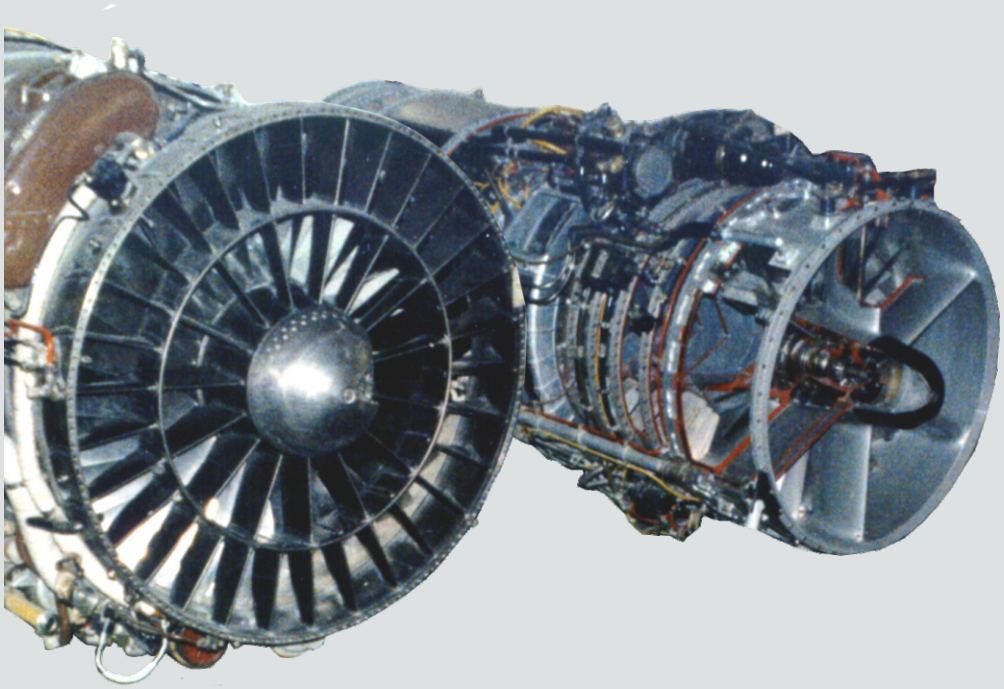
НАУКА - ПРОИЗВОДСТВУ

ВЫПУСК 8



УФА 2013

ОАО НИИТ

Министерство промышленности и торговли РФ
Департамент авиационной промышленности
Открытое акционерное общество
Институт технологии и организации производства

Наука – производству

Ежегодный научно-технический сборник

Выпуск 8

Под общей редакцией
доктора технических наук, профессора В. Л. Юрьева

Уфа 2013

УДК 621
ББК 34.4

Редколлегия:
д-р техн. наук, проф. *В. Л. Юрьев* (председатель),
И.Г.Каримов (зам. председателя),
канд. техн. наук *Ю. М. Ахметов,* канд. техн. наук *Н.А.Сухова*,
канд. техн. наук *Заянчковский Ю. И.* (по согласованию), *С. В. Перлов,*
С. В. Старочкина, М. Г. Закиров, *С. Н. Никитин,*
Р. А. Агеева (ответств. за выпуск)

Н34 Наука – производству: Ежегодный научно-технический сборник.
Вып. 8/ под общей ред. д-ра техн. наук, проф.В.Л.Юрьева. – Уфа: Издательство «Вагант», 2013. – 264с.

ISBN **9-785-963-504-04-8**

Сборник, посвященный 55-летию ОАО НИИТ, содержит материалы, освещающие достижения отраслевой и вузовской научно-производственной деятельности в наиболее актуальных областях исследований.

Представляет практический интерес для инженерно-технических работников предприятий, аспирантов и студентов ВУЗов технических и экономических специальностей и может быть использован при разработке прогрессивных технологических процессов и оборудования.

ISBN 9-785-963-504-04-8
© ОАО НИИТ, 2013
© Издательство «Вагант», 2013

Содержание

Раздел 1. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Тихонов А.И., Мокроусова Е.И. Особенности интеграции российских авиадвигателестроительных предприятий в современных условиях 9

Юрьев В.Л., Старочкина С.В., Сухова Н.А. Технико-экономическое обоснование инвестиций в техническое перевооружение авиадвигателестроительных предприятий 15

Сухова Н.А. Технологический аудит как основа разработки мероприятий по техническому перевооружению производства 24

Ковалев И.С. Комплексная оценка ремонтопригодности авиационных ГТД на ранних стадиях проектирования 33

Старочкина С.В., Сухова Н.А., Камалова Н.Н. Определение трудоемкости деталей (узлов) нового двигателя на этапе технического проектирования 42

Кадырова Ж.М., Семенов А.С. Разработка экономико-математической модели прогнозирования трудоемкости изготовления лопаток 48

Заянчковский Ю.И., Юрьев В.Л., Каримов И.Г. Управление научно – исследовательскими и опытно - конструкторскими работами в ОАО НИИТ 54

Тихонов А. И., Мокроусова Е. И. Особенности производства современных авиационных двигателей 66

Иркабаев И.М., Сухова Н.А. Разработка методики комплексной оценки эффективности технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов 73

Быбин А.А., Невьянцева Р.Р., Смольникова О.Г. Некоторые подходы к созданию системы прогнозирования производительности процесса химического удаления жаростойкого покрытия 80

Заянчковский Ю.И. Технико-экономические аспекты внедрения системы УКП-2008 при стендовых испытаниях ГТД 88

Раздел 2. ТЕХНОЛОГИЯ АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Юрьев В.Л., Старочкина С.В., Перлов С.В., Ковалев И.С., Кондратец В.Д., Борисов Г.С., Закиров М.Г. Разработка технологии чистовой обработки и специализированного станка модели 4СЭШ-360П4 для алмазного электрохимического шлифования сложно-профильных поверхностей деталей типа лопатки компрессора ГТД..... 93

Абраимов Н.В., Терехин А.М., Шкретов Ю.П. К вопросу о горячем изостатическом прессовании лопаток турбин и локальной защите поверхностей при газовом алитировании 104
Кярамян К.А., Лыков А.М. Температурные условия в процессе наплавки металлических материалов 117
Докашев В.В., Ромашов А.С., Фомичев Е.О., Жигунов А.А. Оценка возможности сварки нового жаропрочного сплава ВЖ 171 методом электронно-лучевой сварки 121
Гейкин В.А., Докашев В.В., Мартышин Г.В., Быков Ю.Г. Исследование свариваемости сплава на основе интерметаллидного соединения Ti_2NbAl 127
Виноградов А.В., Фомина Л.П. Практическое использование процессов ионно-плазменного и вакуумного упрочнения деталей ГТД 134
Перевоин С.А., Исаева Е.А. Создание компенсаторов термических напряжений для перспективного авиационного ГТД методами порошковой металлургии 144
Будилов В.В., Рамазанов К.Н., Рамазанов И.С. Модификация поверхности титанового сплава ВТ6 в тлеющем разряде с эффектом полого катода 152
Огородов В.А. Определение параметров алмазных зерен на поверхности хонинговального бруска 163
Огородов В.А. К вопросу образования заусенцев при алмазном хонинговании 170
Агзамов Р.Д. Коррозионная стойкость многослойных покрытий композиции Ti-TiN на стали 08кп 178
Каримов И.Г., Юрьев В.Л., Постнов В.В. К вопросу об установлении ограничения производительности лезвийной обработки деталей ГТД по режущим свойствам инструмента 185
Шехтман С.Р. Защита поверхности деталей из конструкционных материалов с использованием разряда на основе эффекта полого катода 190
Семенов А.С. Актуальность замены существующего парка производственного оборудования предприятий в авиадвигателестроении 197

Раздел 3. ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Асфандияров Д.У, Тук Д.Е., Чечулин А.Ю., Сверчков П.В., Шабельник Ю.А., Ганеев А.А. Проблемы организации высокоэффективного производства на пути реализации микротурбинной энергетики 201

Камалетдинов А.Ф. Фильтр для очистки ШФЛУ от механических примесей 207
Ахметов Ю.М., Мухаметов М.В. Численное моделирование фазового перехода рабочей жидкости в устройстве электрогидродинамического преобразования энергии 210
Ахметов Ю.М., Теницкий М.Ф., Свистунов А.В., Юнусбаев Д.И., Зангиров Э.И. Разработка испытательного стенда квазиизотермического вихревого регулятора давления газа 217
Ахметов Ю.М., Юнусбаев Д.И., Зангиров Э.И.,Свистунов А.В., Теницкий М.Ф. Экспериментальное исследование рабочих характеристик квазиизотермического регулятора давления газов для ГРП 221
Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И., Калимуллин Р.Р., Свистунов А.В., Теницкий М.Ф., Юнусбаев Д.И. Анализ влияния характера смешения стратифицированных потоков на процессы, протекающие в квазиизотермическом вихревом регуляторе давления газов 228
Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И., Калимуллин Р.Р., Латыпов А.И., Шестерякова Н.В. Методика моделирования течения двухфазной жидкости в вихревом теплогенераторе 237
Семавин Н.И. Разработка и реализация методологического подхода к размещению технологического оборудования 251
Гарифуллин И.М., Гутин Л.И., Закиров М.Г., Нагуманов О.В., Суфиянов Р.Р., Агадуллин Ф.М. Ограничение перенапряжений на выходе тиристорного источника питания при резком сбросе нагрузки... 256

Юрьев В. Л.
Генеральный директор ОАО НИИТ,
доктор технических наук, профессор

Институту технологии и организации производства исполнилось 55 лет.

Созданный в годы бурного развития авиационной промышленности для приближения деятельности отраслевого научно-исследовательского института технологии и организации производства (НИАТ) к заводам авиационной промышленности в целях успешного решения задач по освоению серийного производства новых объектов авиационной техники, он до сегодняшнего дня отвечает своему назначению.

За 55-летний период научно-производственной деятельности институтом выполнено более 2250 научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических разработок. Разработано более 800 новых технологических процессов, спроектировано около 700 моделей специализированного оборудования, средств испытания и контроля. На производственной базе института и с участием сторонних организаций изготовлено более 1000 образцов специального и специализированного технологического оборудования и систем контроля.

Предприятиями авиационной промышленности по конструкторской документации института изготовлено около 850 единиц различного оборудования. Большинство разработок внедрено в серийное производство со значительным экономическим эффектом. Практически на всех предприятиях авиационной промышленности применялись созданные в институте специализированные станки для обработки лопаток ГТД, а на испытательных станциях этих предприятий – измерительные системы и устройства автоматизации. Высокий научно-технический уровень разработок подтверждается 1020 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения и промышленные образцы, медалями ВДНХ, Государственной премией РФ в области науки и техники.

Среди множества разработок получили отраслевое признание и стали директивными, такие, как например, «Технологический процесс литья лопаток турбины и соплового аппарата с готовым газовым

трактом», «Технологический процесс удаления стержней из отливок в растворе фторсолей», «Технологический процесс изотермической штамповки лопаток газотурбинных двигателей», специализированные фрезерные, шлифовальные и полировальные станки (в том числе с ЧПУ) для обработки пера лопаток компрессора, комплекс оборудования для производства многослойных гофрированных трубопроводов, сильфонов и компенсаторов, высокопрочные алмазные круги, тиристорные источники питания, автоматизированные системы контроля параметров газотурбинных двигателей, их узлов и агрегатов, технологические процессы и оборудование для производства деталей ГТД из композиционных материалов.

Указом Президента Российской Федерации №1039 от 02.03.2011 г. ОАО НИИТ включен в интегрированную структуру «Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют», в составе которой на него возложены задачи анализа технологичности вновь создаваемых авиационных ГТД, разработки технологических процессов производства двигателей пятого поколения.

За последние годы специалистами Института

− выполнен полный цикл технологической подготовки, включающий планировочное решение, подбор современного высокопроизводительного оборудования, технологические процессы для предприятия по капитальному ремонту газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов (Казахстан);
− спроектированы, изготовлены и внедрены станки:
  а) для электроалмазного шлифования, модель 4СЭШ-1,
  б) для электрохимического шлифования, модель 4СЭШ-360П4;
− спроектирован, изготовлен и внедрен комплекс оборудования для производства многослойных тонкостенных труб;
– разработаны, изготовлены и внедрены тиристорные источники электропитания с микропроцессорным управлением, модели 4ТИП-1М, 4ТИП-1МС, 4ТИП-1МП, 4ТИП-2МП;
− спроектирована и изготовлена широкая гамма алмазного режущего инструмента;
− разработан технологический процесс алмазного прерывистого шлифования щеточных уплотнений;
− разработаны технологические процессы изготовления лопаток ГТД и диска центробежного компрессора из композиционных материалов;

− разработаны технологические процессы обработки жаропрочных и титановых сплавов алмазными кругами;
− проведен анализ технологичности и ремонтопригодности на стадиях эскизного проектирования и разработки технического проекта двигателя ПД-14;
− сертифицирован весь модельный ряд тиристорных источников электропитания.

С 1958 года и до настоящего времени наибольшие объемы работ выполнялись для предприятий авиационной промышленности с целью совершенствования серийного и опытного производства новых изделий авиационной техники.

ОАО НИИТ является одним из двух сохранившихся технологических институтов в авиадвигателестроении, востребованность современных технологических процессов, технологических рекомендаций, методических материалов возрастает с каждым годом. В настоящее время деловыми партнерами ОАО НИИТ являются ЦИАМ (Москва), ОАО «Климов» (Санкт-Петербург), НПЦ газотурбостроения «Салют» (Москва), НПО «Сатурн» (Рыбинск), ОАО «Авиадвигатель (Пермь), ОАО «Пермский моторный завод» (Пермь), ОАО УМПО (Уфа), УГАТУ (Уфа), Центр автоматизации и робототехники (Уфа) и др.

Большая часть научно-исследовательских работ проводится в рамках Федеральных целевых программ «Развитие оборонно-промышленного комплекса РФ на 2007–2010 годы и на период до 2015 года», «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года».

Институт наращивает экспериментальную и опытно-производственную базу, научный и кадровый потенциал. Кадровая политика ориентирована на приток в институт талантливой молодежи, созданы условия для ее творческого роста, учреждена именная стипендия ОАО НИИТ для поощрения одаренных студентов и магистрантов Уфимского государственного авиационного технического университета.

Институт сохранил основные научные направления и трудовые традиции. На сегодня ОАО НИИТ – сплоченный коллектив конструкторов, технологов, рабочих, способный решать технологические и производственные проблемы предприятий отрасли.

Раздел I

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 338.2 (075.8)

А. И. Тихонов, Е. И. Мокроусова (МАИ)

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЦИИ РОССИЙСКИХ АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время изменения в экономике и политике государств обусловлены, главным образом, созданием и распространением наукоемких технологий на базе инновационных процессов. Они формируют технологическое доминирование в военной и гражданской сфере за счет реализации передовых научных идей в новых системах оружия, для которых отсутствуют эффективные средства противодействия, что позволяет завоевывать международные рынки «мирным» путем.

Для того, чтобы обеспечить инновационный прорыв, необходимо системное и экономически обоснованное объединение различных ресурсов: организационных, кадровых, инвестиционных, производственных, финансовых и других, а также их концентрация на решении ключевых задач инновационного развития.

Основными игроками на арене мировой экономики стали крупнейшие корпорации, которые ведут жесткую борьбу за рынки сбыта высокотехнологичной продукции. В США и Европе сформировались корпорации-гиганты, управляющие такими сложными видами бизнеса, как авиация, космос, информационные технологии и вооружение. Среди них – Boeing (США), BAE Systems (Великобритания), EADS (Нидерланды), Thales (Франция),

Finmeccanica (Италия) и другие предприятия, объемы продаж которых на рынке высоких технологий исчисляются десятками миллиардов долларов. Очевидно, что такая интеграция позволяет консолидировать ресурсы предприятий – участников корпорации и обеспечить разработку общей стратегии, проведение совместных научно-исследовательских работ, выпуск наукоемкой продукции, ее продвижение на мировом рынке, последующее сервисное обслуживание и все это – на базе ресурсосберегающих технологий.

Процессы интеграции, слияний и поглощений компаний высокотехнологичного бизнеса набирают силу и в России. В нашей стране формируются интегрированные научно-производственные структуры рыночного типа – корпорации, концерны, консорциумы, финансово-промышленные группы и холдинги. Наряду с техническими и экономическими соображениями, необходимость интеграции производителей авиационной техники диктуется стремлением объединить усилия по завоеванию внешнего рынка, устранив, при этом, конкуренцию на внутреннем рынке.

Объединение наукоемких промышленных предприятий в крупные корпорации осуществляется в целях единого управления всеми стадиями жизненного цикла наукоемкой продукции, начиная от фундаментальных научных исследований и заканчивая рыночной реализацией с последующим сервисным обслуживанием.

Глобальная конкуренция – а именно в ней для выживания должны участвовать корпорации – отраслевые монополисты – предполагает соревнование систем, а не отдельных компаний. Это отчетливо видно при анализе действий и политики таких гигантов, как EADS и Boeing. Без полномасштабной и всесторонней господдержки авиа- и двигателестроение не имеют шансов на успех на рынке.

Примерами консолидации и интеграции инновационной деятельности российских оборонно-промышленных корпораций являются ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (ОАК), ОАО Объединённая промышленная корпорация (ОПК) «Оборонпром», ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (ОДК).

Основанное в 2006 году ОАО «ОАК» объединяет более 20 ведущих российских предприятия авиастроения:ОАО «Компания

«Сухой», ОАО «Корпорация «Иркут», ОАО «РСК «МиГ», ОАО «Туполев», ОАО «ОКБ Сухого», ОАО «ОКБ им. А.С.Яковлева», ОАО «ОАК-ТС», ОАО «Ил», ОАО «ТАНТК им. Г.М.Бериева», ОАО «КнААПО», ОАО «НАПО им. В.П.Чкалова», ОАО «КАПО им. С.П.Горбунова», ОАО «ВАСО», ЗАО «Авиастар-СП», ОАО «НАЗ «Сокол» и др.

Кроме того, в группу входит более 50 хозяйственных обществ (дочерние и зависимые общества ДЗО ОАО «ОАК»), осуществляющих обеспечивающие и/или непрофильные функции. В 2011году в ОАК вошел ОАО «ЭМЗ им. В.М. Мясищева», в 2012 году в ОАК вошел ОАО «ЛИИ им. М.М. Громова».

