форму на 80–90% объема (что составит 100% необходимого материала);
- последовательно или параллельно повысить давление окончательным смыканием формы и подачей материала;
- окончательно обжать, отвердить и извлечь изделие.

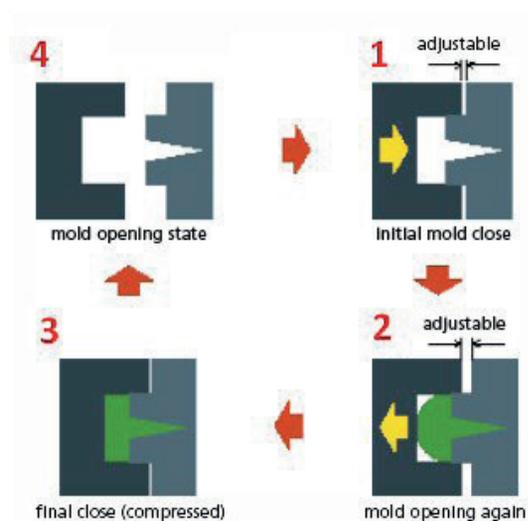


Рис. 10. Этапы инъекционного обжатия

Типовым оборудованием для инъекционного литья являются термопластавтоматы горизонтального (рис.11) и вертикального типов.

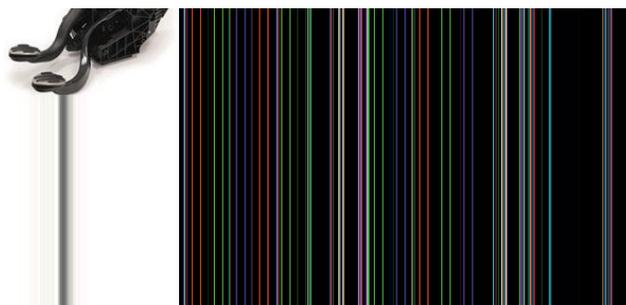


Рис. 11. Горизонтальный термопластавтомат HAIXIONG HXW98 (Китай)

Инжекционное литье является точным, полностью автоматизируемым и высоко повторяемым способом, выгодным при крупносерийном и массовом производстве. Способ отлично подходит для производства корпусных деталей сложной формы, мелких деталей и изделий с большим количеством конструктивных элементов сложной формы (рис. 12).



Рис. 12. Пример узла, собранного из деталей, отлитых инжекционным методом

Ключевым недостатком метода является ограничение по длине армирующих волокон и их процентной доле в составе смеси.

### Трансферное прессование

Трансферное прессование является технологическим процессом, в ходе которого предварительно рассчитанное количество полимера помещается в предварительно разогретую отдельную камеру, из которой с усилием подаётся в основную формовочную камеру, содержащую предварительно размещённые армирующие волокна (стеклоткань, специальный стекломат или другой вид армирующего материала) и закладные элементы, где принимает форму полости, пропитывает волокна и отвердевает под действием температуры и давления (рис 13). В рабочей полости также может создаваться вакуумное разрежение, способствующее оптимальной пропитке армирующего слоя.

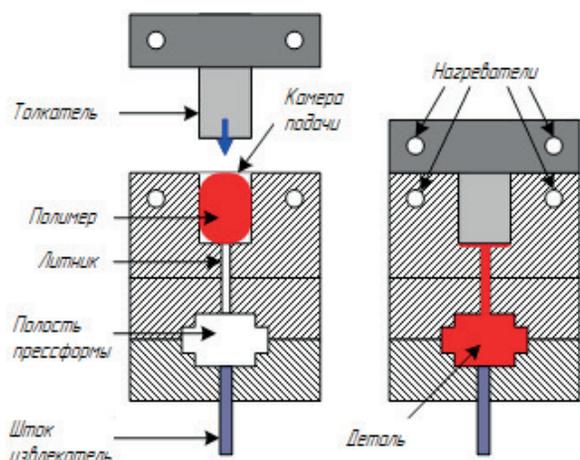


Рис. 13. Процесс трансферного прессования

Используется разъёмная пресс-форма, состоящая из двух частей с двойным воздействием гидравлического пресса – для сжатия самой формы и подачи связующего. Метод сочетает в себе черты инъекционного литья и компрессионного формования – тот же набор материалов, заполнение формы через литник и активная опрессовка формы.

Таким методом возможно получить весьма крупные детали, например, детали обшивки автомобильного кузова. Сложность получаемой таким образом геометрии находится между инъекционным литьем и компрессионным формованием.

В настоящее время компания Surface Generation активно обрабатывает технологию мультиплексного формования, позволяющую сократить время цикла с шести минут до двух за счёт использования предварительно подготовленных загрузочных кассет. Кассеты легко сменяются и способны поддерживать заданную нагрузку даже вне пресса. Вынос подготовительных операций на внешние устройства экономит машинное время пресса.

Недостатками метода можно считать сложность изготовления пресс-форм с двойным усилием и нагревательными элементами под каждую деталь.

### Компрессионное формование изделий из ПКМ

Компрессионное формование (КФ) – процесс, в котором предварительно подготовленную композитную массу выкладывают в предварительно нагретую пресс-форму и обжимают, добиваясь отверждения под воздействием температуры и давления. Процесс осуществляется разъёмной пресс-формой на гидравлическом прессе (рис. 14).

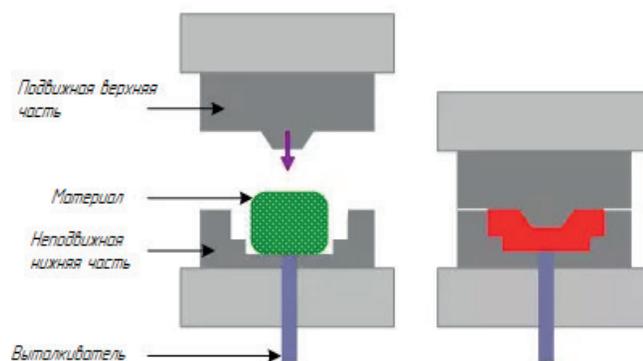


Рис. 14. Схема процесса компрессионного формования

Нижняя половина пресс-формы покрывается антиадгезионным составом. Верхняя часть пресс-формы прикладывает усилие, вынуждающее формуемую массу занять все полости нижней полуформы. Отверждение материала происходит за счёт нагрева пресс-формы под давлением. Полный цикл формования проходит примерно за 5–15 минут. Необходимое давление находится в диапазоне от 13.8 МПа до 20.7 МПа, а рабочая температура от 149°C до 191°C. При раскрытии формы изделие извлекается толкателями, образовавшийся облой зачищается вручную механически (рис. 15).