Приоритетными направлениями деятельности ОАО «ОАК» и входящих в него компаний, являются: разработка, производство, реализация, сопровождение эксплуатации, гарантийное и сервисное обслуживание, модернизация, ремонт и утилизация авиационной техники гражданского и военного назначения.

В структуре ОАК активно идет процесс создания дивизионов. Нынешняя структура ОАК не удовлетворяет современным требованиям времени. Сейчас функционирует структура, в которой четко разделены по блокам проектирование летательных аппаратов, их производство, послепродажный сервис, специализированные и обслуживающие центры.

Будут сформированы четыре интегрированных структуры (бизнес-единицы): боевой авиации, транспортной, специальной и гражданской. Переход к новой структуре позволит избавиться от имеющихся недостатков и существенно повысить эффективность деятельности корпорации. Дивизиональная структура ОАК приведена на рис.1 [1].

Переход к новой структуре, сформированной по дивизиональному принципу, позволит повысить конкурентоспособность и эффективность российской авиапромышленности за счет перегруппировки и концентрации ресурсов (управленческих, конструкторских, производственных), формирования и развития недостающих компетенций и переноса фокуса конкуренции с внутренней на внешнюю.

Объединённая промышленная корпорация «Оборонпром», многопрофильная промышленно-инвестиционная группа в области

машиностроения и высоких технологий, была создана в 2002 году [2].

Рис.1. Структура ОАО «ОАК», сформированная по дивизиональному принципу

В целях оптимизации системы управления в 2006 году была создана интегрированная структура «Вертолеты России», объединившая вертолетостроительные активы холдинга, а в 2007 году – «Объединенная двигателестроительная корпорация» (ОДК), сконцентрировавшая более 80% научно-производственного потенциала российского авиационного двигателестроения.

Благодаря созданию интегрированных структур были решены проблемы непродуктивной внутриотраслевой конкуренции за бюджетные ресурсы и распыления ограниченных инвестиционных возможностей по большому числу предприятий и программ.

Основной целью создания структуры на базе ОАО «ОПК «Оборонпром» является формирование современных

производственных отношений, восстановление административных и научно-технических связей между отдельными предприятиями отрасли.

Вертолётостроительная интегрированная группа «Вертолёты России» – это холдинг, объединяющий все вертолетостроительные предприятия страны, ведущий отечественный производитель вертолётов для гражданской авиации и армии. Холдинг объединяет конструкторские бюро, серийные заводы и предприятия-смежники и выпускает всю гамму вертолётов марки различных типов и модификаций. Структура интегрированной группы представлена на рис.2.

Рис.2. Структура интегрированной группы «Вертолеты России»

«Объединенная двигателестроительная корпорация» (ОДК) – двигателестроительная интегрированная структура, производящая двигатели для военной и гражданской авиации, космических программ, установки различной мощности для производства электрической и тепловой энергии, газоперекачивающие и корабельные газотурбинные агрегаты. В ОДК входят ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ», ОАО «Московское машиностроительное предприятие им.В.В.Чернышева», ОАО «Пермский моторный завод», ОАО «УМПО», ОАО «НПО «Сатурн», ОАО «Сатурн – Газовые турбины», ОАО «Климов», ОАО «Самарский научно-технический комплекс (СНТК) им.Н.Д.Кузнецова», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Научно-производственное предприятие «Мотор», ОАО «Авиамоторный научно-технический комплекс «Союз», Тушинское

моторостроительное конструкторское бюро «Союз», ФГУП «Омское моторостроительное объединение им.П.И.Баранова», ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение» [3].

Основными сферами деятельности ОДК являются двигатели для военной авиации, двигатели для гражданской авиации, вертолетные двигатели, ракетные двигатели, промышленные газотурбинные двигатели, судовые двигатели, оборудование для транспортировки нефти и газа, энергогенерирующее оборудование.

Приоритетными направлениями деятельности ОДК и входящих в него компаний, являются реализация приоритетных проектов по созданию и запуску в серийное производство перспективных авиационных двигателей: двигателя SaM-146, семейства перспективных двигателей с тягой 9-18т. для гражданской авиации, семейства перспективных двигателей для военной авиации, семейства перспективных вертолетных двигателей; закрепление Корпорации в числе пяти крупнейших мировых производителей газотурбинной техники, создаваемой на базе технологий авиационного двигателестроения; удержание в долгосрочной перспективе не менее 70% российского рынка газотурбинной техники, создаваемой на базе авиационных технологий, в том числе для обеспечения потребностей ОАК, «Вертолетов России», «Газпрома», «Роснефти», Росатома, муниципальных образований, федеральных ведомств.

В структуре ОДК, как и в структуре ОАО «ОАК» начался процесс создания дивизионов. Дивизионная структура управления вполне традиционна для корпораций подобного уровня (рис.3).

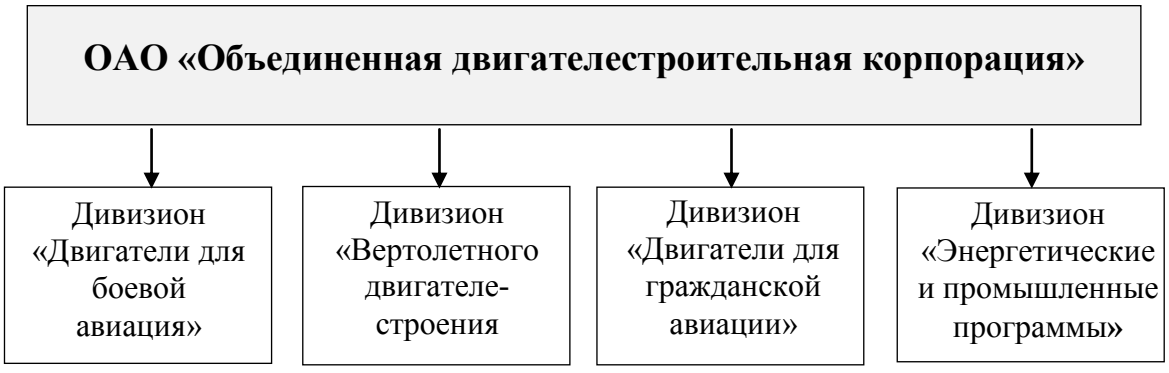


Рис.3. Дивизионная структура управления в ОДК

Опыт последних лет показывает, что процессы реорганизации компаний – преобразование, слияние, присоединение, разделение, выделение в высокотехнологичном бизнесе идут чрезвычайно высокими темпами.

Объединение наукоемких промышленных предприятий в крупные корпорации позволит управлять всеми стадиями жизненного цикла наукоемкой продукции, начиная от фундаментальных научных исследований и заканчивая рыночной реализацией с последующим сервисным обслуживанием, что обеспечит выпуск наукоемкой конкурентоспособной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс] Объединенная авиадвигателестроительная корпорация. URL: http://www.uacrussia.ru/ru/
2. [Электронный ресурс] Объединенная промышленная корпорация. URL: http://www.oboronprom.ru/
3. [Электронный ресурс] Объединенная двигателестроительная корпорация. URL: http://www.uk-odk.ru/rus/

УДК 338.5

В.Л. Юрьев, С.В. Старочкина, Н.А.Сухова (ОАО НИИТ)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИЙ В ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Современное развитие мировой экономики сопровождается нарастающим ужесточением конкурентной борьбы, глобализацией ее характера и интеграцией арсенала используемых методов. В этих условиях стратегические векторы экономического прогресса России фокусируются на проблеме повышения конкурентоспособности

наукоемких и инновационных отраслей. Это всецело относится и к авиационному двигателестроению[1].

Одна из сложнейших задач, стоящих перед предприятиями авиадвигателестроения России, это, прежде всего, повышение технических и экономических показателей двигателей до мирового конкурентоспособного уровня. Зачастую на многих предприятиях отрасли изношенный и морально устаревший станочный парк не позволяет в полной мере применять и осваивать современные технологии, что приводит к значительным экономическим и временным затратам, а это значительно усложняет поддержание высокого конкурентоспособного уровня. Поэтому, техническое перевооружение является ключевым этапом для будущего всего авиадвигателестроения России.

Одним из важнейших направлений обеспечения конкурентоспособности изделий авиадвигателестроения является реализация концепции проектирования под заданную стоимость. Для решения задач прогнозирования, планирования и управления стоимостью серийных двигателей необходимо иметь инструментарий, позволяющий выполнять расчеты трудовых затрат, материальных и финансовых ресурсов, требуемых для серийного производства изделий ГТД. Особенно актуальной является задача технико-экономического обоснования проекта на его ранних стадиях, когда решаются вопросы выбора схемы кооперации, расчета баланса производственных мощностей, необходимых для выполнения программы выпуска, разработки программы технического перевооружения предприятий. Цена исправления ошибок, допущенных при решении этих задач, очень высока.

Достижение данных задач невозможно без реализации в процессе разработки специальных мероприятий по управлению затратами, трудоемкостью и себестоимостью изделия.

В связи с этим представляется целесообразным подробнее рассмотреть процесс технико-экономического обоснования осуществления инвестиций в техническое перевооружение авиадвигателестроительных предприятий на этапах разработки эскизного и технического проекта двигателя нового поколения.

При оценке технико-экономической эффективности инвестиционного проекта по техническому перевооружению авиадвигателестроительных предприятий используется система

показателей, которые дают обоснование целесообразности вложения средств в проектное решение. Их можно разделить на две группы – натуральные и стоимостные показатели.

Натуральные показатели, или технические параметры проекта, характеризуют техническую или технологическую его сторону. Для проектов, связанных с внедрением нового оборудования в авиадвигателестроении, это могут быть показатели прироста производительности труда или производительности технического средства, снижение трудоемкости, достигаемое при их использовании, сокращение трудоемкости работ по ремонту и др.

Но как бы ни были высоки технические параметры проекта, окончательное решение по принятию проекта к реализации или выбору наиболее оптимального варианта принимается по стоимостным показателям.

Стоимостными показателями инвестиционного проекта являются:

– сумма инвестиций или капитальных вложений, необходимых для реализации проекта;

– текущие расходы или издержки производства, возникающие при внедрении проекта или эксплуатации проектных разработок;

– доходы, получаемые предприятием в результате использования проектных решений;

– прибыль или чистый доход по проекту, остающиеся у предприятия после покрытия всех расходов и уплаты налогов.

Обычно инвестиционный проект содержит большую группу как технических, так и стоимостных параметров. Но основной целью проекта, как правило, является улучшение одного или двух-трех показателей. Эти показатели и являются критериями инвестиционного проекта.

Для решения задач технико-экономического обоснования целесообразности инвестиций в техническое перевооружение на ранних стадиях проектирования нового изделия в условиях ограниченной конструкторской и технологической информации об изделии, предлагается использовать критерии – показатели улучшения технических или технологических параметров производственного процесса:

– снижение трудоемкости продукции в результате внедрения прогрессивных приемов и методов, а также нового оборудования (в процентах) [3]

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100,$$

где T_1, T_2 - трудоемкость нового изделия до и после реализации мероприятия по внедрению нового оборудования(в нормочасах);

– рост производительности труда (в процентах) [3]

$$\Delta П = \frac{100 \cdot \Delta T}{100 - \Delta T}$$

– рост уровня технологичности по трудоемкости

$$У = (У_2 - У_1) \cdot 100,$$

где $У_1$, $У_2$ – уровень технологичности по трудоемкости до и после реализации мероприятий по оптимизации технологических процессов, в том числе и за счет внедрения нового оборудования;

– уровень технологичности по трудоемкости до реализации мероприятий по оптимизации технологических процессов, в том числе и за счет внедрения нового оборудования

$$У_1 = \frac{T_0}{T_1},$$

где T_0, T_1 – трудоемкость изделия-прототипа и нового изделия до реализации мероприятий по оптимизации технологических процессов, в том числе и за счет внедрения нового оборудования (в нормочасах);

– уровень технологичности по трудоемкости после реализации мероприятий по оптимизации технологических процессов, в том числе и за счет внедрения нового оборудования

$$У_1 = \frac{T_0}{T_2},$$

где T_0, T_2 – трудоемкость изделия-прототипа до реализации мероприятий по оптимизации технологических процессов и трудоемкость нового изделия после реализации мероприятий по оптимизации технологических процессов, включая внедрение нового оборудования (в нормочасах).

Использование предлагаемых показателей для технико-экономического обоснования целесообразности инвестиций в техническое

перевооружение на ранних стадиях проектирования позволит дополнить оценку коммерческой эффективности инвестиций оценкой экономической эффективности развития производства.

Также предлагается в рамках экономического анализа целесообразности инвестиций в техническое перевооружение использовать функционально-стоимостной анализ (ФСА), суть которого заключается в системном исследовании технологических процессов изготовления деталей или узлов двигателя, направленном на оптимизацию соотношения между значением показателя снижения трудоемкости за счет оптимизации технологических процессов (в том числе и за счет внедрения нового оборудования) и затратами на новое оборудование.

Использование ФСА на ранних стадиях проектирования позволяет предупреждать возникновение излишних затрат за счет исключения неэкономичных технических решений, обеспечивать уровень издержек на производство новых изделий, не превышающий установленного, сокращать или исключать экономически неоправданные затраты.

Основные этапы технико-экономического обоснования целесообразности инвестиций в техническое перевооружение предприятий авиадвигателестроительной отрасли приведены на рис. 1.

На первом этапе осуществляется формирование исходных данных для технико-экономической оценки целесообразности инвестиций в техническое перевооружение. Директивные показатели устанавливаются на основе анализа зарубежных и отечественных прототипов ГТД, а также результатов прогнозирования рынка ГТД, перспективных технологий, основных показателей изготовления ГТД. На ранних этапах проекта технико-экономические показатели рассчитывают на основе экономико-математических моделей, полученных по результатам обработки статистических материалов и позволяющих на основании исходных данных определить трудоемкость изготовления и технологической подготовки, а также построить график изменения технико-экономических параметров в ходе реализации проекта.

На втором этапе осуществляется разработка методики определения трудоемкости изготовления деталей нового двигателя. Оценить трудоемкость на стадиях разработки эскизного и технического проектов значительно сложнее из-за неопределенности технических и экономических показателей, но анализ трудоемкости

новых изделий именно на этих этапах представляет наибольший интерес.

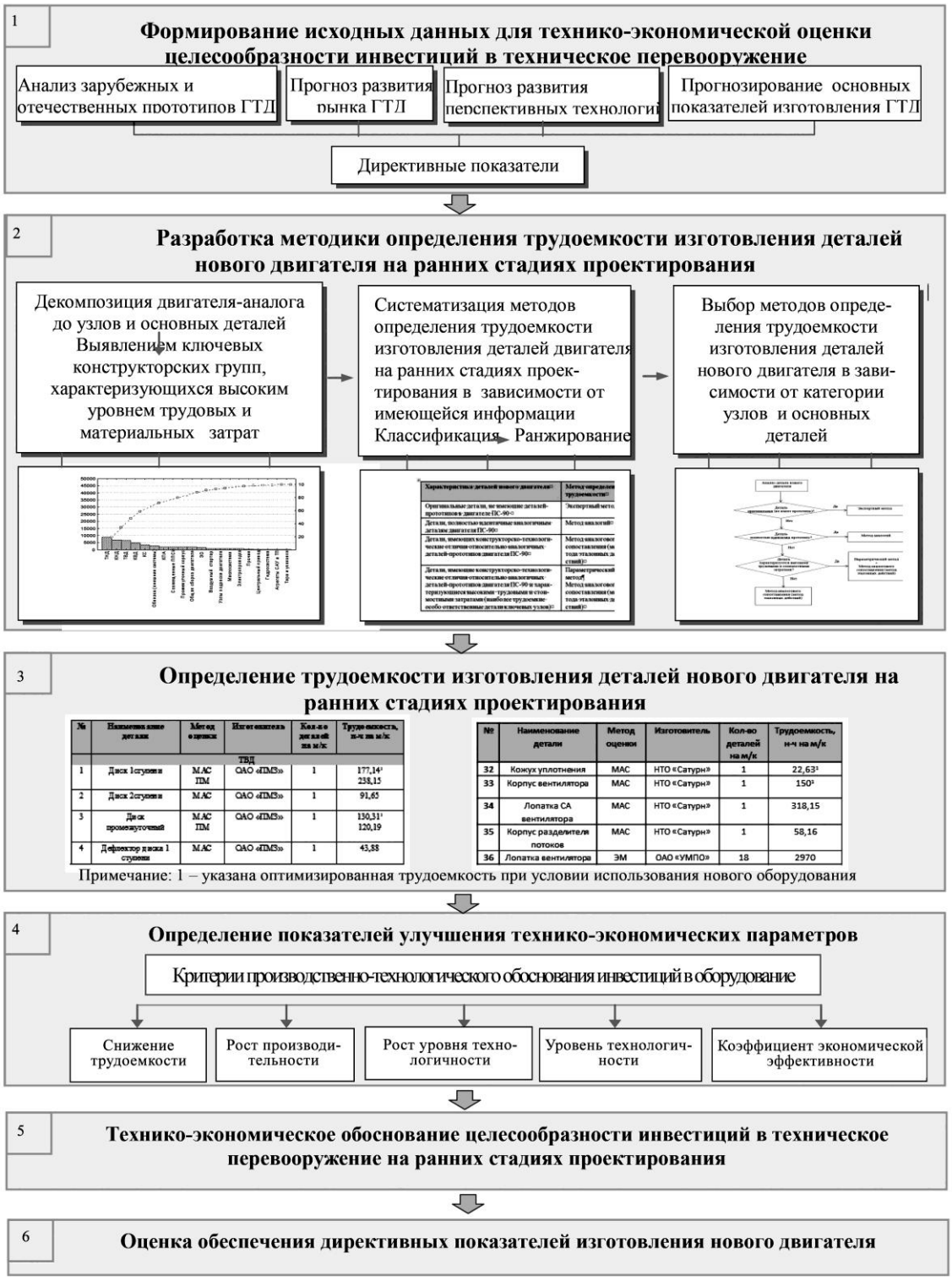


Рис.1. Основные этапы технико-экономического обоснования целесообразности инвестиций в техническое перевооружение

На сегодняшний день существуют различные подходы к определению трудоемкости изготовления деталей. Для укрупненной

оценки трудоемкости изготовления изделий на стадии технического проектирования в зависимости от информации о деталях-прототипах, предлагается использовать следующие методы:

– метод аналогий;
– метод аналогового сопоставления (метод эталонных действий);
– параметрический метод;
– экспертный метод.

Выбор метода или сочетания методов определения трудоемкости изготовления деталей нового двигателя базируется на следующих принципах:

– для оригинальных деталей нового двигателя, не имеющих прототипа, принимается экспертный метод определения трудоемкости;
– для деталей нового двигателя, полностью идентичных аналогичным деталям изделия аналога, принимается метод аналогий;
– для деталей нового двигателя, имеющих конструкторско-технологические отличия относительно аналогичных деталей изделия аналога, принимается метод аналогового сопоставления (метода эталонных действий);
– для деталей нового двигателя, имеющих конструкторско-технологические отличия относительно аналогичных деталей изделия аналога, а также характеризующихся высокими трудовыми и стоимостными затратами деталей изделия аналога, принимается совокупность параметрического метода и метода аналогового сопоставления (метода эталонных действий).

На третьем этапе осуществляется оценка трудоемкости изготовления деталей нового двигателя.

На основе рассчитанных значений на четвертом этапе определяются показатели улучшения технико-экономических параметров: уровень технологичности по видам трудоемкости; снижение трудоемкости за счет внедрения нового оборудования; рост уровня технологичности по трудоемкости после внедрения нового оборудования; рост производительности; коэффициент экономической эффективности.

Например, на основе значений трудоемкости деталей и сборочных единиц (ДСЕ) определяется уровень технологичности по трудоемкости по группам ДСЕ (рис.2).

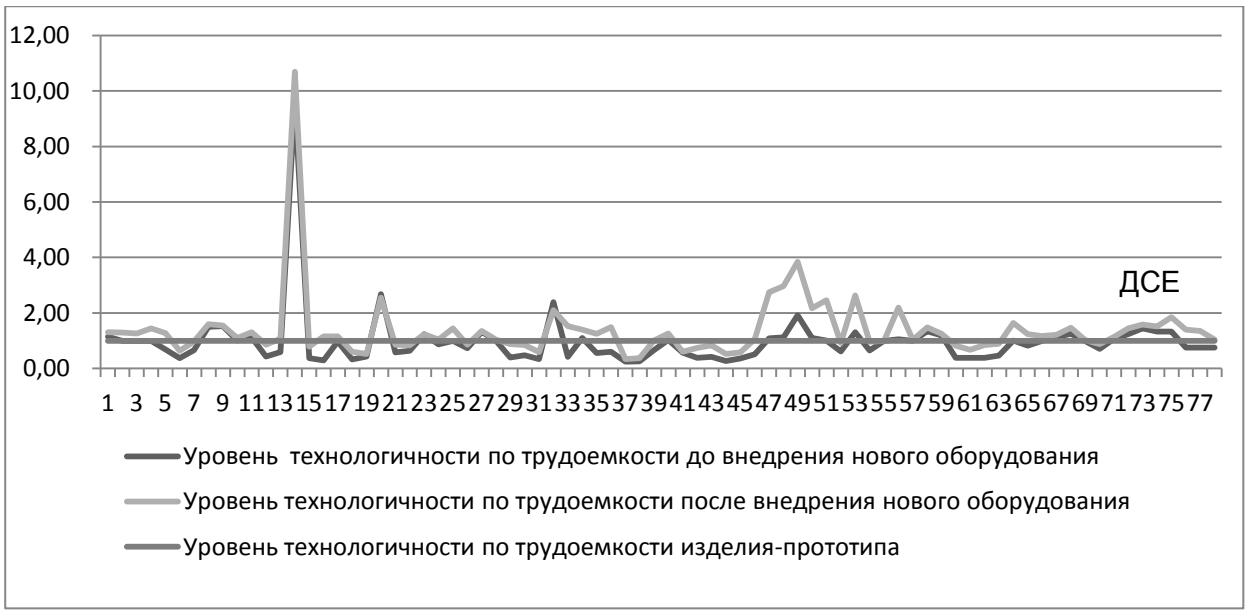


Рис.2. Уровень технологичности по видам трудоемкости

Из графика видно, что уровень технологичности по трудоемкости до внедрения оборудования ниже уровня технологичности после внедрения оборудования, что говорит о целесообразности технических решений по техническому перевооружению.

Рост уровня технологичности по трудоемкости после внедрения нового оборудования представлен на рис.3. Из графика видно, что есть ряд ДСЕ, для которых внедрение нового оборудования не позволило обеспечить рост уровня технологичности. Имеет смысл рассмотреть оптимизацию технологических процессов данных ДСЕ дополнительно, что является резервом обеспечения директивных показателей изготовления ГТД.

Интерес представляет проведение в рамках технико-экономического обоснования (пятый этап) функционально-стоимостного анализа соответствия величины инвестиций в оборудование по группам ДСЕ с величиной снижения трудоемкости по тем же группам ДСЕ (рис.4). Данный анализ позволяет выявить диспропорции между величиной инвестиций на оборудование и величиной снижения трудоемкости, достигаемой за счет внедрения данного оборудования. Например, для анализируемых групп ДСЕ на рис.4 наблюдается некоторая диспропорция по величине инвестиций в оборудование и достигаемого за счет этого оборудования снижения трудоемкости по ДСЕ статора ТВД, что говорит о недостаточной

эффективности технических решений изготовления данной группы ДСЕ по сравнению с другими анализируемыми группами.

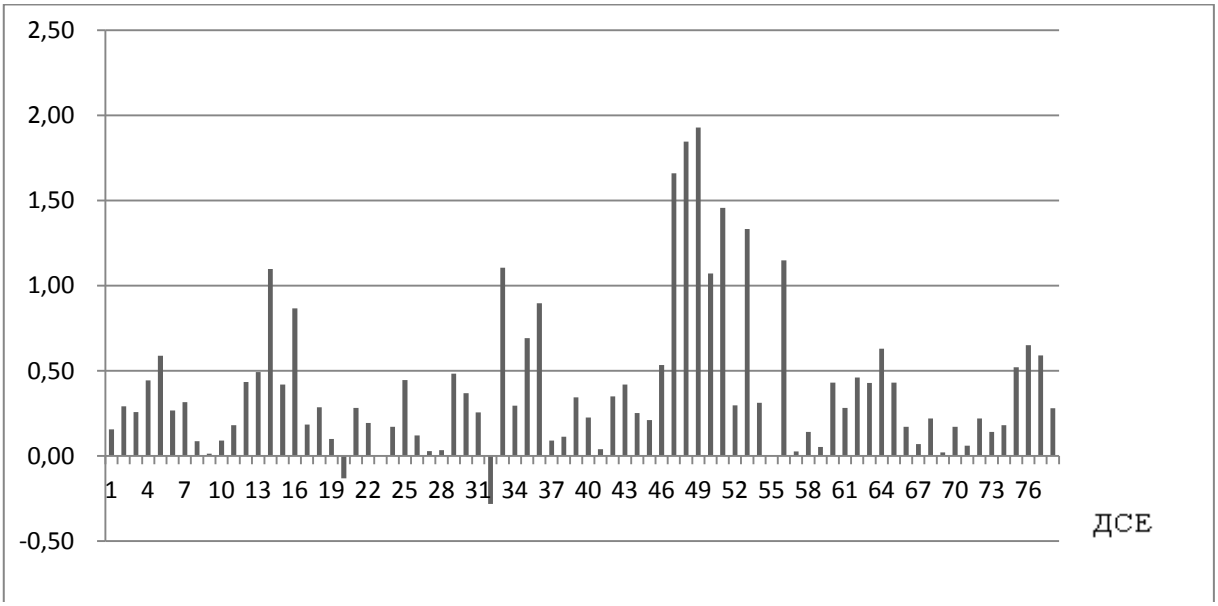


Рис.3. Рост уровня технологичности по трудоемкости после внедрения нового оборудования

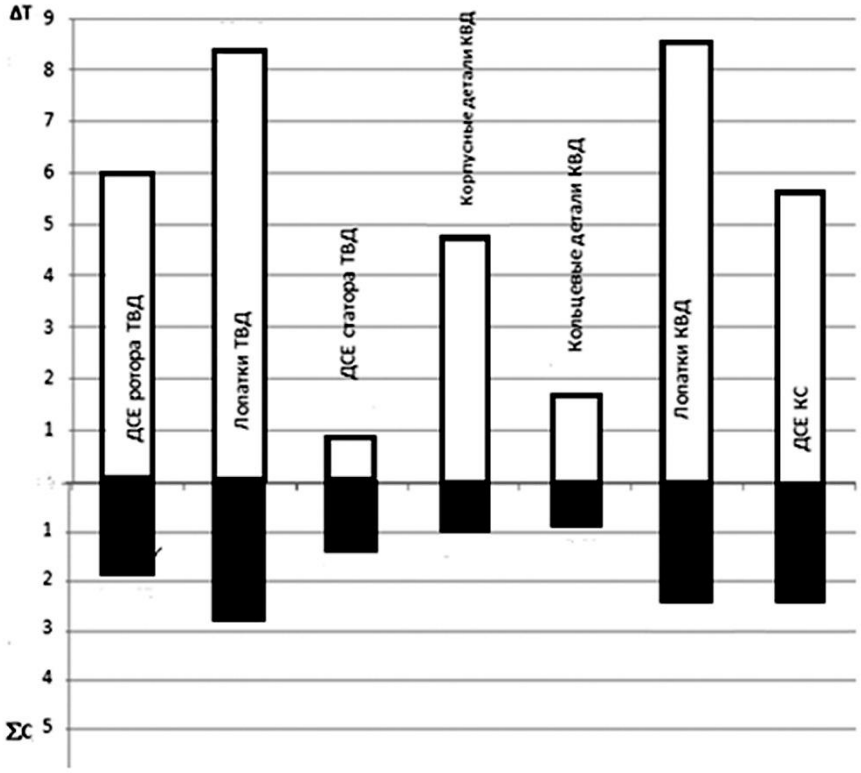


Рис.4. ФСА соответствия величины инвестиций в оборудование по группам ДСЕ с величиной снижения трудоемкости по тем же группам ДСЕ

Таким образом, связь между уровнем технологичности по трудоемкости и величиной инвестиций, обеспечивающих этот уровень, сложна и многовариантна, поэтому технико-экономическое обоснование инвестиций в техническое перевооружение на ранних этапах проектирования является актуальным, позволяет реализовать оптимизацию технических решений и повысить эффективность развития производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А. И., Мокроусова Е. И. Методические подходы к оценке конкурентоспособности авиационных двигателей. URL:http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35955
2. Мишин В.М. Исследование систем управления. М.:ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 527с.
3. Фатхутдинов Р.А. Управленческие решения. М.:ИНФРА-М, 2007. 344 с.

УДК 65.015.13:338.5

Н. А. Сухова (ОАО НИИТ)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ КАК ОСНОВА РАЗРАБОТКИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ПЕРЕВООРУЖЕНИЮ ПРОИЗВОДСТВА

Одним из наиболее перспективных направлений повышения конкурентоспособности промышленных предприятий, и как следствие этого, повышение эффективности общественного производства, является использование технического перевооружения и технологического переоснащения производства предприятий.

Поэтому в настоящее время особую актуальность приобретают вопросы, связанные с управлением техническим перевооружением и технологическим переоснащением производства предприятий.

Техническое перевооружение производства предприятий – это комплекс мероприятий, ориентированных на повышение технического уровня производства за счет внедрения более совершенной техники, технологии и организации работ в основном и вспомогательном производстве. Эффективность технического перевооружения зависит от системности и качества проведения технологического аудита на предприятии с учетом специфики выпускаемой продукции.

В настоящее время вопросы управления техническим перевооружением на основе использования технологического аудита и связанных с этим его особенностей еще недостаточно изучены. Эти проблемы рассматриваются обычно без необходимой взаимосвязи, без комплексного подхода, который может существенно облегчить и оптимизировать их решение. В связи с чем существует необходимость разработки механизмов и методов проведения технологического аудита.

Анализ категориального аппарата показал неоднозначность в толковании понятия «технологический аудит» в зависимости от освещения поставленных вопросов.

Во-первых, понятие ″технологический аудит″ рассматривается как инструмент коммерциализации научно-технических разработок. Во-вторых, технологический аудит рассматривается как метод оценки конкурентоспособности предприятия в сфере инноваций. В-третьих, технологический аудит рассматривается как глубокий анализ производства с целью поиска узких мест и разработки мероприятий по повышению эффективности производственной системы (рис.1). Такое многообразие толкования понятия ″технологический аудит″ предопределило многообразие показателей оценки и методик проведения технологического аудита.

Технологический аудит с целью оценки коммерциализации научно-технических разработок осуществляется в три этапа. Первый этап – это обзор тех технологий, которые используются на предприятии, и оценка его позиции в отношении применения этих технологий. Второй этап – это обзор технологий, применяемых на других предприятиях, в первую очередь, у конкурентов, и выявление технологических эталонов, т.е. наилучшей практически используемой технологии. Третьим этапом технологического аудита является

сопоставление используемых на предприятии технологий с выявленными технологическими эталонами с целью оценки их относительной эффективности, а значит перспективности.

Рис.1. Варианты трактовок понятия ″технологический аудит″

При проведении технологического аудита с целью оценки конкурентоспособности предприятия в сфере инноваций рассчитываются показатели финансирования и результативности НИОКР, технологического лидерства, эффективности инновационной деятельностью, показатели результативности корпоративной системы управления инновациями и эффективности взаимодействия с внешними источниками разработок и инноваций.

Основной задачей технологического аудита в рамках анализа производства для его технического перевооружения является оценка организационного, технического и экономического уровня работоспособности производственной системы и разработка подробной программы мер для перехода на более качественный этап развития предприятия [1].

Понимание технологического аудита как ряда процедур, представляющих собой глубокий анализ производства с целью разработки мероприятий по техническому перевооружению и нацеленных на повышение технико-экономических показателей

действующего предприятия, является на сегодняшний день более востребованным и важным для повышения эффективности производства [2].

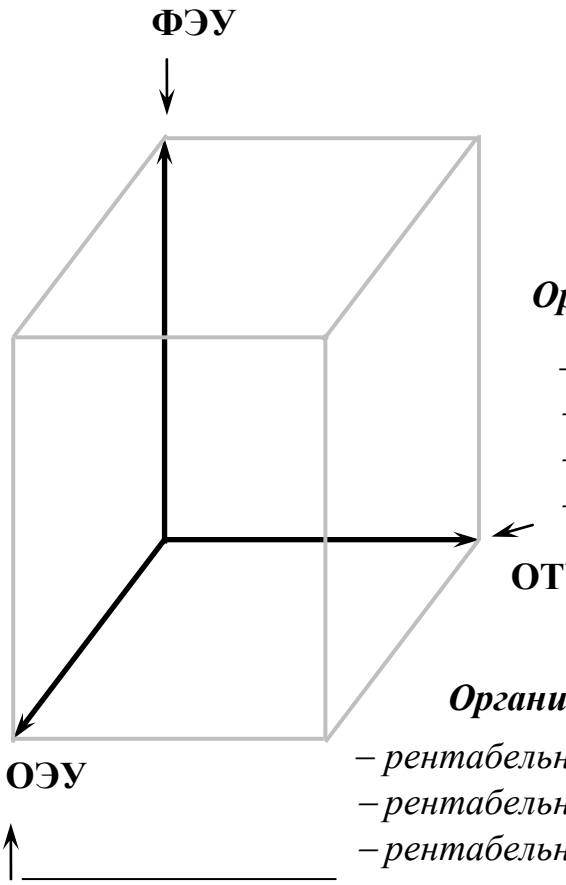
Разработка мероприятий по техническому перевооружению и технологическому переоснащению производства предприятий должна базироваться на анализе сложившихся тенденций, учете имеющихся технико-технологических возможностей, повышении эффективности использования всех имеющихся ресурсов.

С этой целью может быть использована методика оценка уровня конкурентоспособности промышленной организации на основе многофакторной модели [3]. Согласно данной методике основой проведения анализа выступает принцип разделения и последующей обработки множества известных аналитических показателей на оценочные составляющие состояния: организационно-экономическая, организационно-техническая и финансово-экономическая (рис.2).

Алгоритм оценки включает в себя три этапа:
1.Расчет качественных разнонаправленных показателей (стимуляторов и дестимуляторов), сгруппированных по составляющим состояния организации. Основой классификации показателей на стимуляторы (С) и дестимуляторы (Д) является их направленность.
2. Расчет обобщающих интегральных показателей, характеризующих достигнутый уровень развития организации по каждой из составляющих. Для получения интегральных оценок исходные величины каждого из показателей приводятся к сопоставимому виду, пригодному для сравнения, с использованием метода балльных оценок.
3. Построение трехмерных моделей оценки уровня конкуренто-способности организации в виде кубов. По осям расположены поля следующих значений: X–интегральные значения ОЭУ; Y–интегральные значения ОТУ; Z – интегральные значения ФЭУ. Внешний куб – то состояние, к которому организация должна стремиться.

Финансово-экономический уровень (ФЭУ)

– *коэффициент соотношения оборотных и внеоборотных активов*
– *коэффициент соотношения заемных и собственных средств*
– *коэффициент обеспечения оборотных средств*
– *коэффициент маневренности*
– *коэффициент абсолютной ликвидности*
– *коэффициент текущей ликвидности*
– *рамбурсная способность*



Организационно-технический уровень (ОТУ)

– *фондоотдача*
– *фондовооруженность*
– *оборачиваемость оборотных средств*
– *материалоотдача продукции*

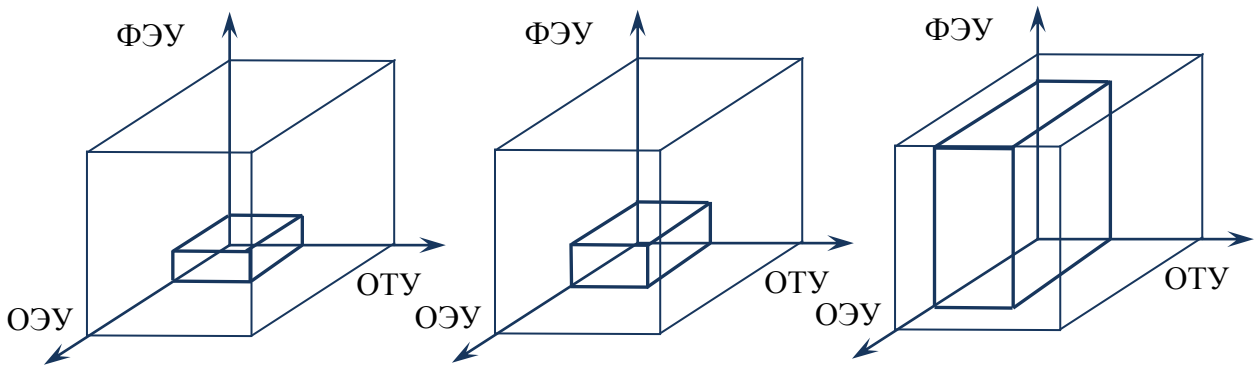
Организационно-экономический уровень (ОЭУ)

– *рентабельность продукции*
– *рентабельность продаж*
– *рентабельность предприятия*
– *затраты на 1 руб. продукции*
– *уровень зарплатоемкости продукции*
– *уровень амортизациоемкости продукции*
– *среднегодовая зарплата одного работника*
– *производительность труда*

Рис.2. Многофакторная модель оценки уровня конкурентоспособности

Параллелепипед внутри поля нормативного значения показывает реальное состояние конкурентоспособности предприятия в конкретный момент времени.