Рис. 15. Формование заготовки в пресс-форме

Формуемая масса представляет собой смесь связующего (термоупрочняемые смолы), отвердителей, красителей и армирующих обрезков волокон, длиной 5–50 мм. Конечные свойства материала сильно зависят от состава связующего, а также типа и размера волокон. В ряде случаев свойства отверждённого материала могут быть сопоставимы со сплавами алюминия и титана (табл. 1).



Таблица 1. Сравнительные характеристики материалов

		Сплав 3Al-1,5V Ti	Сплав 6061-T6 Al	MS-1A	MS-1H	MS-4A	MS-4H
Плотность (г/см <sup>3</sup> )		4,5	2,7	1,55	1,52	1,49	1,52
Прочность (МПа)	растяжение	689	303	290	256	310	302
	сжатие	689	303	283	226	358	330
	изгиб	689	303	462	439	641	750
Модуль упругости (ГПа)	растяжение	107	69	131	69	62	43
	сжатие	109	70	110	63	55	50
	изгиб	107	69	90	69	48	64

Формование под давлением позволяет изготавливать корпусные детали с полостями и точными отверстиями в виде предварительно обработанных закладных элементов, что позволяет свести к минимуму последующую обработку. Данный способ хорошо подходит для изготовления крупных тонкостенных деталей сложной формы с нелинейной кривизной поверхности (рис. 16, 17).



Рис. 16. Пример детали с закладными элементами

Достоинствами данного способа изготовления являются высокая точность и повторяемость. Чертежи металлических деталей могут быть использованы без существенных изменений и доработок, что упрощает процесс замены.



Рис. 17. Кронштейн, изготовленный методом КФ

Недостатками способа являются:

- повышенное требование к навыкам персонала – качество подготовки материала в пресс-форме оказывает определяющее влияние на свойства изделия;
- высокие начальные капиталовложения;
- сравнительно долгое время отверждения;
- невозможность вторичной переработки.

#### Оборудование для изготовления изделий из ПКМ методом КФ

В настоящее время на рынке оборудования для КФ существует широкий спектр предложений от разных фирм для различной номенклатуры деталей (гидравлические прессы фирмы WICKERT – рис. 18). Гидравлические прессы позволяют размещать пресс-формы различного размера, ограниченного рабочей зоной прессы.



Рис. 18. Пресс WICKERT WKP 10000S

### ПМО процессов литья и КФ

Важнейшей задачей при конструировании деталей, изготавливаемых методами литья и КФ, являются расчёты на прочность, жёсткость, и определение оптимальных параметров ТП изготовления. Для решения подобных задач незаменимым становится программно-математическое обеспечение (ПМО) на базе математических моделей, реализуемых с помощью систем CAD/CAM.

В настоящее время существует ряд программ, моделирующих данные процессы, например, пакет программ моделирования 3D TIMON (рис. 19), разработанный корпорацией Toyou (Япония). Функционал данного продукта позволяет разрабатывать оснастку, моделировать процессы заполнения формы, поведение конечного продукта в зависимости от длины армирующих волокон и состава композита.

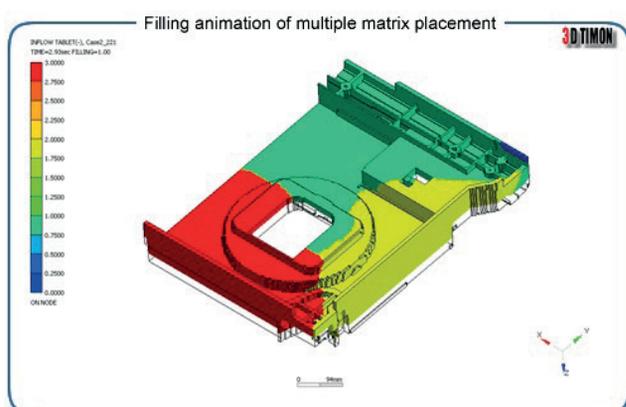


Рис. 19. Моделирование процесса заполнения формы в 3D TIMON

### Заключение

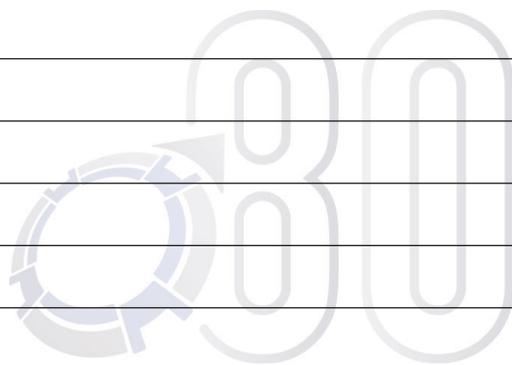
Одним из существенных недостатков изделий из ПКМ является высокая стоимость их производства, которая определяется значительными затратами на подготовку производства, стоимостью оборудования и во многом определяется длительностью процесса их изготовления. Большое значение играет стоимость исходных материалов (тканей), сложность в подготовке и хранении полуфабрикатов (препрегов), ограниченная жизнеспособность получаемых препрегов и стоимость технологического оборудования (наиболее дорогостоящим является автоклавное оборудование, необходимое для отверждения).

Разработка новых технологий, которые исключают необходимость использования автоклавного оборудования и цельного препрега, является очень актуальной. Совмещение операций пропитки наполнителя связующим и формования детали приводит к сокращению временного цикла изготовления детали, энерго- и трудозатрат и, как следствие, удешевлению технологии на 15–20%.

Общие особенности технологий формования изделий из ПКМ под давлением:

- технологии могут применяться на переоборудованном гидравлическом прессовом оборудовании или термопластавтоматах для производства деталей серийными партиями;
- процессы формования ПКМ под давлением хорошо поддаются автоматизации и обладают высокой точностью и воспроизводимостью;
- полученные детали способны заменить металлические аналоги без существенного изменения конструкции;
- определяющим фактором для конечных свойств изделия являются состав и структура полимерного композита, поддающиеся точному регулированию.

### ♦ ДЛЯ КОММЕНТАРИЕВ



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018



УДК 629.7:658.562:658.515:621.91

Матвеев Е.В.

### Разработка эталонного измерительного комплекса статических моментов

В статье рассмотрена разработка оборудования для измерений параметров контрольных приспособлений, используемых для метрологической аттестации стендов контроля положения центров масс космических аппаратов.