Например, трехмерная модель уровня конкурентоспособности ОАО «УМПО» за 2009-2011гг. по данной методике представлена на рис.3 [4].



а) 2009 год б) 2010 год в) 2011год

Рис.3. Трехмерная модель оценки конкурентоспособности ОАО УМПО в интегральных показателях за 2009-2011гг.

Стабильный рост за 2009-2011гг. по показателям ОЭУ и ФЭУ на фоне снижения ОТУ данного предприятия говорит о проблемах на предприятии с технической оснащенностью и эффективностью использования основных средств.

С целью поиска резервов и возможностей повышения организационно-технического уровня данного предприятия необходимо проведение более глубокого технологического аудита.

Опубликованные на сегодняшний день работы по технологическому аудиту не дают системной методики, позволяющей осуществить глубокий анализ производства для его технического перевооружения, так как в литературе отсутствуют данные по методике проведения технологического аудита.

В ОАО НИИТ была разработана методика проведения технологического аудита, согласно которой организационно-технический уровень производства (ОТУП) измеряется системой частных (аналитических) показателей.

Все показатели распределены по 5 группам, характеризующим конкретную сторону обеспечения функционирования производства.

ОТУП оценивается комплексом частных (аналитических) показателей по направлениям:

– показатели технического уровня и качества продукции;

– показатели технического уровня производства;
– показатели уровня организации труда;
– показатели уровня организации производства;
– показатели уровня организации управления.

Показатели технического уровня и качества продукции сводятся к двум группам:
– показатели технического уровня и качества отдельных изделий;
– показатели технического уровня и качества продукции.

Обобщающий интегральный показатель технического уровня и качества продукции $К_{т.у.п}$ определяется по формуле

$$К_{т.у.п} = n\sqrt{К_{1т.у.п}К_{2т.у.п}...К_{nт.у.п}},$$

где n – число показателей, по которым оценивается технический уровень и качество продукции;

$К_{1т.у.п,}$ $К_{2т.у.п,}...К_{nт.у.п}$ – показатели технического уровня и качества продукции.

Показатели технического уровня производства сводятся к четырем группам:
– показатели технического уровня оборудования;
– показатели технического уровня технологии;
– показатели прогрессивности технологической оснастки;
– показатели технической оснащенности производства.

Обобщающий интегральный показатель технического уровня производства $К_{т.у.пр}$ определяется по формуле

$$К_{т.у.пр} = n\sqrt{К_{1т.у.пр}К_{2т.у.пр}...К_{nт.у.пр}},$$

где n – число показателей, по которым оценивается технический уровень производства;

$К_{1т.у.пр,}$ $К_{2т.у.пр,}...К_{nт.у.пр}$ – показатели технического уровня производства.

Для оценки *уровня организации производства* используются следующие показатели:
– уровень специализации производства;
– уровень кооперирования производства;
– коэффициент закрепления операций;
– коэффициент ритмичности выпуска продукции;
– коэффициент сменности работы оборудования.

Обобщающий интегральный показатель уровня организации производства $К_{о.п}$ определяется по формуле

$$К_{о.п} = n\sqrt{К_{1о.п}К_{2о.п}...К_{nо.п}},$$

где n – число показателей, по которым оценивается уровень организации производства;

$К_{1о.п,}$ $К_{2о.п,}...К_{nо.п}$ – показатели уровня организации производства.

Для оценки *уровня организации труда* используются следующие показатели:

– удельный вес рабочих, занятых многостаночным обслуживанием;
– удельный вес работающих, совмещающих профессии;
– удельный вес промышленно-производственных рабочих, работающих по технически обоснованных нормам, %;
– уровень нормирования труда;
– коэффициент использования рабочих по квалификации и др.

Обобщающий интегральный показатель уровня организации труда $К_{о.т}$ определяется по формуле

$$К_{о.т} = n\sqrt{К_{1о.т}К_{2о.т}...К_{nо.т}},$$

где n – число показателей, по которым оценивается уровень организации труда;

$К_{1о.т,}$ $К_{2о.т,}...К_{nо.т}$ – показатели уровня организации труда.

Для оценки *уровня организации управления* применяется система показателей, характеризующих:

– анализ организационной структуры управления;
– техническую оснащенность инженерного и управленческого труда;
– анализ состава и организации труда работников управления.

Обобщающий интегральный показатель уровня организации управления $К_{оу}$ определяется по формуле

$$К_{о.у} = n\sqrt{К_{1о.у}К_{2о.у}...К_{nо.у}},$$

где n – число коэффициентов, по которым оценивается уровень организации управления;

$К_{1о.п,}$ $К_{2о.п,}...К_{nо.п}$ – показатели уровня организации управления.

На основании полученных значений обобщающих интегральных показателей строится профиль (графическое представление в виде радарной диаграммы) организационно-технического уровня как по

обобщающим интегральным показателям, так и по частным показателям, характеризующих соответствующее направление оценки.

Анализ полученных значений показателей по направлениям оценки позволит оценить организационно-технический уровень производства и выявить резервы и возможности его повышения.

Таким образом, разработанная методика отличается фокусировкой внимания на усилении сильных сторон предприятия, нацеленностью на положительный результат и возможностью решения нескольких задач одновременно, позволяет вскрыть внутренние резервы предприятия, а также подготовить предложения в проект технологического перевооружения предприятия с целью поддержания конкурентоспособности предприятия и его развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухова Н.А., Семенов А.С., Кадырова Ж.М. Управление техническим перевооружением предприятия на основе технологического аудита // Наука – производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып.7. Уфа: Издательство «Вагант», 2012. С. 85-92.

2. Сухова Н.А., Константинова Ю.В. Совершенствование технологического аудита для активизации инновационной деятельности предприятий // Проблемы машиноведения, процессов управления и инновационные технологии в промышленности в Республике Башкортостан: сборник научных трудов. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 10-15.

3. Фролов И.В., Тепикина Е.И. Рыночная оценка уровня конкурентоспособности промышленной организации на основе многофакторной модели // Экономический анализ: теория и практика: научно-практический и аналитический журнал. М.: ООО «Финанспресс», 2008, №20. С. 27-33.

4. Анализ технологичности и ремонтопригодности двигателя ПД-14, технологический аудит и выявление проблем предприятий-изготовителей в части обеспечения технологичности, разработка заключения о технологичности и ремонтопригодности на этапе технического проекта // Научно-технический отчет № 2-2336-8430. Уфа: ОАО НИИТ, 2012. 155с.

УДК 621.452.3.034

И.С. Ковалев (ОАО НИИТ)

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГТД НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Одной из важнейших характеристик, определяющих экономическую эффективность применения двигателя, является ремонтопригодность.

Обеспечение ремонтопригодности изделия имеет целью снижение затрат времени, труда и средств на их техническое обслуживание (ТО) и ремонт и повышение, на этой основе, эффективности их использования в процессе эксплуатации.

С целью обеспечения ремонтопригодности предлагается проводить комплексную оценку ремонтопригодности и ремонтной технологичности авиационных ГТД на ранних стадиях проектирования.

В качестве основных показателей для оценки ремонтопригодности ГОСТ21623-76 рекомендует объединенные показатели, такие как объединенная удельная оперативная продолжительность ТО и ремонтов, объединенная удельная оперативная трудоемкость ТО и ремонтов и объединенная удельная оперативная стоимость ТО и ремонтов. Однако при проектировании новых сложных изделий, в частности ГТД, в силу отсутствия необходимой информации, не всегда есть возможность определить все показатели ремонтопригодности, поэтому предлагается проводить оценку уровня ремонтопригодности по наиболее значимым показателям ремонтопригодности анализируемого изделия. Данный анализ позволит выявить «узкие» места. Оценку уровня можно проводить по изделию в целом, а также по составляющим узлам и сборочным единицам по формуле

$$\text{Оц}_{\text{УРП}} = \frac{\text{П}_\text{А}}{\text{П}_\text{И}},$$

где $П_А$, $П_И$ – показатели ремонтопригодности, соответственно, изделия-аналога и вновь разрабатываемого изделия.

В качестве показателей ремонтопригодности могут использоваться показатели для оценки приспособленности объекта к техническому обслуживанию, показатели для оценки приспособленности объекта к капитальному ремонту и объединенные показатели для оценки ремонтопригодности объекта.

Возможны варианты, когда вновь разрабатываемое изделие будет иметь уровень ремонтопригодности ниже, чем у изделия-аналога. В этом случае необходимо более детальное изучение конструкции с целью обнаружения «узких» мест для их возможного устранения.

Повышение уровня ремонтопригодности нового двигателя может быть обусловлено повышением модульности конструкции, что снижает трудоемкость сборочно-разборочных работ в процессе ТО и ремонта, а также повышенной надежности деталей и сборочных единиц (ДСЕ) в связи с использованием более износостойких материалов и покрытий. Высокий коэффициент уровня характерен для изделий нового поколения.

Таким образом, оценка уровня ремонтопригодности по основным показателям позволяет более просто и быстро провести анализ ремонтопригодности вновь разрабатываемого изделия на ранних стадиях его проектирования.

Согласно ГОСТ21623-76 основными показателями технологичности изделия при ТО и ремонте являются:

– коэффициент доступности ($К_Д$);
– коэффициент легкосъемности ($К_{ЛС}$);
– коэффициент взаимозаменяемости ($К_{ВЗ}$);
– коэффициент унификации ($К_{УД}$);
– коэффициент стандартизации ($К_{СТ.Д}$).

Расчет и анализ данных показателей позволяет своевременно выявить «узкие» места и направления для дальнейшего совершенствования конструкции.

Проводя анализ показателей технологичности ТО и ремонта разрабатываемого изделия, можно наглядно определить недостатки конструкции с целью их дальнейшего исправления для снижения трудоемкости и стоимости проведения ТО и ремонта при

эксплуатации изделия. Так, анализируя значения показателей технологичности при ТО и ремонте примера (рис.1), можно сделать следующие выводы:

– пониженные значения коэффициентов унификации и стандартизации характерны при переходе с одного освоенного поколения изделия на другое;

– повышенное значение коэффициента легкосъемности характерно для конструкции изделий, имеющих достаточную модульность.

Одной из важнейшей характеристик качества изделия согласно ГОСТ14.205-83 является ремонтная технологичность, которая как свойство изделия формируется главным образом при конструировании и производстве, а проявляется при ремонте. Поэтому обеспечение высокого уровня ремонтной технологичности должно осуществляться, начиная с ранних стадий проектирования.

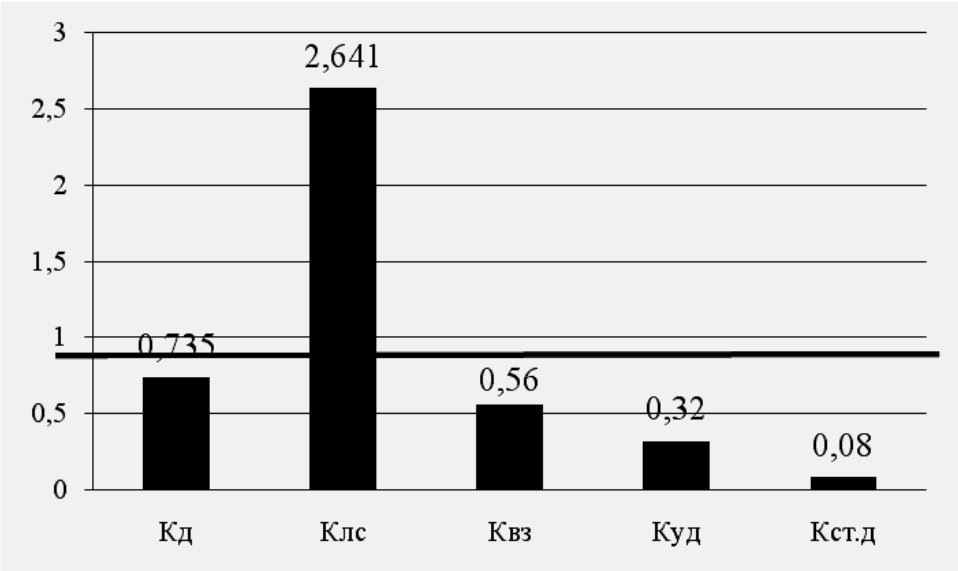


Рис. 1. Диаграмма показателей технологичности нового двигателя при ТО и ремонте

Существующие оценки ремонтной технологичности по отдельным показателям и произвольно выбранным качественным характеристикам не позволяют объективно определить ее уровень и пути оптимизации. В связи с этим разработана методика комплексной оценки ремонтной технологичности деталей ГТД по определяющим количественным показателям и качественным характеристикам. Основным требованием ремонтной технологичности является

минимизация затрат на ремонт. Это учитывается посредством количественной и качественной оценок.

Согласно разработанной методике анализ ремонтной технологичности рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1. Выявление наиболее значимых ДСЕ с точки зрения обеспечения ремонтной технологичности изделия.
2. Разработка методики комплексной оценки уровня ремонтной технологичности.
3. Определение частных показателей оценки.
4. Комплексная оценка.
5. Определение «узких» мест с целью их дальнейшего устранения.

При анализе ремонтной технологичности вновь разрабатываемых сложных изделий, в частности ГТД, в силу большой номенклатуры ДСЕ, имеет смысл выявления наиболее дорогостоящих и часто ремонтируемых/заменяемых ДСЕ. Выборку можно проводить всеми известными способами, однако, рекомендуется ее выполнение по иерархическому принципу (узлы и агрегаты – сборочные единицы – детали).

Например, в случае, когда наиболее дорогостоящими в ремонте/замене ДСЕ узлами нового двигателя являются узлы КВД и ТВД, которые в большинстве своем имеют наиболее изнашиваемые детали вследствие высоких температур при работе газогенератора ГТД, для определения ДСЕ, являющихся значимыми по параметрам себестоимости ремонта/замены и количества ремонтируемых деталей, применим матричный анализ всех ДСЕ (рис.2), входящих в эти узлы.

Для определения групп ДСЕ найдем пороговое (минимальное) значение критериев (себестоимости ремонта/замены и количества восстанавливаемых (ремонтируемых) деталей), определяющее перечень деталей, показатели которых не ниже заданного уровня. Отнесение всех ДСЕ к одному из четырех квадрантов помогает определить набор наиболее дорогостоящих и восстанавливаемых деталей с целью дальнейшей оценки ремонтной технологичности.

Анализируя матрицу (рис.2), можно сделать вывод о том, что наиболее значимыми для оценки ремонта/замены по себестоимости и количеству восстанавливаемых ДСЕ являются детали, находящиеся в III квадранте.

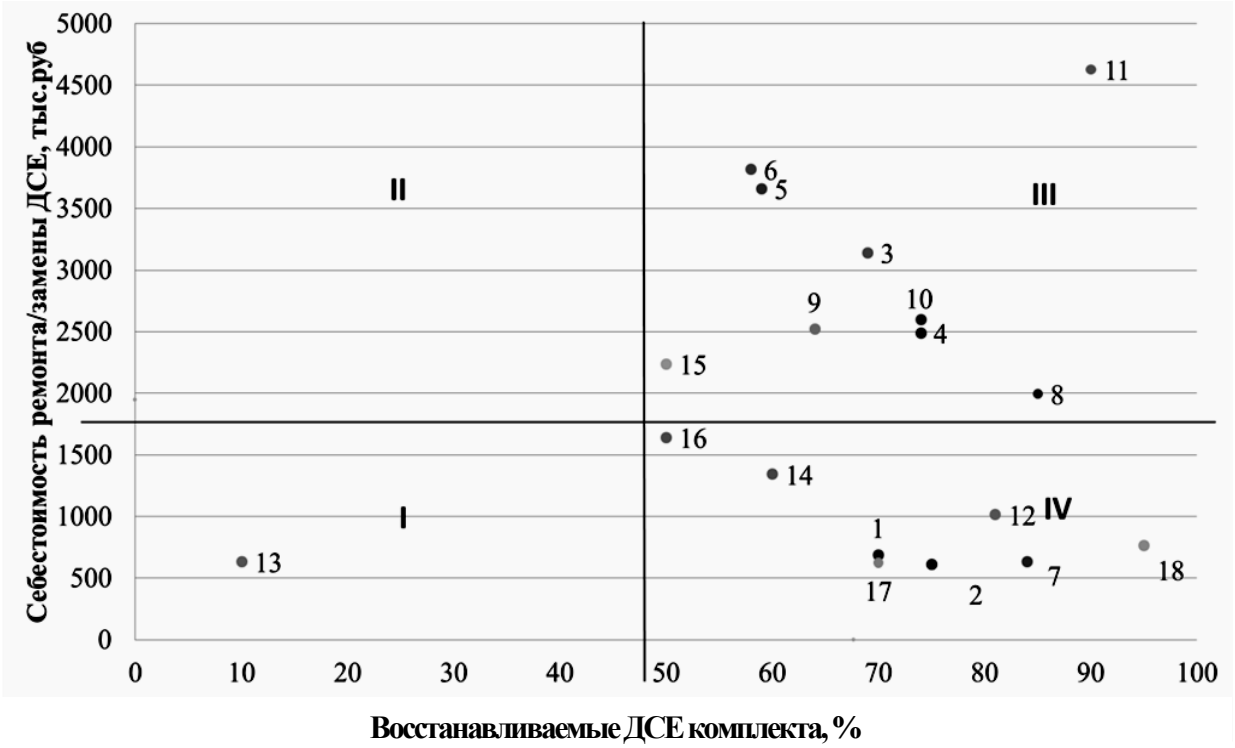


Рис. 2. Матричный анализ наиболее дорогостоящих ДСЕ узлов КВД и ТВД нового двигателя по себестоимости ремонта/замены и количеству восстанавливаемых деталей: *1-лопатка рабочая 3 ст. КВД; 2-лопатка рабочая 4 ст. КВД; 3-лопатка рабочая 5 ст. КВД; 4-лопатка рабочая 6 ст. КВД; 5-лопатка рабочая 7 ст. КВД; 6-лопатка рабочая 8 ст. КВД; 7-лопатка НА 3 ст. КВД; 8-лопатка НА 5 ст. КВД; 9-лопатка НА 6 ст. КВД; 10-лопатка НА 7 ст. КВД; 11-лопатка СА. КВД; 12-корпус 1,2,3 ст. КВД; 13-корпус отборов задний КВД; 14-лопатка СА 1 ступени ТВД; 15-лопатка рабочая 1 ступени ТВД; 16-лопатка рабочая 2 ступени ТВД; 17-лопатка СА 2 ступени ТВД; 18-фланец лабиринта верхнего ТВД*

Основным требованием ремонтной технологичности является минимизация затрат на ремонт. Это учитывается посредством количественной оценки. Кроме того, имеются две качественные оценки: восстанавливаемость (учитывает приспособленность детали к обнаружению, предупреждению и устранению повреждений, возникающих под воздействием конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов) и выполнение общих требований, прямо не связанных с повреждаемостью и затратами. Каждая из этих оценок включает ряд дифференциальных количественных показателей или качественных признаков. Все оценки свертываются по аддитивной схеме в единую комплексную оценку,

характеризующую общий уровень ремонтной технологичности детали.

На начальной стадии комплексной оценки осуществляется анализ повреждаемости и восстанавливаемости. Анализ повреждаемости определяет повреждающие факторы: повреждаемые элементы детали (носителя типовых и специфических повреждений); ожидаемые значения характеристик повреждаемости, в качестве которых используется частота повреждений ω (доля повреждаемых деталей в процентах от полного комплекта деталей). Анализ восстанавливаемости выявляет возможность и эффективность обнаружения и устранения повреждений существующими методами контроля; используемые в конструкции методы предупреждений; ожидаемые трудозатраты на восстановление детали. Анализ повреждаемости и восстанавливаемости выполняется на базе проектных и статистических данных по ремонту аналогичных изделий, в особенности ближайшего прототипа. На рис. 3 приведена общая схема комплексной оценки ремонтной технологичности деталей ГТД [1].

Для количественной оценки предлагается применять два основных показателя. Первый характеризует затраты труда на восстановительные детали ($С_К$) и выражается себестоимостью ремонта/замены комплекта ДСЕ. Второй показатель характеризует расходы на запасные детали ($С_З$) с учетом повреждаемости (процента отбраковки) и вычисляется по формуле

$$C_З = \frac{\omega \cdot C}{100},$$

где С – себестоимость комплекта ДСЕ, тыс.руб;

ω – процент отбраковки ДСЕ, %.

Дифференциальные количественные оценки затрат труда ($O_{Ц_{РЕМ}}$) и расходов на запасные части ($O_{Ц_{Сз}}$) определяются по формулам:

$$O_{Ц_{РЕМ}} = \frac{C_{К_А} - C_{З_А}}{C_{К_Н} - C_{З_Н}},$$

где $С_{К_А}$ и $С_{К_Н}$ – себестоимость ремонта/замены комплекта ДСЕ двигателя аналога (прототипа) и нового двигателя соответственно, тыс.руб.;

$С_{З_А}$ и $С_{З_Н}$ – расходы на запасные части двигателя аналога (прототипа) и нового двигателя соответственно, тыс.руб.

$$О_{Ц_{Сз}} = \frac{С_{З_А}}{С_{З_Н}}.$$

Суммарная оценка по затратам ($О_{Ц_{ЗАТ}}$) проводиться по формуле [1]

$$О_{Ц_{ЗАТ}} = \alpha_h \cdot О_{Ц_{РЕМ}} + \alpha_C \cdot О_{Ц_{Сз}},$$

где α_h и α_C – коэффициент значимости, α_h=0,35, α_C=0,65 [1].

Оценка восстанавливаемости осуществляется на основании анализа приспособленности детали к восстановлению по матрице дихотомных признаков. Значение дифференциальной оценки по одному качественному признаку находят [1]

$$О_{Ц_i}(x_i) = \begin{cases} 1 - \text{если признак есть,} \\ 0 - \text{если признак отсутствует.} \end{cases}$$

Значение оценки по перечню признаков определяется по формуле [1]

$$О_Ц = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i О_{Ц_i}(x_i),$$

где α_i – коэффициенты значимости i-го признака в оценке свойств;
n – число качественных признаков.

Комплексная оценка включает несколько свойств более низкого порядка, где x_i и α_i характеризуют i-е свойство и его коэффициент значимости в оценке свойства более высокого порядка. Оценка восстанавливаемости также представляет собой комплекс оценок и определяется по формуле [1]

$$О_{Ц_{ВСТ}} = \alpha_{КОН} \cdot О_{Ц_{КОН}} + \alpha_{ПРД} \cdot О_{Ц_{ПРД}} + \alpha_{УСТ} \cdot О_{Ц_{УСТ}},$$

где $О_{Ц_{КОН}}$, $О_{Ц_{ПРД}}$, $О_{Ц_{УСТ}}$ – значения оценок приспособленности к контролю, уровня предупреждения повреждаемости, уровня приспособленности к устранению повреждений;
$\alpha_{КОН}$, $\alpha_{ПРД}$, $\alpha_{УСТ}$ – коэффициенты значимости соответствующих оценок, $\alpha_{КОН}$=0,33, $\alpha_{ПРД}$=0,33, $\alpha_{УСТ}$= 0,33 [1].

Комплексная оценка ремонтной технологичности ДСЕ определяется по формуле [1]

$$О_{Ц_{ДЕТ}} = \alpha_{ЗАТ} \cdot О_{Ц_{ЗАТ}} + \alpha_{ВСТ} \cdot О_{Ц_{ВСТ}} + \alpha_{ТР} \cdot О_{Ц_{ТР}},$$

где $\alpha_{ЗАТ}$, $\alpha_{ВСТ}$, $\alpha_{ТР}$ – коэффициенты значимости соответствующих оценок, $\alpha_{ЗАТ}$=0,40, $\alpha_{ВСТ}$=0,35, $\alpha_{ТР}$= 0,25 [1].

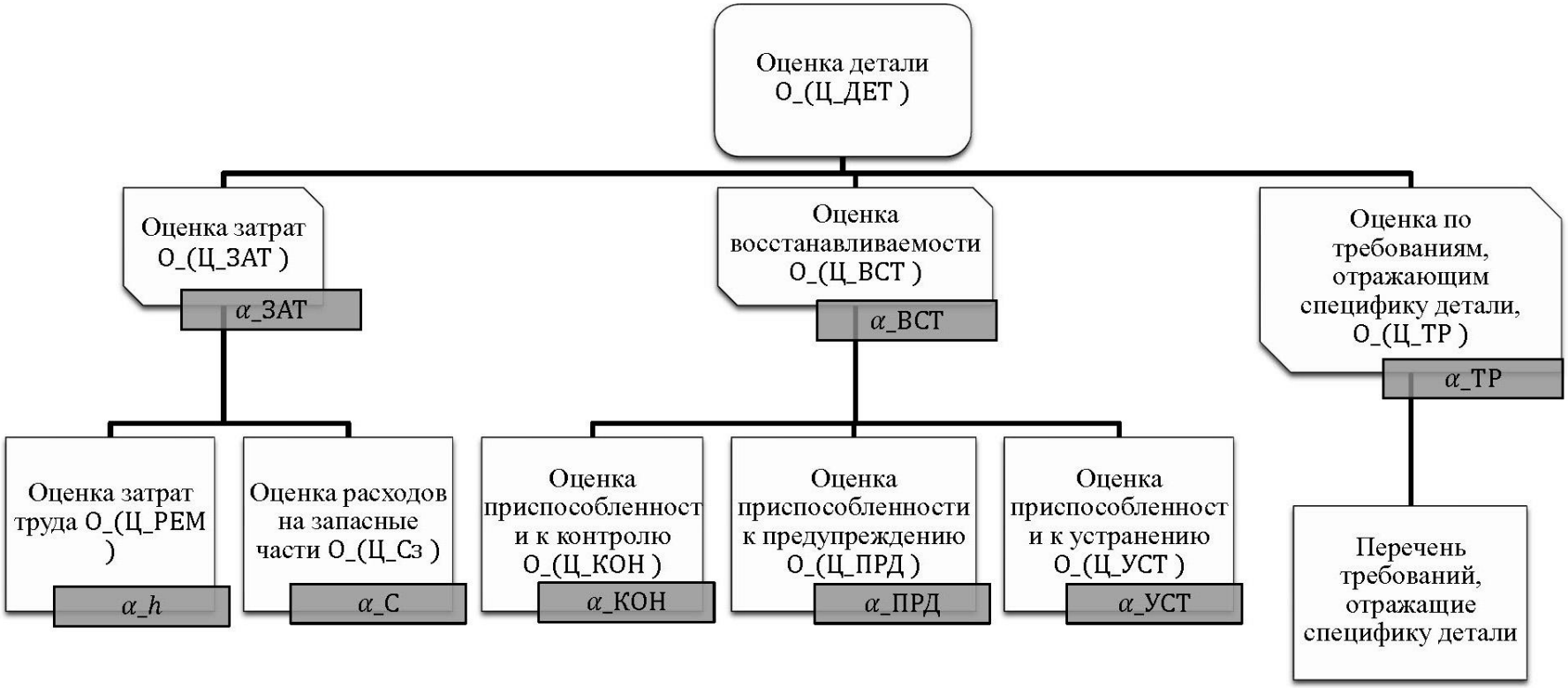


Рис. 3. Схема комплексной оценки ремонтной технологичности детали ГТД [1]

Выбор номенклатуры количественных и качественных показателей осуществляется в зависимости от самого изделия и его составляющих ДСЕ.

Далее проводится анализ комплексных оценок ДСЕ с оценками изделия-аналога, который позволяет выявить «отставание» по уровню с целью дальнейшего проведения мероприятий по улучшению показателей ремонтной технологичности ДСЕ. Для наглядности представления сравнительного анализа комплексных оценок предлагается использование лепестковых диаграмм.

Оценка уровня ремонтной технологичности ДСЕ нового изделия проводиться по формуле

$$У_{О_Ц} = \frac{О^{Н}_{Ц_{ДЕТ}}}{О^{А}_{Ц_{ДЕТ}}},$$

где $О^{Н}_{Ц_{ДЕТ}}$ и $О^{А}_{Ц_{ДЕТ}}$ – оценка ремонтной технологичности ДСЕ нового изделия и изделия-аналога соответственно.

Суммарная (итоговая) оценка уровня ремонтной технологичности отобранных основных ДСЕ нового двигателя определяется по формуле

$$\sum У_{О_Ц} = \frac{\sum_{i=1}^{n} О^{Н}_{Ц_{ДЕТ}i}}{\sum_{j=1}^{m} О^{А}_{Ц_{ДЕТ}j}},$$

где $О^{Н}_{Ц_{ДЕТ}i}$ и $О^{А}_{Ц_{ДЕТ}j}$ – комплексная оценка i-й детали нового изделия и j-й детали изделия-аналога соответственно;

n и m – количество оцениваемых деталей нового изделия и изделия-аналога соответственно.

Итоговая оценка уровня ремонтной технологичности отобранных основных ДСЕ указывает на уменьшение или увеличение уровня ремонтной технологичности нового изделия и позволяет сформулировать оценочные суждения о целесообразности использования в изделии новых материалов и сложности конструкции, которые приводят, прежде всего, к увеличению себестоимости изготовления, а также к усложнению и удорожанию ремонтно-восстановительных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Авдеев В.Ф., Пучков И.А., Петров Г.Д. Комплексная оценка ремонтной технологичности деталей ГТД на стадии проектирования // Авиационная промышленность. 1988. №3. С.26 – 28.

УДК 338.5

С. В. Старочкина, Н. А.Сухова (ОАО НИИТ), Н. Н. Камалова (УГАТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ДЕТАЛЕЙ (УЗЛОВ) НОВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Развитие современной мировой экономики характеризуется усилением конкуренции на мировых рынках и ставит перед авиационной промышленностью в качестве основной задачи достижение конкурентоспособности не только в области цены продажи изделий, которая в настоящее время подвергается влиянию компенсационных соглашений и господдержке, но и в области реальных затрат при производстве каждого компонента и узла, естественно, с соблюдением всех очень строгих требований к качеству в этом секторе промышленности.

В отечественном авиационном двигателестроении в настоящее время происходят серьезные структурные изменения, что вызвано требованиями рыночной ситуации. Основная проблема, с которой сталкиваются авиадвигателестроительные предприятия – низкая эффективность производства [1]. Для обеспечения конкурентоспособности производимой предприятиями продукции необходимы точная оценка и снижение себестоимости продукции при достижении необходимых потребительских качеств.

Основными составляющими себестоимости, как известно, являются затраты на материальные и трудовые ресурсы. И если

оценка затрат на материалы обычно не вызывает особых проблем, то при оценке трудоемкости изготовления изделий авиадвигателестроительные предприятия испытывают серьезные трудности.

Исследование существующих методов определения прогнозируемой трудоемкости деталей, узлов и изделий показало, что используемые в настоящее время методы нормирования не позволяют с необходимой точностью прогнозировать трудоемкость изготовления изделий при отсутствии разработанного технологического процесса их изготовления.

Таким образом, существует вполне определенная потребность в разработке методики определения трудоемкости деталей, узлов на стадии проектирования нового двигателя.

В ОАО «Институт технологии и организации производства» была разработана методика определения трудоемкости деталей и узлов на стадии проектирования нового двигателя.

Основная цель разработанной методики – определение трудоемкости серийного производства основных деталей и узлов нового двигателя при условии обеспечения конкурентоспособной трудоемкости изготовления нового двигателя.

Предлагаемый подход включает в себя два этапа:

1. Определение трудоемкости серийного производства основных деталей и узлов нового двигателя при условии обеспечения конкурентоспособной трудоемкости изготовления нового двигателя.
2. Определение необходимого процента снижения (допускаемого процента повышения) трудоемкости деталей узлов, обеспечивающего конкурентоспособную трудоемкость нового двигателя.

Разработанная методика базируется на определении приведенной трудоемкости изготовления деталей (узлов) нового двигателя. Под приведенной трудоемкостью понимается трудоемкость изготовления новой детали нового двигателя на том же предприятии, что и двигатель-аналог, с тем же организационно-техническим уровнем производства и с использованием технологий данного предприятия. Определение приведенной трудоемкости деталей (узлов) нового двигателя основывается на статистической информации о фактической трудоемкости изготовления деталей-

прототипов двигателя-аналога с учетом корректирующих коэффициентов.

Приведенная трудоемкость $T_{пр}$ определяется по формуле

$$T_{пр} = (T_{ф\ мех} \cdot K_{об} \cdot K_{т.сл} + T_{ф.\ ост}) \cdot [1 - V_{изм}\ (1 - K_{к.сл})] \cdot K_{м},$$

где $T_{ф\ мех}$ – фактическая трудоемкость механической обработки резанием детали-прототипа;

$K_{об}$ – коэффициент обрабатываемости;

$K_{т.сл}$ – коэффициент технологической сложности изготовления новой детали нового двигателя;

$T_{ф.ост}$ – фактическая трудоемкость оставшихся операций детали-прототипа;

$V_{изм}$ – доля изменяемой части элементов конструкции новой детали нового двигателя относительно детали-прототипа;

$K_{к.сл}$ – коэффициент сложности по элементам конструкции изменяемой части нового двигателя;

$K_{м}$ – коэффициент, учитывающий массу детали нового двигателя.

В связи с тем, что коэффициент обрабатываемости $K_{об}$ учитывает соотношение трудоемкостей обработки материалов с различной обрабатываемостью при механической обработке, то он применяется лишь к части трудоемкости, а именно, к суммарной трудоемкости операций механической обработки.

Коэффициент обрабатываемости определяется по формуле

$$K_{об} = \frac{C_{об.н}}{C_{об.а}},$$

где $C_{об.н}$ – соотношение трудоемкости обработки материала детали нового двигателя к трудоемкости обработки стали 45;

$C_{об.а}$ – соотношение трудоемкости обработки материала детали двигателя-аналога к трудоемкости обработки стали 45.

Коэффициент технологической сложности $K_{т.сл}$ применяется лишь к части трудоемкости, а именно, к суммарной трудоемкости операций механической обработки. Технологическая сложность характеризуется точностью и шероховатостью поверхности.

Коэффициент технологической сложности изготовления деталей нового двигателя определяется по формуле [2]

$$K_{тсл} = \frac{\bar{k}_{Tн}}{\bar{k}_{Tа}} \cdot \frac{\overline{Ra}_{н}}{\overline{Ra}_{а}},$$

где $\bar{k}_{Tн}$ и $\bar{k}_{Tа}$ – средние значения квалитета точности новой детали

и детали-прототипа;

$\overline{Ra}_{\text{н}}$ и $\overline{Ra}_{a}$ – средние значения параметров шероховатости поверхности новой детали и детали-прототипа.

$\overline{k}_T$ – определяется по формуле

$$\overline{k}_T = \frac{\Sigma k_j n_j}{\Sigma n_j},$$

где k_j – j-й квалитет; n_j –число размеров j-го квалитета.

$\overline{Ra}$ – определяется по формуле

$$\overline{Ra} = \frac{\Sigma Ra_k n_k}{\Sigma n_k},$$

где Ra_k –k- е значение Ra; n_k –число поверхностей, имеющих $Ra=k$.

Для определения $\overline{k}_T$ и $\overline{Ra}$ применяются нормативы, указанные в табл. 1, 2.

Таблица 1

Средний квалитет	6	7	8	11	12	13
$\overline{k}_T$	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8

Таблица 2

Средняя шероховатость $\overline{Ra}$	20	10	5	2,5	1,25	0,63
$\overline{Ra}$	0,95	0,95	1,0	1,1	1,2	1,4

Сложность элементов конструкции деталей нового двигателя определяется коэффициентом конструкторской сложности $К_{\text{к.сл л}}$ и относится лишь к изменяемой доле конструкции детали нового двигателя $\text{V}_{\text{изм}}$ относительно детали-прототипа.