**Ключевые слова:** центр масс, статический момент, балансировка, космический аппарат.

Во ФГУП «НПО «Техномаш» в рамках ОКР «Метрология РКТ» разработано оборудование и технология производства контрольных приспособлений для метрологической аттестации стендов для измерительного контроля координат центра масс (КЦМ) космических аппаратов (КА), обеспечивающие достоверность метрологической прослеживаемости результатов измерений к Государственным эталонам физических величин. Актуальность работы обусловлена тем, что практически все измерения при контроле КЦМ КА и других изделий РКТ находятся в сфере Государственного регулирования обеспечения единства измерений, так как измерительный контроль КА и других изделий РКТ относится к осуществлению деятельности в области обороны и безопасности государства, на которую распространяет действие Федеральный закон Российской Федерации от 26 июня 2008 г. №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

Разработан эталонный измерительный комплекс статических моментов (ЭИКСМ). Устройство ЭИКСМ (рис. 1) включает неподвижное основание 1, на котором установлена неподвигаемая стойка 2; направляющие 3, по которым с помощью винтового привода с маховиком 4 переустанавливается перемещающаяся стойка 5. На стойках 2 и 5 размещены регулировочные головки 6 и 7 для установки ножей 8 и 9 в горизонтальное положение. На ножи 8 и 9 опирается штифтами 10 и 11 контрольное приспособление 14. Балансировочная ось 17 проходит через центры симметрии штифтов 15 и 16. КП 14 при балансировке опирается на датчик силы 23 одним из дополнительных штифтов 24.

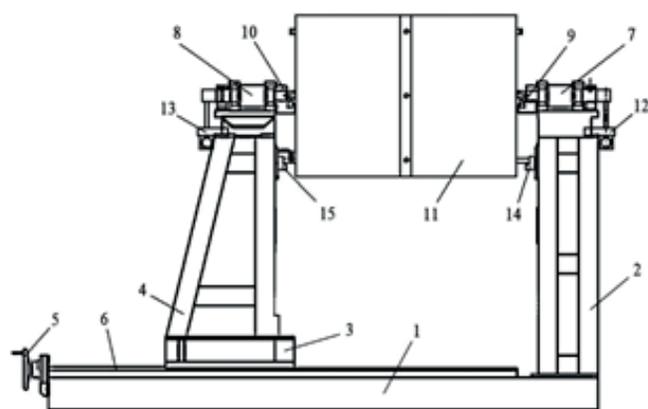


Рис. 1. Комплекс ЭИКСМ

Комплекс ЭИКСМ предназначен для воспроизведения и измерения статических моментов и КЦМ контрольных приспособлений (КП) относительно трёх взаимно перпендикулярных осей, заданных тремя парами балансировочных штифтов  $\sigma_1$ - $\sigma_6$  (рис. 2). КП может иметь исполнение в различных формах: в виде цилиндра, куба и других форм. Как правило, вне зависимости от формы КП применяется типовая схема задания системы координат и расположения балансировочных штифтов КП, приведённая на рис. 2.

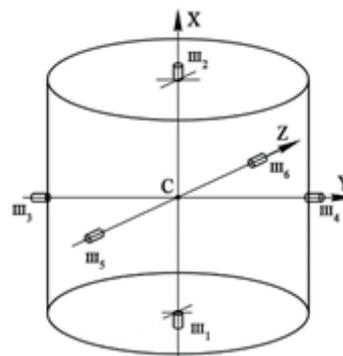


Рис. 2. Схема контрольного приспособления

Система координат CXYZ КП с центром в точке С, в которую в процессе балансировки приводится центр масс, связана с базовыми элементами, которыми являются балансировочные штифты. Для воспроизведения статических моментов и КЦМ КП используется уравновешивание КП на балансировочных штифтах (рис. 3).

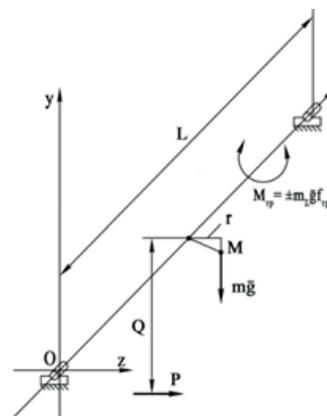


Рис. 3. Измерение дисбаланса



Статический момент – производная физическая величина. Его размерность выражается в кг·м. Измеряемый статический момент  $S$  КП, равный произведению массы  $m$  КП на расстояние  $r$  от центра масс до вертикальной плоскости, в которой находится горизонтальная ось балансировки (на рис. 3 – ось  $L$ , соединяющая центры балансировочных штифтов  $\psi_1$  и  $\psi_2$ ):

$$S = mr, \quad (1)$$

проявляется как момент  $D$  силы тяжести  $mg$  ( $g$  – ускорение свободного падения) относительно оси балансировки:

$$D = mgr = Sg. \quad (2)$$

Этот момент сравнивается с моментом силы реакции  $P$  измерительного датчика, отстоящего на расстоянии  $Q$  от горизонтальной оси балансировки.

$$D = PQ. \quad (3)$$

Из (М1) – (М3) найдем:

$$S_3 = mr = PQ/g. \quad (4)$$

Величина  $PQ/g$  в выражении (4), имеющая размерность [кг·м], является величиной воспроизводимого обо-

рудованием ЭИКСМ эталонного статического момента  $S_3$ , с которым сравнивается статический момент  $S$  контрольного приспособления.

Погрешность воспроизводимого статического момента оценивается выражением:

$$\Delta S_3 = (\delta P + \delta Q + \delta g)PQ/g. \quad (5)$$

Для оценки погрешности, воспроизводимой ЭИКСМ, координаты центра масс как расстояния  $r$  от центра масс до вертикальной плоскости, в которой находится горизонтальная ось балансировки, из выражения (4) найдем:

$$r = PQ/mg. \quad (6)$$

Учитывая неопределенность значения расстояния  $r$ , вносимую трением качения балансировочных штифтов по ножам, представим выражение (6) в виде:

$$r = PQ/mg \pm f_{\text{тр}}, \quad (7)$$

где  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения качения.

После установки балансировочного груза (рис. 4) суммарный центр масс КП и груза перемещаются в вертикальную плоскость, в которой находится горизонтальная ось балансировки, а значение величины  $r$  будет равно:

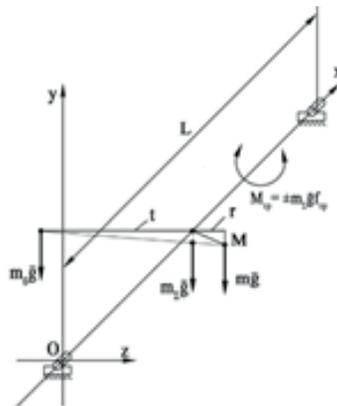


Рис. 4. Балансировка

$$r = 0 \pm f_{\text{тр}}. \quad (8)$$

После балансировки, учитывая (8), из (7) найдем:

$$\Delta r \geq \pm f_{\text{тр}}(\delta P + \delta Q + \delta g + \delta m + 1). \quad (9)$$

Коэффициент трения качения штифтов по ножевым опорам для выбранных материалов и термообработки опор и штифтов равен 0,01 мм (сталь Р6М5 ГОСТ 19265-73 с термообработкой HRCэ 60...65, шероховатость не грубее Ra0,8). При таком коэффициенте трения момент трения качения удерживает контрольное приспособление от скатывания на штифтах по ножевым опорам при негоризонтальности ножевых опор до  $\pm 4,5$  угловых минут. Практически горизонтальность ножевых опор устанавливается с применением уровня с паспортной погрешностью  $\pm 2$  угловые секунды.

Учитывая малость значений коэффициента трения качения ( $f_{\text{тр}} = 0,01$  мм) и погрешностей, применяемых в ЭИКСМ, средств измерений:

$$\delta P \leq 0,0002;$$

$$\delta Q \leq 0,0001; \quad (10)$$

$$\delta m \leq 0,0001,$$

можно пренебречь значениями произведений  $f_{\text{тр}}(\delta P + \delta Q + \delta g + \delta m)$  как величинами второго порядка малости. Тогда из (9) и (10) следует выражение для минимального значения погрешности воспроизведения координаты ЦМ:

$$\Delta r_{\text{min}} \geq r_{\text{min}} = \pm f_{\text{тр}}. \quad (11)$$

Как следует из (11) точность воспроизводимых координат центра масс на ЭИКСМ контрольных приспособлений может быть доведена до предельного значения 0,01 мм, ограниченного только коэффициентом трения качения штифтов КП по балансировочным ножам.

УДК 629.78

Щенетков Н.А., Макаров И.И., Кочкин Е.В.

### Современные технические средства контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов

Представлена линейка современных технических средств определения массы, координат центра масс, осевых моментов инерции, а также автоматизированного оборудования с возможностью обмера геометрических параметров балансируемого изделия, комбинированного стендового оборудования и оборудования для определения остаточных дисбалансов. Рассмотрена автоматизация и основные технические характеристики оборудования.

**Ключевые слова:** геометрия масс, средства контроля, погрешность, статическая балансировка, динамическая балансировка, измерительный комплекс, ракетно-космическая техника.

Средства контроля характеристик геометрии масс применяются в технологическом процессе сборки летательных аппаратов на этапе контроля и балансировки.

Первое поколение стендов представляет ССБМ-15М – стенд статической балансировки, предназначенный для определения массы и трёх координат изделия. Принцип действия стенда основан на уравнивании изделия относительно центральной опоры стенда путём установки балансировочных грузов на специальные площадки при его горизонтальном и наклонном положениях.



Рис. 1. Стенд ССБМ-15М

На смену стендам ССБМ пришли автоматизированные стенды ЦМ-300, АСКМ-1000 и МЦМ-1000 с подшипниковыми опорами для измерения массы и координат центра масс космических аппаратов. Данные средства измерения обеспечивают погрешность определения массы 0,1% для ЦМ-300, АСКМ-1000 и 0,05% для МЦМ-6000. Погрешность определения координаты центра масс составляет 0,1 мм на 1000 мм.



Рис. 2. Автоматизированные стенды ЦМ-300 и МЦМ-1000

Стенд АСКИ-1000 предназначен для измерения осевых моментов инерции. Автоматизация позволила значительно упростить работу операторов, сократить продолжительность контрольных циклов, уменьшить вероятность ошибок измерений, связанных с субъективными факторами. Данное средство измерения дает возможность определять момент инерции изделий весом до 1000 кг с точностью 0,1%.

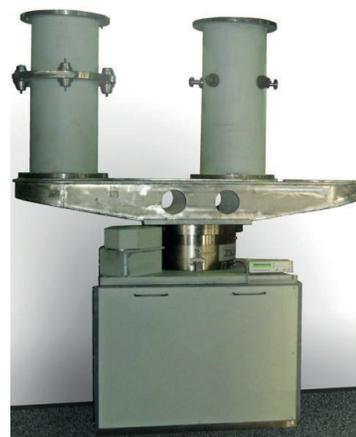


Рис. 3. Стенд АСКИ-1000



АМИК-3000 является следующим этапом в развитии средств измерения характеристик геометрии масс и позволяет в автоматизированном режиме определять массу, координаты центра масс, моменты инерции, тензор инерции и параметры эллипсоида инерции, а также производить статическую и динамическую балансировку летательных аппаратов массой до 3000 кг. Точность определения массы составила 0,1%, координаты центра масс – 0,1 мм на 1000 мм, момента инерции – 0,1%.



Рис. 4. Стенд АМИК-3000

В рамках ОКР «Центровка» изготовлен автоматизированный стенд для измерения массы, координат центра масс и геометрических параметров жидкостных ракетных двигателей массой до 6000 кг. Погрешность определения массы составила 0,05%, координаты центра масс – 0,1 мм на 1000 мм.

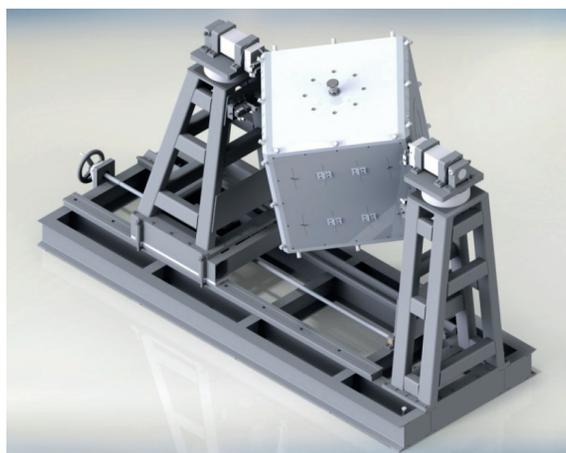


Рис. 6. Эталонный измерительный комплекс контроля статических моментов

В рамках ОКР «Дисбаланс» произведён единственный в Российской Федерации балансировочный станок на аэростатическом подвесе с уникальными характеристиками. Он позволяет снизить дисбаланс изделий до 1000 кг на 90% за цикл измерений. Погрешность определения главных центральных осей инерции составляет 1°.