Изменяемая доля конструкции детали нового двигателя относительно детали прототипа определяется по формуле

$$\text{V}_{\text{изм}} = \frac{S_{\text{изм.н}}}{S_{\text{общ.а}}},$$

где $S_{\text{изм.н}}$ – площадь изменяемых обрабатываемых поверхностей детали нового двигателя;

$S_{\text{общ.}a}$ – общая площадь обрабатываемых поверхностей детали двигателя-аналога.

Коэффициент конструкторской сложности определяется по формуле [3]

$$У_{к.сл} = \sum_{i=1}^{n} У_i \quad ,$$

где $У_i$ - уровень конструкторской сложности i-й поверхности;

i – количество поверхностей.

$$У_i = \frac{\sum Б_{к.сл.н}}{\sum Б_{к.сл.а}},$$

где $Б_{к.сл.н}$ – оценка конструкторской сложности новой детали в баллах;

$Б_{к.сл.а}$ – оценка конструкторской сложности детали-прототипа в баллах.

Коэффициент, учитывающий массу детали (узла) нового двигателя $K_м$, может быть представлен степенной дробью, отражающей отношение массы детали (узла) нового двигателя к массе детали-прототипу [2]

$$K_м = \left(\frac{m_н}{m_а} \right)^{0,66},$$

где $m_н$, $m_а$ – массы детали нового двигателя и детали-прототипа двигателя-аналога.

Величину прогнозируемой трудоемкости изготовления новой детали при условии обеспечения конкурентоспособной трудоемкости изготовления нового двигателя можно определить по формуле

$$T_{прогнij} = T_{фij} \cdot \left(1 - \frac{T_{ф.уj} - T_{дир.уj}}{T_{ф.уj}} \right),$$

где $T_{прогнij}$ – прогнозируемая трудоемкость изготовления новой i-детали j-го узла;

$T_{фij}$ – фактическая трудоемкость изготовления i-й детали-прототипа j-го узла;

$T_{ф.уj}$ – фактическая трудоемкость изготовления j-го узла двигателя-аналога;

$T_{дир.уj}$ – директивная трудоемкость изготовления j-го узла нового двигателя[1].

[1] Директивная трудоемкость изготовления узлов нового двигателя определяется на этапе

Полученные значения приведенной и прогнозируемой трудоемкости сопоставляются с целью определения значения директивной[2] трудоемкости ($T_{\text{дир}}$) изготовления детали нового двигателя. При сравнении рассчитанной приведенной трудоемкости изготовления новой детали с ее прогнозируемой трудоемкостью возможны два варианта:

если $T_{\text{пр}} \le T_{\text{прогн}}$, то $T_{\text{дир}} = T_{\text{пр}}$;

если $T_{\text{пр}} > T_{\text{прогн}}$, то $T_{\text{дир}} = T_{\text{прогн}}$.

На втором этапе определяется необходимый процент снижения (допускаемый процент повышения) трудоемкости ($CT_{\min}$) деталей узлов, обеспечивающий конкурентоспособную трудоемкость нового двигателя по формуле

$$CT_{\min ij} = \frac{T_{\text{ф}.yj} - T_{\text{дир}.yj}}{T_{\text{ф}.yj}} - \frac{T_{\text{ф}.ij} - T_{\text{дир}.ij}}{T_{\text{ф}.ij}}$$

где $T_{\text{дир}ij}$ –директивная трудоемкость изготовления i-й детали j-го узла.

Определение трудоемкости изготовления деталей нового двигателя по предлагаемой методике позволяет обеспечить конкурентоспособную трудоемкость изготовления нового двигателя и выявить детали, обеспечение директивной трудоемкости которых требует повышения организационно-технического уровня производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фоминых Р. Л., Коршунов А. И. Якимович Б.А. Определение организационно-технического уровня производственной системы при прогнозировании трудоемкости изготовления машиностроительного изделия. // Машиностроитель. 2004. № 1. С. 32 - 37.

2. Шубина Н. Б., Проектирование машиностроительного производства:

эскизного проекта методом экономико-математического моделирования или сравнительно-аналоговым методом. На этапе технического проекта на основе полученных значений трудоемкости деталей значения директивной трудоемкости узлов корректируются.

[2] Под директивной трудоемкостью детали понимается трудоемкость, обеспечивающая конкурентоспособную трудоемкость изготовления нового двигателя

учебное пособие. М.: Издательство «Горная книга», 2009. 115 с.
3. Лысенко Н.В. Проектирование технологических процессов в машиностроении: метод. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 90с.

УДК 338.5

Ж.М.Кадырова, А.С. Семенов (ОАО НИИТ)

РАЗРАБОТКА ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК

Приоритетной задачей управления себестоимостью газотурбинных двигателей (ГТД) является обоснование трудоемкости его изготовления. Основной способ формирования затрат – это оперативное и точное определение, прогнозирование и расчет норм времени на производство деталей и сборочных единиц (ДСЕ) ГТД. С целью определения трудоемкости одних из самых дорогих ДСЕ ГТД (лопаток компрессора) разработана экономико-математическая модель (ЭММ) прогнозирования трудоемкости в зависимости от геометрических параметров, массы припуска, характеристик металла и технологических особенностей в рамках параметрического метода прогнозирования.

При построении ЭММ определения трудоёмкости выполнена следующая работа:

- отбор факторов для построения моделей,
- проверка качества информации,
- построение моделей,
- проверка значимости уравнения регрессий построенных моделей,
- верификация моделей.

Для модели были использованы данные по деталям двигателей ПС-90, АЛ-31Ф, 95-Ш, АЛ-31ФП, предоставленные предприятиями кооперации. Компетентными экспертами были рассмотрены следующие факторы:

– габаритные размеры ДСЕ, мм (максимальная хорда, высота лопатки),
– геометрические параметры (наличие нижней полки, тип хвостовика),
– масса заготовки за вычетом массы детали, кг,
– плотность материала, кг/м^3,
– коэффициент обрабатываемости,
– среднее значение шероховатости поверхностей,
– среднее значение квалитета размеров.

Отбор факторов производился на основе качественного теоретико-экономического анализа и включал в себя две стадии:
– отбор факторов исходя из сущности проблемы (оценки трудоёмкости);
– дальнейший анализ выбранных факторов при помощи матрицы корреляций.

Моделированию предшествовала проверка качества информации. К исходным данным предъявлялись следующие требования: сопоставимость, представительность, однородность, устойчивость (см. табл.1).

Таблица 1

Проверка качества информации

Требования к информации	Обеспечение требований
Сопоставимость	Все показатели, использованные в моделях, принадлежат к однородным объектам, при расчетах использовался единый инструментарий (редактор электронных таблиц Microsoft Excel).
Однородность (на отсутствие аномальных значений)	Все значения рядов прошли проверку на принадлежность к интервалу $(\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma)$.
Представительность	Количество данных в каждом показателе не менее чем в 6 раз превышает число независимых факторов в модели.
Устойчивость	Предварительно визуальный анализ графиков показал преобладание закономерности над случайностью в изменениях наблюдений, т е наличие связи трудоемкости с независимыми факторами.

Все условия для проверки качества информации соблюдены. Это свидетельствует о том, что выбранные показатели в дальнейшем могут быть использованы для построения эконометрической модели.

Построение моделей множественной регрессии включало несколько этапов:

– отбор факторных признаков с точки зрения их независимости друг от друга (свойство мультиколлинеарности),

– выбор формы связи (уравнения регрессии),

– отбор факторных признаков по их значимости в выбранной регрессии.

При построении моделей использовались следующие зависимости между трудоёмкостью и факторами:

- линейная,
- степенная,
- экспоненциальная.

Гиперболическая зависимость вообще не рассматривалась в силу наличия явной прямой связи трудоемкости и выбранных факторов.

Процедура отбора факторов в уравнение осуществлялась методом шаговой регрессии. Сущность данного метода заключается в последовательном исключении факторов из уравнения регрессии, если факторы при проверке их значимости оказывались незначимыми.

Проверка показателей на свойство мультиколлинеарности проводилась на основе матрицы корреляций (табл. 2).

Плотность материала и коэффициент обрабатываемости напрямую друг с другом коррелируют (коэфициент корреляции равен 1,0), поэтому экспертным путем оставлен в анализе коэффициент обрабатываемости. Среднее значение шероховатости поверхностей и среднее значение квалитета размеров имеют слабое влияние на трудоемкость, поэтому их можно исключить. В дальнейшем анализе остались показатели, у которых коэффициент корреляции с трудоемкостью не менее 0,65: максимальная хорда, высота лопатки, масса заготовки за вычетом массы детали, коэффициент обрабатываемости и наличие нижней полки.

Для выбора вида зависимости трудоемкости от выбранных факторов были построены линейные, степенные и экспоненциальные

регрессии. Качество соответствия кривых регрессий рассматриваемой зависимости трудоемкости от выбранных факторов определялось двумя критериями: критерием Фишера (F) и коэффициентом детерминации (R^2) (см. табл. 3).

Наилучшей моделью оценки зависимости трудоёмкости от выбранных факторов является экспоненциальная, которая обеспечила максимальные значения по показателям качества регрессий (F, R^2).

Таблица 2

Матрица корреляций для рабочих лопаток компрессора ГТД

Исходные данные	Максимальная хорда, мм	Высота, мм	Масса заготовки за вычетом массы детали, мм	Наличие нижней полки	Плотность материала, кг/мм^3	Коэффициент обраба-тываемости	Среднее значение шероховатости поверхностей	Среднее значение квалитета размеров	Тип хвостовика	Трудоемкость, н-ч.
Максимальная хорда, мм	1									
Высота, мм	0,57	1								
Масса припуска на деталь, кг	0,58	0,61	1							
Наличие нижней полки	0,61	0,57	0,61	1						
Плотность материала, г/см^3	-0,72	-0,66	-0,50	-0,30	1					
Коэффициент обрабатываемости	-0,72	-0,66	-0,50	-0,30	1,00	1				
Среднее значение шероховатости поверхностей, мкм	0,03	0,02	-0,05	0,04	0,28	0,28	1			
Среднее значение квалитета размеров	-0,16	-0,03	0,19	0,01	0,33	0,33	0,20	1		
Тип хвостовика	-0,26	-0,21	-0,13	-0,10	0,04	0,04	-0,68	0,14	1	
Трудоемкость, н-ч.	0,69	0,67	0,66	0,66	-0,41	-0,41	0,01	-0,09	-0,14	1

Таблица 3

Показатели качества выбора формы кривой регрессии

Показатели качества подгонки	По моделям		
	Линейная	Степенная	Экспоненциальная
Критерий Фишера, F	22,42	22,84	26,24
Коэффициент детерминации, R^2	0,79	0,82	0,84

Коэффициент детерминации (R^2) показывает, какая часть приходится на долю вариации факторных признаков по сравнению с остальными неучтенными в модели факторами, влияющими на изменение результативного показателя (трудоемкости). В случае полученных моделей самая лучшая оказалась та, где факторы составляют максимальную долю в 84% от общей вариации трудоемкости. Критерий Фишера (F) проверяет гипотезу о статистической значимости уравнения регрессии с вероятностью 90%.

В редакторе электронных таблиц Microsoft Excel с помощью пакета надстроек «Анализ данных» была построена ЭММ для определения трудоемкости изготовления рабочих лопаток компрессора $T_{рл}$, которая имеет следующий вид:

$$T_{рл} = \frac{e^{0,01B+1,03M+0,01K}}{e^{0,01H+0,23П}},$$

где B – максимальная хорда (мм), H – высота лопатки (мм), M – масса припуска на деталь (кг), $П$ – наличие нижней полки, K – коэффициент обрабатываемости.

Значимость уравнения регрессии была проверена на основе показателей качества подбора уравнения в сравнении с критическими значениями принятых критериев (в табл. 4).

Таблица 4

Показатели качества подбора уравнения регрессии

	По модели	Критическое значение
Критерий Фишера, F	28,55	2,80
Коэффициент детерминации, R^2	0,83	0,75

Все значения показателей качества уравнения регрессии больше критических, что свидетельствует о статистической значимости полученного уравнения.

В табл.5 представлена верификация уточненных моделей рабочих лопаток компрессора. Она проведена на данных, не включённых в исходные данные для построения модели.

Таблица 5

Верификация модели рабочей лопатки КВД с аналогичными деталями двигателя-аналога

Наименование	Прогнозное значение, н.-ч.	Факт, н.-ч.	Ошибка прогноза, %
Лопатка рабочая 5 ст. КВД двигателя-аналога	1,92	2,00	4,2

Ошибка прогноза построенной модели не превышает 20%, что говорит об адекватности построенной модели.

Анализ результатов верификации уточненной модели рабочей лопатки позволил сделать вывод о возможности ее использования для определения трудоемкости изготовления этих деталей на этапе технического проекта.

Таким образом, разработанная эконометрическая модель после успешной апробации позволяет с достоверной точностью спрогнозировать трудоемкость одних из самых дорогих ДСЕ – лопаток компрессора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеева И.И., Курышева С.В., Костеева Т.В., Бабаева И.В., Михайлов Б.А. Эконометрика. Учебник / под ред. И.И. Елисеевой. М.: Финансы и статистика, 2003. 344 с.

УДК 658.51.012

Ю.И.Заянчковский (ЦКС “БАСК”),
В.Л.Юрьев, И.Г.Каримов (ОАО НИИТ)

УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМИ И ОПЫТНО - КОНСТРУКТОРСКИМИ РАБОТАМИ В ОАО НИИТ

Исходя из стратегии ОАО “Институт технологии и организации производства” (ОАО НИИТ, далее Институт) в области качества [1], в рамках создаваемой системы менеджмента качества, отвечающей требованиям стандарта ГОСТ ISO 9001-2011, в Институте определены основные системные процессы:

“Управление научно-исследавательскими и опытно-конструкторскими разработками” (НИОКР)”,,

”Проектирование научно-технической продукции”,

“Закупки”,

“Производство научно-технической продукции”.

Повышение результативности и эффективности процесса управления НИОКР, как основного вида деятельности, определяющего научно-технический уровень работ Института, является одной из приоритетных задач Политики руководства в области качества.

При выполнении этого процесса пришлось решить ряд следующих проблем:

– сложность формализации научной деятельности,

– высокая зависимость результатов НИОКР от компетентности и личных качеств, как руководителя исследований, так и исполнителя,

– высокий уровень риска при проведении НИОКР, в том числе отсутствие четкой и однозначной корреляции между результатами исследований и конечным продуктом,

– сложность управления ресурсами, в том числе взаимодействием подразделений и служб, участвующих в выполнении конкретных НИОКР,

– защита результатов интеллектуальной деятельности и др.

Решение этих проблем реализовано по циклу Деминга: РДСА (“Р” – планируй, “Д” – делай, “С” – контролируй, “А” – улучшай) в процедуре, регламентированной стандартом организации СТО СМК 7.3.01 “НИОКР. Порядок планирования, выполнения, отчетности и оценки научно-технического уровня” [2].

Порядок выполнения НИОКР на отдельных этапах регламентируется требованиями государственных и отраслевых стандартов, а также положениями указанного стандарта организации.

При выполнении НИОКР организация концентрирует усилия на обеспечение высокого научно-технического уровня реализации НИОКР, позволяющего обеспечить создание объектов защищенной интеллектуальной собственности.

Основанием для проведения НИОКР в Институте служат:

– тематический план НИОКР организации;
– приказ генерального директора организации;
– программа или план по научно-техническому развитию отрасли;
– решение ОДК;
– техническое требование, договор (контракт) с организацией-заказчиком НИОКР;
– государственный заказ и др.

Общий порядок реализации процедуры по управлению НИОКР представлен в табл.1.

Ниже приводится детализация процедуры управления при выполнении отдельных этапов НИОКР.

На этапе планирования НИОКР финансово-экономический отдел Института по распоряжению руководства о проведении НИОКР готовит приказ, в котором устанавливает:

– тему НИОКР и ее реквизиты (шифр, основание и т.д.);
– руководителя работы и основных исполнителей;
– возможность привлечения соисполнителей (аутсорсеров);
– календарный план, смету;
– план-график (календарный план) выполнения НИОКР;
– техническое задание или требования организации-заказчика НИОКР;
– порядок регистрации работы;
– форму, сроки и порядок отчетности по этапам НИОКР и по ее окончании;

– порядок формирования документации, ведения дел и документооборота, связанного с охраной интеллектуальной собственности, конфиденциальностью и информационной безопасностью;
– порядок организации доступа к результатам НИОКР;
– порядок публикации результатов НИОКР.

При проведении НИОКР всегда присутствует доля риска недостижения поставленной научно-технической цели. Поэтому, одним из ответственных моментов на этапе ситуационного анализа и планирования НИОКР, является оценка возможных рисков как научно-технического характера, так и экономического. Анализ и обработка рисков при проведении НИОКР осуществляется согласно стандарту ИСО 31000:2009.

Организация проведения НИОКР предусматривает, что в процессе выполнения должно быть обеспечено соблюдение требований технического задания, представленного заказчиком НИОКР, технического задания, разработанного исполнителем в соответствии с ГОСТ РВ 15.101-2001, ГОСТ РВ 15.201-2003, или иного документа, содержащего необходимые требования для проведения НИОКР.

В свою очередь, техническое задание должно включать выполнение следующих требований:
– установление стадий выполнения НИОКР и соответствующих каждой стадии этапы анализа, верификации и валидации;
–достижение научных, технических, экономических и иных требований к результатам НИОКР;
– сравнительный анализ результатов НИОКР с запланированными целями, с современным уровнем научно-технических достижений и лучших практик;
– соответствие перечня и комплектности результатов НИОКР составу и объему документации по этапам работы и НИОКР в целом;
– перечень технических или нормативных документов, регламентирующих порядок выполнения, контроля приемки и оценки результатов НИОКР;
– обеспечение безопасности для жизни и здоровья людей и охраны окружающей среды, совместимости и взаимозаменяемости;
– стандартизация, унификация и метрологическое обеспечение;
– ограничение номенклатуры применяемых материалов и комплектующих изделий;

– экономическое и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов при создании и эксплуатации создаваемой продукции;
– обеспечение конкурентоспособности продукции, намечаемой к созданию.

При необходимости ответственный исполнитель вправе поставить перед руководством вопрос о привлечении к выполнению НИОКР соисполнителей (сторонних организаций) на договорных условиях с ответственностью за качество и научно-технический уровень работы соисполнителя.

Для экспериментальной проверки возможности создания образца продукции и определения его технических характеристик, проверки правильности результатов теоретических исследований и выбора оптимального технического и конструкторско-технологического решения в процессе выполнения НИОКР (при необходимости) создают макеты, модели, экспериментальные образцы.

Необходимость разработки, изготовления и испытаний макетов, моделей и экспериментальных образцов устанавливают в техническом задании на НИОКР.

Выполнение этапов работ согласно календарному плану контролируется руководителем планово-тематического отдела, а анализ научно-технических результатов НИОКР обсуждается на заседаниях научно-технического совета согласно СТО СМК 8.2.04-2012 [3].

Выполнение требований технического задания на НИОКР предполагает определение приоритетных направлений исследований, разработку (определение) общей методики и перечня частных методик, необходимых для выполнения работ на различных этапах НИОКР:
– выбора направления исследования;
– теоретических исследований;
– планирования и проведения экспериментальных работ;
– расчетов и математического моделирования;
– разработки и применения метрологического и программного обеспечения объектов исследования;
– приемки и оценки научно-технического уровня и качества выполнения НИОКР.

Этап	Содержание этапа	Ответственный исполнитель	Регламентирующий документ
1	2	3	4
1 Получение/выпуск распорядительных документов на проведение НИОКР в Институте	Получение и регистрация директивы вышестоящей инстанции или потребителя. Выпуск ОРД на проведение НИОКР (циклы с указанием основания и исходных данных для разработки темы, с обоснованием необходимости проведения НИОКР, ее актуальности)	Генеральный директор	СТО СМК 4.2.02-2013 ГОСТ Р 6.30-2003
2 Инициирование работы, выдача задания исполнителям	Определение круга лиц, уполномоченных на организацию выполнения НИОКР в организации, на привлечение соисполнителей (при необходимости)	1-ый зам. ген. директора по научной работе	Приказ по организации ГОСТ 15.101-98
3 Ситуационный анализ, постановка цели	Оценка современного состояния решаемой научно-технической проблемы, выбор направления исследований, планируемый научно-технический уровень SWOT-анализ, уровень патентной защиты, оценка рисков и постановка целей НИОКР	Руководитель НИОКР	ИСО 31000-2009
4 Разработка календарного плана выполнения НИОКР	Разработка календарного плана выполнения НИОКР, основных стадий и этапов, исполнителей и привлекаемых организаций, сроков исполнения и затрат	Руководитель НИОКР	ГОСТ 2.103-68, ГОСТ 15.101-98, ГОСТ РВ 15.201-2003, ГОСТ РВ 15.203-2001, ГОСТ РВ 15.105-2001
5 Разработка ТЗ (при необходимости по видам деятельности)	Разработка ТЗ на НИР и ОКР в целом и при необходимости на основные стадии/этапы НИОКР	Руководитель НИОКР	ГОСТ РВ 15.101-2001, ГОСТ 19.201-78
6 Разработка методик (и) выполнения НИОКР	Определение перечня и разработка методик, необходимых для выполнения работ на различных этапах НИОКР (теоретических и экспериментальных исследований и расчетов, обоснования и цели экспериментальных исследований, расчетов, моделирования, метрологического и программного обеспечения и т.д.)	Руководитель НИОКР	СТО СМК 4.2.05-2013, ГОСТ 8.563-96
7 Проведение теоретических и/или экспериментальных исследований, необходимых расчетов	Уточнение направления исследований, проведение теоретических исследований и расчетов, обоснования и цели экспериментальных исследований, описание принципов функционирования и характеристик объектов НИОКР	Исполнитель	ГОСТ 26656-85
8 Проведение патентных исследований	Проведение патентных исследований по теме, выводы и прогнозы по возможностям патентной защиты научно-технического уровня результатов НИОКР	Исполнитель, Начальник ОНТИиП	ГОСТ Р 15.011-96
9 Анализ хода и промежуточных результатов НИОКР	Промежуточный анализ хода и результатов выполнения этапов НИОКР, анализ рисков недостижения намеченных целей. Уточнения (при необходимости) календарного плана, разработка мероприятий.	НТС организации	СТО СМК 8.2.04-2012
10 Оценка необходимости изготовления макета и/или экспериментального образца в предметной области	Анализ данных теоретических исследований, оценка необходимости и планирование необходимых натурных, полунатурных исследований. Планирование изготовления макетов, экспериментальных и опытных образцов, необходимых для проверки теоретических выводов НИР.	Руководитель НИОКР	План-задание выполнения НИОКР

1	2	3	4
11 Закупка материалов, комплектующих и оборудования для изготовления макетов, опытных образцов	Подготовка спецификации на материалы, комплектующие изделия, оборудование, программные продукты и изготовление продукции для проведения экспериментов и изготовления макетов, опытных образцов.	Начальник ОМТС	СТО СМК7.4.01-2013
12 Подготовка производственной/экспериментальной базы	Подготовка производственной базы по всем факторам, влияющим на конечный результат изготовления (5М - методики и документация, оборудование, инструменты, метрологическое обеспечение, персонал, условия, среда и т.д.)	Начальник ОПО	ГОСТ Р 50995.3.1-96
13 Изготовление макета/опытного образца объекта исследования	Изготовление, сборка, монтаж и ввод в действие макета/опытного образца	Начальник ОПО	ГОСТ 2.103-68 ГОСТ15.001-88
14 Испытания и исследование характеристик объекта	Испытания и исследование характеристик макета/опытного образца и проверка теоретических выводов НИР экспериментальным путем по утверждениям методикам на макетах, опытных образцах. Обработка данных и оформление протоколов испытаний.	Руководитель НИОКР	ГОСТ Р 8.568-97 ГОСТ Р 51672-2000 ГОСТ 8.563-96 ГОСТ 15504-81
15 Обобщение, экспертиза и оценка результатов исследований	Анализ, верификация и оценка хода и результатов проведенных исследований. Анализ причин сбоев, имевших место при выполнении НИОКР. Подготовка мероприятий по устранению их причин.	НТС Института	ГОСТ РВ 15.211-2002
16 Оценка научно-технического уровня полученных результатов НИОКР и полноты решений поставленных задач, в т.ч. технико-экономических	Независимая экспертная оценка результатов исследований, полноты и глубины решения поставленных задач, оценка достоверности полученных данных и их сравнение с данными аналогичных отечественных и зарубежных работ. Обоснование необходимости продолжения работы и проведения дополнительных исследований. Отрицательные результаты, приводящие к целесообразности прекращения исследований. Оценка технико-экономического эффекта НИОКР	НТС Института	ГОСТ 2.116-84 ПБУ 17/02 от 19.11.2012 СТО СМК 5.6.01-2013
17 Оформление, согласование и утверждение отчета по НИОКР	Оформление, согласование и утверждение окончательной редакции отчета по НИОКР. Подготовка реферата по НИОКР	Руководитель НИОКР	ГОСТ 7.9-95 ГОСТ 7.32-2001 ГОСТ РВ 15.110-2003 Р 50-605-80-93
18 Рассмотрение итогов выполнения НИОКР на НТС Института	Рассмотрение в установленном порядке итогов выполнения НИОКР на заседании НТС организации с привлечением заинтересованных сторон и потенциальных Потребителей результатов работы. Оценка научно-технического уровня выполнения НИОКР, определение уровня конфиденциальности.	НТС Института	ГОСТ РВ 15.110-2003 СТО СМК 8.2.04-2012
19 Предложения по дальнейшему внедрению результатов выполнения НИОКР	Рассылка материалов НИОКР заинтересованным сторонам, сбор отзывов и предложений, формирование рекомендаций по дальнейшему продолжению работы и по внедрению результатов НИОКР в практику. Публикация результатов НИОКР в специальных изданиях	НТС Института	Решение НТС Института

В процессе проведения теоретических и (или) экспериментальных исследований возможно уточнение объема или изменение направления исследования, решение о котором принимается на заседании научно-технического совета Института.

В ходе реализации этой стадии НИОКР проводятся необходимые информационные поиски, теоретические исследования и расчеты, планируются необходимые для достижения поставленных целей эксперименты, делаются заявки на изготовление макетов или опытных образцов (при необходимости).

Выявленные в ходе теоретических и экспериментальных исследований элементы новизны подвергаются анализу на предмет патентной чистоты и, при необходимости, проводятся работы по патентной защите объектов интеллектуальной собственности в соответствии с ГОСТ15.011.

Патентные исследования проводятся на всех этапах НИОКР.

Объем, научно-технический уровень и достаточность результатов на этапах реализации НИОКР обсуждаются на заседаниях научно-технического совета Института. При обсуждении оценивают соответствие результатов требованиям технического задания, уровню развития науки и техники, оценивают риск недостижения намеченных целей. Определяют необходимость выделения дополнительных ресурсов, в том числе финансовых, корректировки календарного плана, разработки и изготовления макетов, опытных образцов и проведения дополнительных натурных и полунатурных их испытаний, необходимых для проверки и подтверждения теоретических гипотез и решения поставленных перед НИОКР задач.

Проведение необходимых испытаний и исследований характеристик макета/опытного образца должно осуществляться в управляемых условиях (5М) и по утвержденным методикам и программам, включающим оценку достоверности полученных теоретических и практических результатов. На этом этапе важно корректно применять методы планирования экспериментов, статистической обработки данных и наглядного представления полученных результатов. Объем и содержание испытаний определяет исполнитель с учетом новизны, сложности и особенностей объекта испытаний и НИОКР в целом.

При проведении НИОКР исполнитель обязан обращать внимание на обеспечение следующих требований технического задания:

– ресурсосбережения,

– установленных для условий использования продукции значений показателей, определяющих ее научно-технический уровень,

– устойчивости к внешним воздействиям,

– унификации, взаимозаменяемости составных частей продукции, созданной в результате НИОКР,

– безопасности, охраны здоровья, охраны окружающей среды и др.

В ходе выполнения этапов НИОКР ответственный исполнитель оформляет отчеты, в том числе промежуточные (если это предусмотрено техническим заданием и календарным планом), и представляет их для экспертизы и оценки научно-технического уровня полученных результатов.

Ответственность за выполнением этапов НИОКР согласно утвержденному календарному плану возложена на первого заместителя генерального директора по научной работе, а оперативный контроль – на руководителя планово-тематического отдела.

Оценка полноты и глубины решений, поставленных перед НИОКР задач, осуществляет комиссия, назначенная распоряжением первого заместителя генерального директора.

Комиссия проводит оценку соответствия результатов НИОКР требованиям технического задания, оценку достоверности полученных данных и их сравнение с данными аналогичных отечественных и зарубежных работ, дает рекомендации по реализации и использованию результатов НИОКР, о необходимости продолжения работ и проведения дополнительных исследований или делает заключение, обосновывающее прекращение дальнейших исследований.

Обобщение, экспертиза и оценка результатов исследований, включающих анализ хода и данных проведенных теоретических и экспериментальных исследований, анализ фактов появления отрицательных результатов, имевших место при выполнении НИОКР, должны быть направлены на оценку полноты решения поставленных задач, на анализ причин несоответствий и разработку

предложений и мероприятий по устранению этих причин и по дальнейшим направлениям выполнения НИОКР.

Основанием для экспертизы и оценки результатов НИОКР служат, в том числе, и отчеты исполнителя как промежуточные по завершению отдельных этапов, так и по итогам выполнения НИОКР в целом.

Отчеты оформляются согласно ГОСТ 7.32-2001.

В приложении к отчету помещают материалы, связанные с выполнением НИОКР, не вошедшие в основную часть отчета, но иллюстрирующие или дополняющие результаты проведенной работы. К ним относятся:

– копии технического задания на НИОКР, программы работ, договора или другого исходного документа для выполнения НИОКР,
– промежуточные математические доказательства, формулы, расчеты,
– таблицы вспомогательных цифровых данных,
– протоколы испытаний,
– описание методик, оборудования и приборов, применяемых при проведении экспериментов, измерений и испытаний,
– заключение метрологической экспертизы,
– инструкции и методики, разработанные в процессе выполнения НИОКР,
– иллюстрации вспомогательного характера,
– протокол рассмотрения выполненной НИОКР на заседании научно-технического совета,
– акты внедрения результатов НИОКР,
– отчет о патентных исследованиях и др.

Рассмотрение отчета и результатов НИОКР проводится с привлечением ведущих специалистов Института, а также научно-исследовательских организаций и учебных заведений, специализирующихся в данном научном направлении, специалистов-смежников, соисполнителей и представителей организаций – потенциальных потребителей результатов НИОКР.

Поскольку первичной информацией для потенциальных потребителей результатов НИОКР или ее заказчиков служит реферат, то его оформлению и содержанию уделяют особое внимание.

Реферат содержит:

– сведения о целях и задачах НИОКР, основных этапах работы, видах и результатах проведенных исследований, об объеме отчета,

количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве частей отчета, количестве использованных источников,
– перечень ключевых слов,
– рекомендации по внедрению или итоги внедренных результатов НИОКР, ее технико-экономическая значимость.

Оформление реферата – в соответствии с ГОСТ 7.9-95.

Окончательная оценка и приемка результатов НИОКР в Институте проводится с привлечением ведущих специалистов, а также других научно-исследовательских организации и учебных заведений, специализирующихся в данном научном направлении, специалистов-смежников, соисполнителей и представителей организаций – потенциальных потребителей результатов НИОКР.

На приемку выполненной НИОКР исполнитель представляет:
– утвержденное техническое задание,
– утвержденные акты приемки завершенных этапов НИОКР,
– утвержденный научно-технический отчет по НИОКР,
– реферат,
– макеты/опытные образцы, программы и методики испытаний макетов, если это предусмотрено техническим заданием и контрактом,
– акты и протоколы испытаний,
– рекомендации и предложения по реализации и использованию результатов НИОКР,
– конструкторскую и/или технологическую документацию, программные продукты (если предусмотрено техническим заданием);
– другие материалы по предложениям инстанций, утвердивших техническое задание или программу приемки НИОКР.

Приемка опытных образцов, технических средств и технологических процессов осуществляется в соответствии с техническим заданием согласно ГОСТ РВ 15.201.

Необходимость, объем и порядок проведения испытаний опытных образцов, технических средств и технологических процессов устанавливается в техническом задании на НИОКР.

Программы испытаний разрабатываются в процессе выполнения НИОКР на основе требований технического задания, конструкторской документации с использованием типовых или специально разработанных программ, методик и других нормативных документов в части организации проведения испытаний.

В программу и методику испытаний включают:

– объект испытаний,
– цель испытаний,
– объем испытаний,
– условия и порядок испытаний,
– материально-техническое обеспечение испытаний,
– методическое и метрологическое обеспечение испытаний,
– программное обеспечение испытаний,
– отчетность по испытаниям.

Испытания проводят после проверки готовности всех мест и условий проведения испытаний, обеспечения требований по безопасности, подготовке специалистов и т.д.

Результаты испытаний оформляются в протоколах и акте испытаний.

Завершенная НИОКР, включая оформленный отчет, акт испытаний и другие материалы, предусмотренные техническим заданием, рассматривается на научно-техническом совете Института согласно СТО СМК 8.2.04.

По итогам рассмотрения результатов НИОКР принимается решение:
– о достижении поставленных перед НИОКР целей,
– о соответствии результатов работы требованиям технического задания,
– о научно-техническом уровне работы,
– о патентоспособности и охраноспособности интеллектуальной собственности полученной научно-технической продукции и правообладателе объекта интеллектуальной собственности,
– о перспективности и целесообразности продолжения работы в выбранном направлении или о необходимости внесения соответствующих корректировок в техническое задание,
–о возможности и рекомендации по использованию полученных результатов в народном хозяйстве и непосредственно в работах Института,
– о технико-экономическом эффекте внедрения результатов НИОКР,
– об уровне конфиденциальности и обеспечении информационной безопасности, о возможности открытой публикации результатов НИОКР,
– о соблюдении финансово-экономических показателей при реализации НИОКР,

– об адресатах рассылки результатов НИОКР и др.

Выполненная НИОКР считается завершенной в полном объеме, если в соответствии с поставленными целями результаты НИОКР используются:

– при реализации региональных и отраслевых программ,
– в составе вновь создаваемого или модернизируемого оборудования,
– в технических заданиях на другие НИОКР,
– в нормативных, технических и методических документах организации и в организациях-потребителях результатов НИОКР,
– в составе программ и методик испытаний новых или модернизируемых образцов продукции.

Успешная реализация и результативность любого процесса в рамках СМК, как уже отмечалось, зависит от владельца процесса (руководителя НИОКР) и всей его команды, их компетентности и четкого взаимодействия.

Подход к управлению процессом, включая мониторинг изделия и оценку результативности процесса, приведен в работе [4].

Важно также отметить, что эффективность управления процессами в значительной степени зависит и от грамотного применения статистических методов, особенно на этапах планирования и проведения исследований и оценки результатов НИОКР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев В.Л., Заянчковский Ю.И. Стратегия и политика ОАО НИИТ в области качества // Наука – производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып.7. Уфа: Издательство «Вагант», 2012. С.7 - 18.

2. СТО СМК 7.3.01-2013. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Порядок планирования, выполнения, отчетности и оценки научно-технического уровня. ОАО НИИТ, 2013.

3.СТО СМК 8.2.04-2012. Оценка качества НИОКР. ОАО НИИТ, 2012.

4. Заянчковский Ю.И. Процессный подход - путь повышения эффективности системы менеджмента в организации // Наука – производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып.7. Уфа: Издательство «Вагант», 2012. С.18 -37.

УДК 621.91

А. И. Тихонов, Е. И. Мокроусова (МАИ)

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Авиационное двигателестроение является уникальной, наиболее наукоемкой отраслью машиностроения, реализующей в своей продукции новейшие достижения научно-технического прогресса[1,2].

За годы бурного развития газотурбинных двигателей (ГТД), начавшегося после второй мировой войны, сменилось несколько их поколений, каждому из которых присущи определенные показатели качества и технико-экономической эффективности, оригинальность и уникальность реализованных научно-технических решений [2,3]. От поколения к поколению усложняется конструкция ГТД, возрастает их стоимость и, как правило, сроки от начала проектирования двигателя до его серийного производства. В настоящее время успешно эксплуатируются двигатели четвертого поколения и продолжается работа над последующими поколениями [2,3].

К авиационным двигателям относятся все типы тепловых машин, используемых как движители для летательных аппаратов авиационного типа. Двигатель в значительной мере определяет скорость, дальность и высоту полета летательного аппарата, его маневренность и другие летно-технические данные.

Авиационные двигатели делятся на три обширных класса:

- поршневые (ПД);
- воздушно-реактивные (ВРД включая ГТД);
- ракетные (РД или РкД).