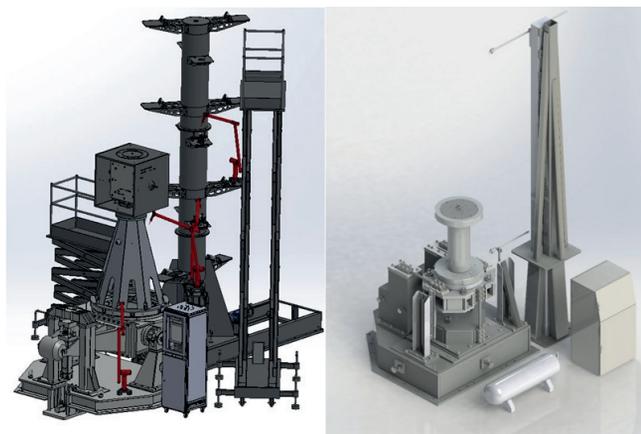


Рис. 5. ОКР «Центровка» и «Дисбаланс»

Эталонный измерительный комплекс контроля статических моментов (ЭИКСМ) предназначен для проверки средств измерений координат центра масс изделия. По сравнению с существующими образцами аналогичного оборудования ЭИКСМ обеспечивает расширенный диапазон измерений, повышенную точность и достоверность результатов измерения.

### Список литературы

1. Виденкин Н.А. Оптимизация технологических схем позиционирования при определении тензора инерции космического аппарата / Н.А. Виденкин, Е.В. Матвеев, Е.В. Кочкин // Технология машиностроения, 2015. № 12. С.48–53.
2. Матвеев Е.В. Новые автоматизированные стенды для контроля инерционных характеристик космических аппаратов / Е.В. Матвеев, Н.А. Виденкин, Е.В. Кочкин

// Наука и технология: материалы XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Миасс: МСНТ, 2012. С. 205.

3. Матвеев Е.В. Становление и развитие на ФГУП «НПО «ТЕХНОМАШ» технологического направления контроля инерционных характеристик космических аппаратов / Е.В. Матвеев, Е.В. Кочкин // Новым изделиям РКТ – новые технологии производства: сб. матер. НПК. Королёв: Изд-во: Машприбор, 2011. С. 47–51.



УДК 621.7

Павлов Н.А., Бещеков В.Г.

### Устройства и методы изготовления волноводов

Статья посвящена анализу известных конструкторско-технологических решений, применяемых при изготовлении волноводов.

**Ключевые слова:** волновод, гибка труб прямоугольного сечения, гибка наматыванием на вращающийся копир, гибка тремя роликами, гибка проталкиванием.

Волноводы представляют собой простейшие сборочные единицы устройств СВЧ. Полые волноводы состоят из трубы прямоугольного или круглого поперечного сечения, имеющей проводящую внутреннюю поверхность (собственно волновода), и соединительных фланцев. В зависимости от конструктивных

требований и назначения волноводные трубы бывают прямолинейными, изогнутыми, скрученными и могут иметь переменное по длине сечение, гофрированные стенки и т.д.

На рис. 1 дана классификация деталей волноводов по конструкторско-технологическим признакам.

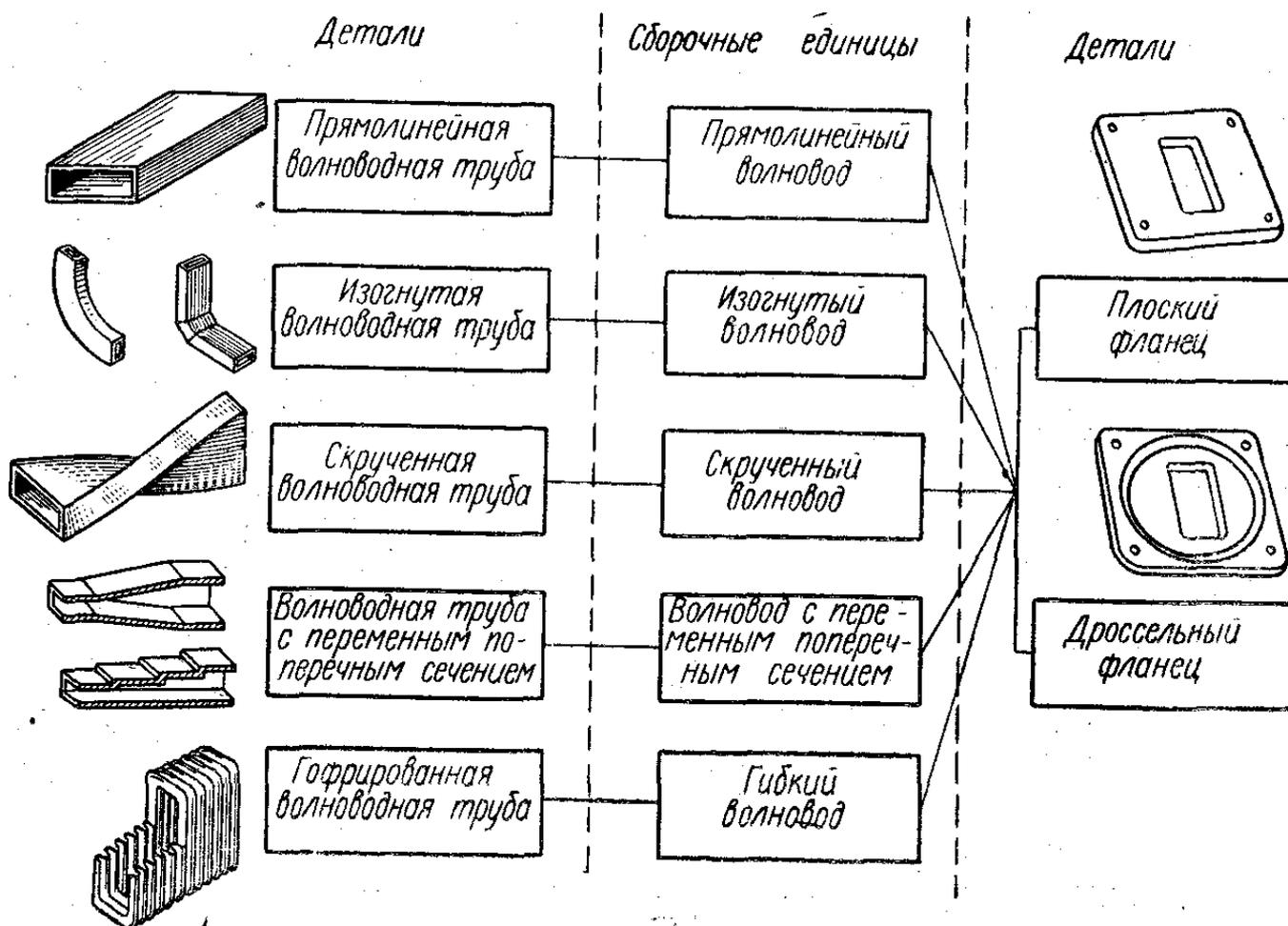


Рис.1 Классификация деталей волноводов по конструкторско-технологическим признакам

Если прямолинейные волноводы выполнены на основе стандартных труб прямоугольного поперечного сечения сборкой из отрезков с фланцами, то для производства остальных типов волноводов используются специфические технологические процессы, характерные для изготовления деталей волноводных сборочных единиц.

В последние годы отмечается тенденция использования полых изогнутых деталей из трубчатых заготовок при повышении требований к качеству изгибных трубчатых изделий. В настоящее время существует достаточно методов для получения изогнутых деталей труб. Ниже приведены следующие основные виды гибки:

- а) наматыванием на вращающийся копир;
- б) тремя роликами;
- в) проталкиванием через ролики;
- г) проталкиванием через канал матрицы;
- д) в штампах;
- е) гидростатическая – формовкой.

На практике используют различные методы изготовления изогнутых трубчатых изделий. Например, при изготовлении большого количества изогнутых трубчатых деталей высокого качества следует использовать специальные машины для гибки, а если требуется изготовить небольшое количество труб большой длины, то необязательно применять специальные машины, можно воспользоваться простыми инструментами для гибки.

Гибка с шарнирной оправкой является перспективной для гибки волноводных труб с сохранением жёстких допусков на внутренние размеры. Приспособление для гибки состоит из шарнирной оправки, подвижного упора, поворотного прижима, складкодержателя и шаблона, который может поворачиваться вокруг оси вместе с изгибаемой заготовкой. Для уменьшения трения между заготовкой и складкодержателем проложена тонкая стальная полоса, скреплённая с шаблоном.

Заготовка с шарнирной оправкой закрепляется зажатием между складкодержателем и неподвижным упором с одного конца, шаблоном и поворотным прижимом с другого. При этом шаблон и поворотный прижим жёстко соединяются. В процессе гибки они поворачиваются на требуемый угол вокруг оси. Часть трубы, обращённая к шаблону, подвергается сжатию, а противоположная – растяжению. Сжимаемая часть укорачивается, толщина стенки в этой области растёт, в растягиваемой части происходит растяжение стенок с их одновременным утонением. Металл перемещается не только в изогнутой, но и в прямой части трубы – в пределах 15–25 мм от крайних точек изгиба. Вследствие этого предусмотрены скосы на складкодержателе и шаблоне, предохраняющие сжимаемую поверхность от образования гофров.

Несмотря на изменение внешних размеров волновода, его внутренние размеры остаются стабильными благодаря шарнирной оправке.

Применение гибки с калибрующей оправкой позволяет обеспечить точность внутренних размеров в пределах  $\pm 0,05$  мм.

Для гибки без заполнения полости используется способ насечки. При этом изгиб происходит в результате пластической деформации внешних слоёв металла стенок волноводной трубы.

Такой способ заключается в том, что изгибаемая заготовка периодически передвигается на шаг  $t$  в специальном гибочном станке. В момент остановки происходит удар лезвиями чеканов по верхней и боковым поверхностям заготовки. Верхний чекан имеет горизонтально расположенную рабочую кромку и врежется на одинаковую глубину  $S$  по всей ширине верхней стенки. Два боковых чекана имеют кромки, расходящиеся под некоторым углом, и в момент удара врезаются в боковые стенки на глубину, равную глубине врезания верхнего чекана, в нижней части они не касаются боковых стенок заготовки.

В результате происходит удлинение верхней и боковых стенок заготовки – минимальное и постоянное для верхней стенки  $u$ , переменное для боковых – и заготовка изгибается в сторону нижней стенки. Неравномерное удлинение боковых стенок необходимо, чтобы избежать образования на них гофров.

Гибка насечкой характеризуется высокой производительностью и может быть использована для обработки заготовок с различными размерами поперечного сечения (от 11X5,5 до 248X124 мм).

Проведённый анализ методов и устройств для изготовления волноводов гибкой выявил определённые недостатки существующей методологии изготовления волноводов и обозначил «узкие места» в технологическом обеспечении производства волноводов, требующие решения в целях оптимизации всего технологического цикла изготовления волноводов гибкой.

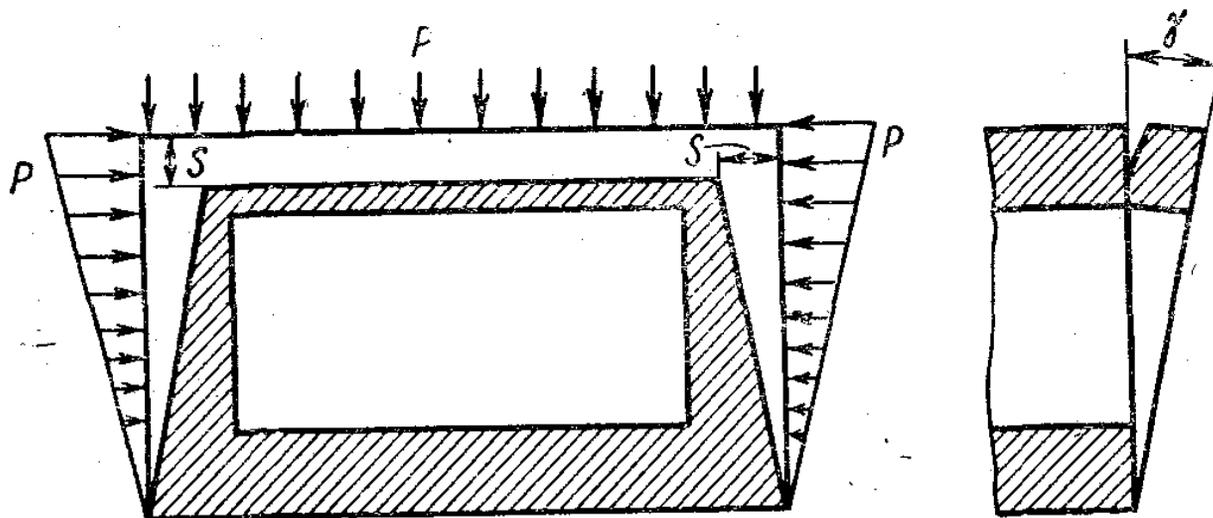


Рис.2. Схема деформаций при гибке волноводной трубы

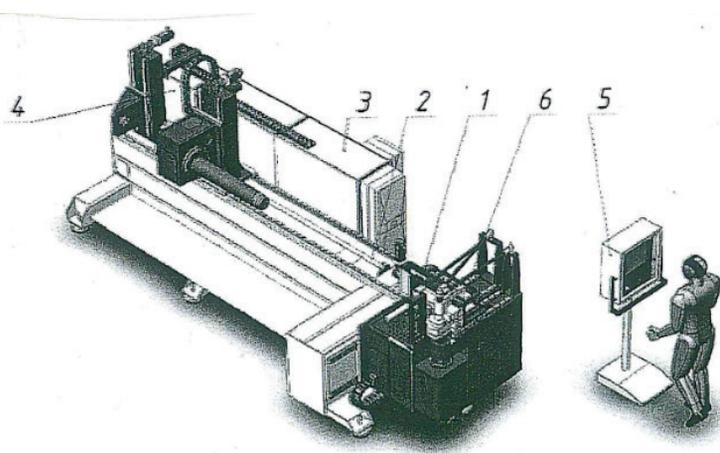


В конструкторском подразделении ФГУП «НПО «Техномаш» несколько лет проводятся исследовательские работы по разработке и созданию специального технологического оборудования и оснастки для гибки тонкостенных волноводных труб прямоугольного сечения (ОКР «Прогресс –2025»), применяемых при изготовлении антенно-фидерных устройств (АФУ) спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Работы ведутся в целях создания современного трубогибочного оборудования и оснастки для осуществления технологии гибки тонкостенных труб прямоугольного сечения для получения волноводных труб сложной формы, которые широко применяются при изготовлении АФУ спутников ДЗЗ.

Совершенствование конструкции и технологии изготовления является одной из задач повышения технического уровня модуля полезной нагрузкой космического аппарата, которая в том числе включает в себя:

- увеличение пропускной способности приёмно-передающих устройств;
- снижение удельной массы (параметров) элементов;
- снижение потерь при прохождении сигнала по трактам АФУ;
- уменьшение трудоёмкости изготовления элементов и монтажа АФУ на конструкцию КА;
- увеличение сроков активного существования космического аппарата.



- 1 - узлы формообразования;
- 2 - узлы позиционирования;
- 3 - шкаф электрический;
- 4 - шкаф пневмогидравлический;
- 5 - пульт управления;
- 6 - оснастка

Рис.3. Общий вид разрабатываемого оборудования

Разработанное оборудование позволит производить гибку прямоугольных труб намоткой на шаблон с применением бустера, выглаживателя и дорна, имеющих гибки нескольких радиусов (до четырёх) без переналадки, с количеством гибов более пяти. Дорн оснащён системой автоматической смазки. Станок оснащён системой числового программного управления (ЧПУ) и построен на базе современных сервоприводов, без применения гидропривода, что гарантирует высокую скорость и точность работы, а также позволяет эксплуатировать станок в цехах, где недопустимы утечки масла.

Для гибки тонкостенных труб, используемых при изготовлении волноводов, которые могут чрезмерно деформироваться под собственным весом, узлы формообразования оснащаются поддерживающим роликом, приводимым от серводвигателя. Поддерживающий ролик

может автоматически перемещаться по командам системы ЧПУ для обеспечения беспрепятственного захода изгибаемой трубы в ручьи матриц, а также для отвода в нижнее положение во избежание столкновения с другими узлами станка.

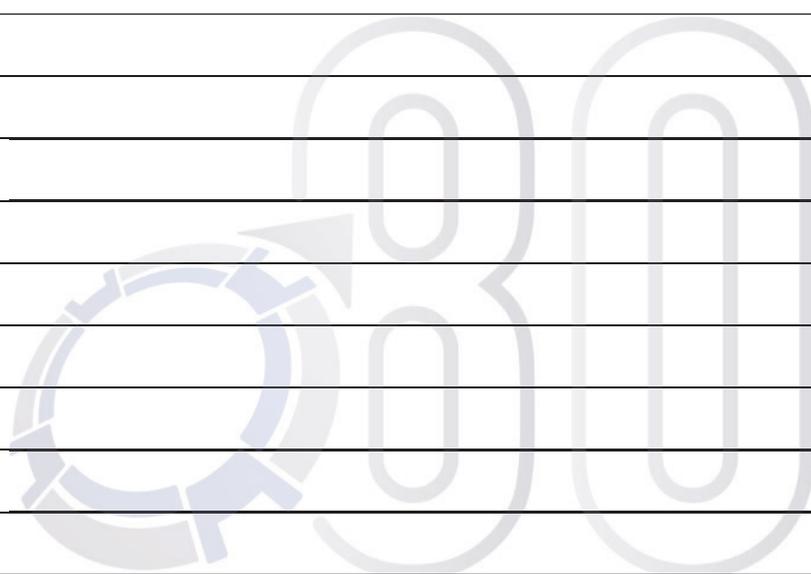
Узлы позиционирования необходимы для перемещения трубы вертикально, осуществления гибки на различные радиусы, продольно для выполнения нескольких изгибов, а также для поперечного перемещения узлов формообразования. К узлам позиционирования относятся станина (1); шпиндель (2); суппорт вертикальный (3); узел подачи дорна (4).

Таким образом, разрабатываемое новое поколение специального технологического оборудования и оснастки для гибки волноводных труб позволит повысить тактико-технические характеристики перспективных изделий РКТ.

◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК



✦ ДЛЯ ЗАМЕТОК

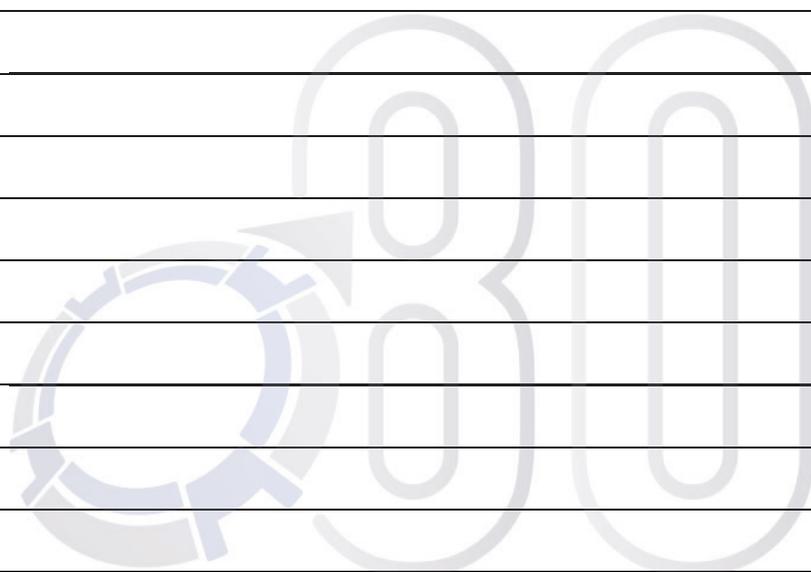


НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

✦ ДЛ Я ЗАМЕТОК



◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК



◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК

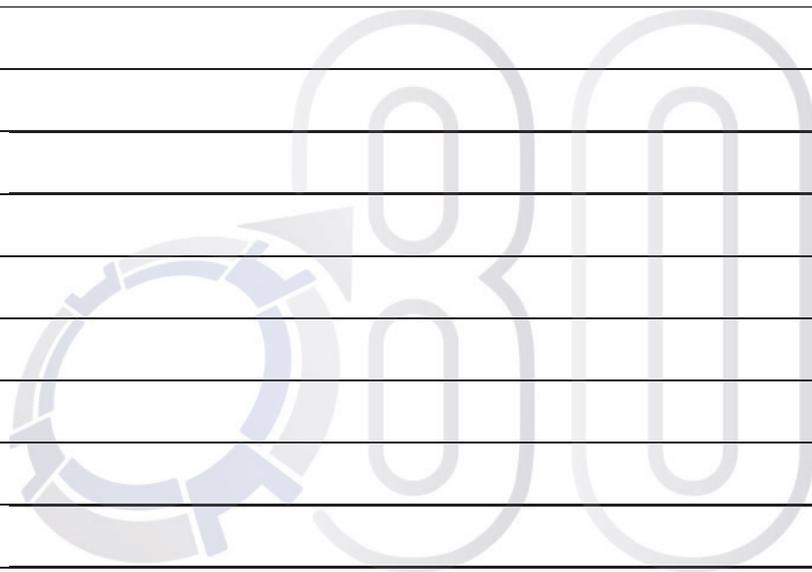


НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

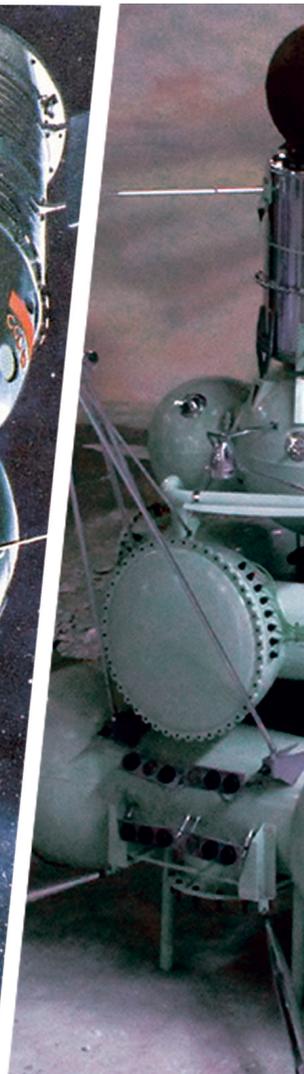
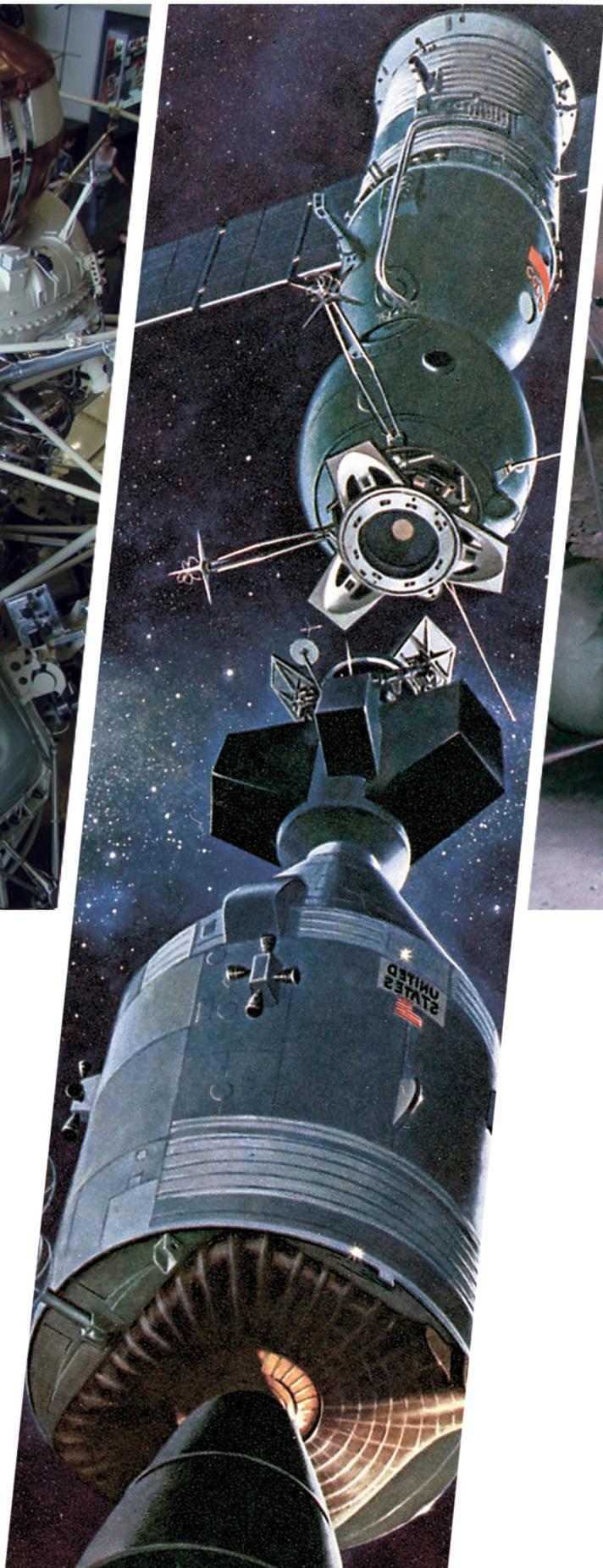
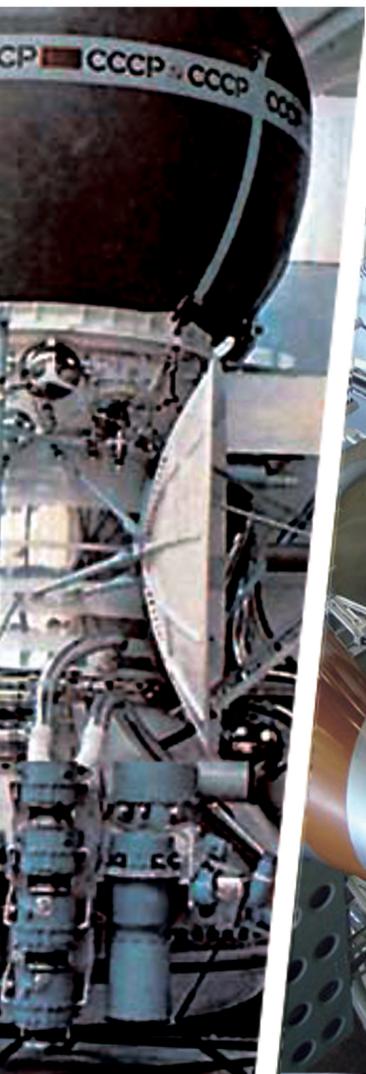
◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК



◆ ДЛЯ ЗАМЕТОК



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

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