Для боевой авиации используются воздушно-реактивные компрессорные двигатели. На рис.1 приведена их классификация. По принципу создания реактивной тяги двигатели делятся на двигатели прямой реакции и двигатели непрямой реакции.

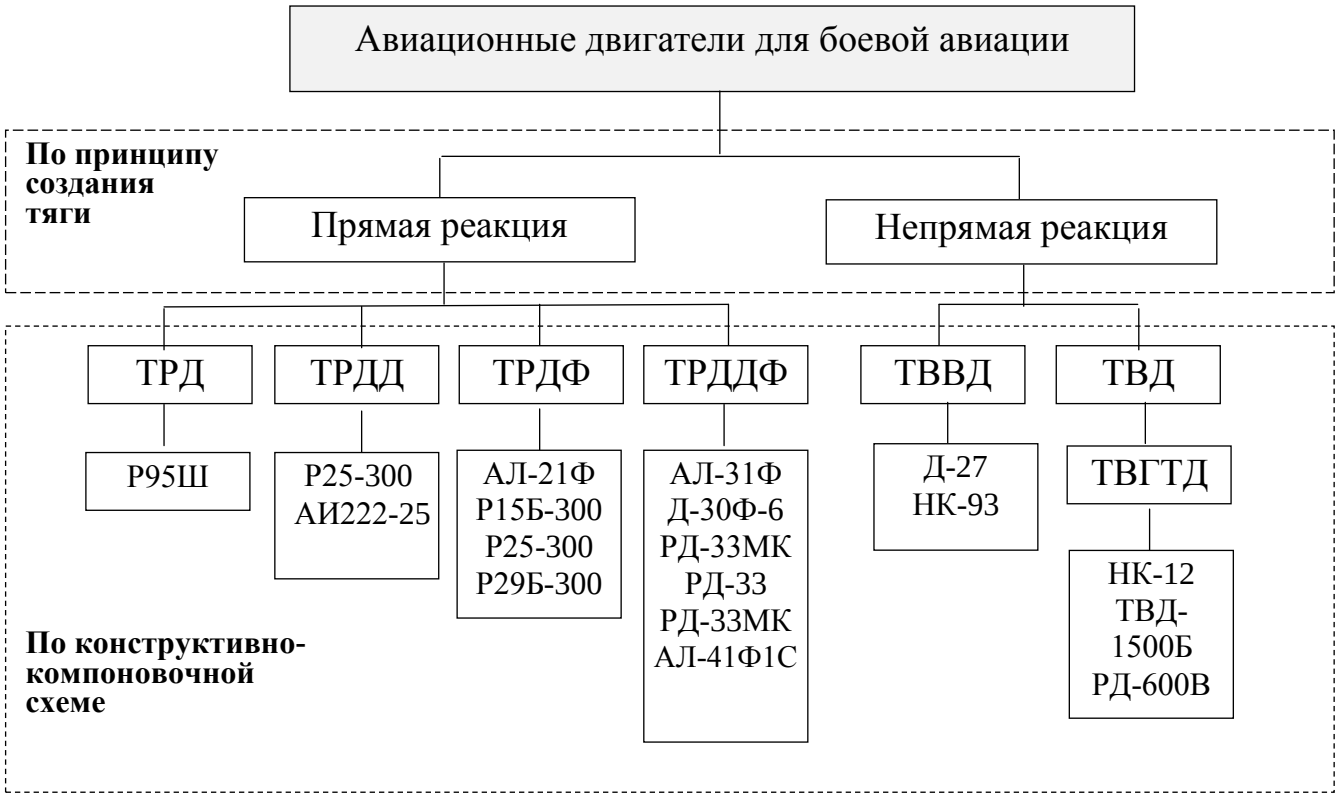


Рис.1. Классификация авиационных двигателей

Двигатели прямой реакции создают тяговое усилие непосредственно – это двигатели турбореактивные без форсажа и с форсажными камерами, турбореактивные двухконтурные двигатели.

Двигатели, передающие вырабатываемому ими мощность специальному движителю (винту, винтовентилятору, несущему винту вертолета и т.п.), который и создает тяговое усилие – это турбовинтовые, турбовинтовентиляторные, турбовальные двигатели.

Турбореактивный двигатель (ТРД) – тепловой двигатель, в котором используется газовая турбина, а реактивная тяга образуется при истечении продуктов сгорания из реактивного сопла. Часть работы турбины расходуется на сжатие и нагревание воздуха. Турбореактивные двигатели получили широкое применение в летательных аппаратах развивающих большие дозвуковые и сверхзвуковые скорости полета, где они наиболее эффективны.

Турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД) состоит из двух контуров: внутреннего (первый контур) и наружного, расположенного вокруг внутреннего (второй контур). ТРДД могут быть эффективными и для больших сверхзвуковых скоростей полета. Такую возможность открыло сжигание топлива в двух контурах.

Турбореактивный двигатель с форсажной камерой (ТРДФ) представляет собой ТРД, у которого газовый поток после расширения в турбине поступает в форсажную камеру. Применяется в основном на сверхзвуковых самолётах. В форсажной камере производится дополнительный подвод тепла путем сжигания топлива. Это значительно увеличивает тягу двигателя (на 50%), однако сильно повышает расход топлива. ТРДФ применяется в боевых самолетах, где есть необходимость кратковременного увеличения тяги для перехвата цели.

Двухконтурный турбореактивный двигатель с форсажной камерой (ТРДДФ) представляет собой ТРДД со смешением потоков, у которого после камеры смешения газовый поток направляется в форсажную камеру для дополнительного подвода тепла с целью увеличения тяги.

В турбовинтовом двигателе (ТВД) основная тяга создается воздушным винтом, соединённым с валом двигателя через редуктор. На долю реактивной тяги от сгорания топлива приходится 6-12%. На небольших скоростях полёта (до 400 – 600км/ч.) такой двигатель гораздо экономичнее ТРД. Далее, с ростом скорости полёта, эффективность воздушного винта уменьшается. ТВД состоит из тех же основных элементов, что и ТРД, но, помимо того, снабжен воздушным винтом, вал которого соединен с валом турбокомпрессора через редуктор. Чаще всего ТВД применяются на летательных аппаратах, обслуживающих местные воздушные линии, и в транспортной авиации.

Турбовинтовентиляторный двигатель (ТВВД) очень похож на ТВД. Здесь взамен винта применяется винтовентилятор, представляющий собой малогабаритный высоконагруженный многолопастный воздушный винт изменяемого шага. Диаметр винтовентилятора примерно на 40% меньше, чем диаметр современного винта. Исследования показывают, что при одной и той же нагрузке и одинаковой дальности полета, магистральный самолет в крейсерском полете, при применении ТВВД, израсходует за полет на 20 – 25% меньше топлива, чем перспективный ТРДД. Турбовинтовентиляторные двигатели используются для военно-транспортных самолетов.

Основная область применения турбовального двигателя (ТВГТД) – силовые установки вертолетов. Кроме того, он может

применяться в качестве вспомогательной силовой установки для запуска двигателей, например, на двигателе АЛ-21Ф-3, который устанав-ливается на самолеты СУ-24.

Различные типы и классы самолётов требуют различных авиационных двигателей как по мощности, так и по принципу создания тяги. Среди многочисленных признаков, по которым можно классифицировать самолеты, наиболее важным является назначение. Этот признак определяет летно-технические характеристики, размеры и компоновку самолета, состав оборудования на нем и пр.

По этому признаку все самолеты можно разделить на истребители, бомбардировщики, штурмовики, разведчики, военно-транспортные и противолодочные. В каждой из этих групп самолеты можно классифицировать и по специальным задачам, которые они должны выполнять. Информационная модель двигателей для боевой авиации представлена в таблице.

Степень технического совершенства авиационного двигателя характеризует его качественные признаки, определяемые конструктивно-технологическими особенностями объекта оценки. В связи с этим, множество параметров, моделирующих научно-технический облик авиадвигателя, имеет наивысший приоритет.

Основными требованиями, предъявляемыми к современным авиационным двигателям, являются:

1. Создание заданной тяги или мощности для получения необходимых летно-технических данных летательного аппарата. Более высокая мощность при возможно меньшем весе – первое и главное требование к авиационным двигателям. Это специфическое авиационное требование определяет все особенности авиационных двигателей, их достоинства и недостатки. Более совершенным в конструктивном отношении будет тот двигатель, который развивает заданную тягу при минимальных массе, расходе топлива и воздуха.

2. Высокие эксплуатационные качества: максимально возможный ресурс работы, простота и удобство обслуживания и ремонта, надежность. Вторым важнейшим требованием, предъявляемым к авиационному двигателю, является надежность его в пределах установленного срока работы, называемого ресурсом двигателя. У лучших современных авиационных двигателей, предназначенных для тяжелых бомбардировщиков и для гражданских самолетов, ресурс составляет от 500 до 800час. У весьма напряженных и всемерно

форсированных двигателей, предназначенных для истребителей и штурмовиков, ресурс значительно меньше и составляет от 150 до 400 час.

Такая большая разница объясняется тем, что на истребители и штурмовики, с целью сообщить им как можно более высокие качества, обычно устанавливают новые, только что выпущенные типы двигателей, причем специфические требования военной авиации заставляют конструкторов «выжимать» из двигателя наибольшую возможную мощность хотя бы за счет срока его работы. Требование надежности ГТД является одним из важнейших, так как от него зависит безопасность полетов и безотказность выполнения заданий. Уровень надежности представляет собой один из основных критериев качества двигателя. Надежность является комплексным свойством ГТД, в состав которого входят безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтопригодность двигателя.

3. Возможно меньшая удельная масса (отношение массы двигателя к его тяге) и максимально возможная лобовая тяга (отношение тяги к поперечной площади двигателя). Снижение массы двигателя, и, следовательно, удельной массы при заданной тяге достигается несколькими путями. Один из них – выбор рациональной конструктивной схемы двигателя и его основных узлов. Другим путем снижения массы двигателя является повышение качества применяемых конструкционных материалов с большой величиной удельной прочности, характеризующей отношение предела прочности материала к его плотности. Массой двигателя определяется полезная нагрузка самолета. Так, например, из практики известно, что каждый лишний 1 кг массы двигателя вызывает увеличение массы самолета примерно до 3 кг.

4. Максимально возможная экономичность, т.е. минимальный удельный расход топлива (отношение расхода топлива к тяге двигателя). Удельный расход топлива определяет основные характеристики летательного аппарата по дальности и продолжительности полета. Чем меньше топлива потребляет двигатель при данной мощности, тем он совершеннее, а самолет с таким двигателем может взять вместо излишнего топлива больше нагрузки – пассажиров, багажа, бомб или при том же запасе топлива пролететь большее расстояние.

Информационная модель двигателей для боевой авиации

Назначение самолета	Тип самолета	Взлетная масса	Модель	Модель двигателя (тип и число двигателей)
Истребители	Истребители воздушного боя	2 класс	Су-33	АЛ-31Ф (2 × ТРДФ)
		3 класс	МиГ-21бис	Р25-300 (ТРДДФ)
			МиГ-23 МЛ	Р25-300 (ТРДДФ)
	Истребители– бомбарди-ровщики	2 класс	Су-34	АЛ-31Ф-М1 (2 × ТРДДФ)
		3 класс	МиГ - 27	Р-29-300 (ТРДФ)
			Су-17	АЛ-21Ф-3 (ТРДФ)
			Су-22	АЛ-21Ф-3 (ТРДФ)
	Истребители – перехватчики	2 класс	МиГ-31	Д-30Ф6 (2 × ТРДДФ)
			МиГ-25П	Р15БД-300 (2 × ТРДФ)
		3 класс	МиГ-23П	Р25-300 (ТРДДФ)
	Многоцелевые	2 класс	Су-30	АЛ-31Ф (2 × ТРДДФ)
			Су-35	АЛ-41Ф1С (2 × ТРДДФ)
		3 класс	МиГ-29	РД-33 (2 х ТРДДФ)
			МиГ-35	РД-33МКВ (2 х ТРДДФ)
			Су-27	АЛ-31Ф (2 × ТРДДФ)
Бомбардировщики	Фронтовые	2 класс	Су-24	АЛ-21Ф-3 (2 × ТРДДФ)
			Су-34	АЛ-31Ф-М1 (2 × ТРДДФ)
	Дальние	1 класс	Ту-160	НК-32 (4 × ТРДДФ)
			Ту-22М3	НК-25 (2 × ТРДФ)
Штурмовики		3 класс	Су-25	Р-95Ш (2 × ТРД)
			Су-39	Р-195 (2 × ТРД)
Разведчики		2 класс	МиГ-25РБ	Р15БД-300 (2 × ТРДФ)
Военно-транспортные	Малые	2 класс	Ан-72	Д-36 (2 × ТРД)
		3 класс	Ан-24	АИ-24 (2 × ТВД)
			Ан-26	АИ-24ВТ (2 × ТВД)
	Средние	1 класс	Ил-76	Д-30КП (2 × ТРД)
		2 класс	Ан-12	АИ-20 (2 × ТВД)
	Тяжелые	1 класс	Ан-22 «Антей»	НК-12МА (4 × ТВД)
Противолодочные		1 класс	Ту-142М	НК-12МП (4 × ТВД)
		2 класс	Ил-38	АИ-20М (4 × ТВД)

5. Минимально возможные габаритные размеры двигателя (определяют удобство его установки на самолете). Габаритный диаметр двигателя (наибольший наружный диаметр корпуса или фланца) является весьма важной характеристикой, так как влияет на размеры гондолы двигателя, а следовательно, на ее лобовое сопротивление и массу. Малая длина двигателя также является важным показателем его качества, так как способствует уменьшению объема двигателя и повышению полезного объема на самолете при размещении двигателя.

6. Простота конструкции, технологичность в производстве, использование менее дефицитных материалов. Требование технологичности конкретизируется применительно к заданному ГТД величиной допустимой трудоёмкости его изготовления в человеко-часах и темпом снижения трудоемкости в процессе последующего серийного производства

7. Удобство в управлении, способность быстро изменять режим работы. Двигатель должен легко запускаться в любую погоду. В конструкции двигателя должна быть предусмотрена возможность удобного осмотра его и регулировки. Также авиационный двигатель должен быть приемистым, т. е. быстро и плавно увеличивать число оборотов и мощность при открывании дроссельной заслонки. Это качество двигателя весьма важно при маневрах самолета и при посадке на малые площадки, когда бывает необходимо быстро перевести двигатель с малого газа на полную мощность.

С каждым новым поколением авиационные двигатели становятся все более наукоемкими, все более сложными. Создавая конструкции двигателей, работающих на пределе термических в физических нагрузок, и обеспечивая при этом чрезвычайно жесткие требования по безопасности, надежности и весу, авиационное двигателестроение занимает лидирующее место в области высоких технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Ю.С., Бойцов А.Г., Крымов В.В. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2003. 512 с.

2. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Издательство ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1195 с.
3. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство газотурбинных двигателей / Под ред. В.В. Крымова. М.: Машиностроение-Полет, 2002. 376 с.

УДК 338.94

И.М.Иркабаев, Н.А.Сухова (ОАО НИИТ)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Развитие авиационного двигателестроения опирается на разработку и использование деталей из новых материалов, способных привести к снижению веса, повысить надежность и срок службы изделий, снизить их материалоемкость, повысить несущую способность конструкций.

К классу деталей, удовлетворяющих этим требованиям, принадлежат и изделия из композиционных материалов (КМ).

При производстве изделий из композитных материалов используются технологии, различные между собой по степени сложности, стоимости, оборудованию и т.д. Выбор той или иной технологии обусловлен в первую очередь требованиями к точности и качеству изготовления изделий из композитов, а также минимальными затратами при производстве и максимальной технико-экономической эффективностью.

Расширение спроса на изделия и конструкции из композиционных материалов сопровождается радикальными технологическими изменениями, связанными с переходом к качественно новым базовым технологиям, использующим совершенно иные виды производственного оборудования [1].

В связи с многообразием способов производства деталей из композиционных материалов, существенной разницей их стоимости решение о выборе того или иного варианта технологического процесса (ТП) изготовления должно базироваться на объективной количественной оценке.

Поэтому актуальной задачей является разработка методики комплексной оценки эффективности технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов.

Композиционные материалы (композиты) (от лат. compositio – составление) – многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или другой основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств. Использование в одном материале нескольких матриц (полиматричные композиционные материалы) или наполнителей различной природы (гибридные композиционные материалы) значительно расширяет возможности регулирования свойств композиционных материалов.

Отличие большинства композиционных материалов от традиционных материалов в том, что процесс получения композиционных материалов технологически совмещается с процессом изготовления изделия. Проектирование изделия из композиционного материала начинается с конструирования самого материала – выбора его компонентов и назначения оптимальных технологических процессов производства. Особенность создания конструкций из композиционных материалов в отличие от конструкций из традиционных материалов заключается в том, что конструирование материала, разработка технологического процесса изготовления и проектирование самой конструкции – это единый взаимосвязанный процесс.

На свойства получаемого композита существенно влияет способ его производства. В связи с многообразием конструктивных решений, существенной разницей их стоимости решение о выборе того или иного варианта технологического процесса изготовления деталей из

композиционных материалов должно базироваться на объективной количественной оценке.

Предлагаемая методика комплексной оценки эффективности технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов строится на основе количественной модели и предоставляет возможность управления входными параметрами и наблюдения за поведением выходных данных, что способствует быстрому выявлению, точной оценке проблемной ситуации и, как следствие, принятию эффективного управленческого решения и скорейшей его реализации.

Технологический процесс изготовления изделий из композиционных материалов обобщенно может быть представлен моделью, включающей:

– входные параметры X_i;

– выходные параметры Y_i.

Под входными параметрами понимаются параметры и показатели состояния технологического оборудования, оснастки, необходимой для изготовления, квалификации персонала.

Под выходными параметрами понимаются параметры и показатели, которые и определяют качественный состав изделия в результате проведенного технологического процесса. Это функциональные показатели изделия, его эксплуатационные свойства.

В частности, для определения эффективности технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов, а также выявления низкого уровня эффективности количественная модель выглядит следующим образом:

$$K_{эфi} = \frac{\sum_{j=1}^{7} Y_{ij} b_j}{\sum_{k=1}^{3} X_{ik} b_k},$$

где Y_{ij} – j-ый выходной показатель i-го технологического процесса;

b_i – коэффициент весомости j-ого выходного показателя;

X_{ik} – k-ый входной показатель i-го технологического процесса;

b_k – коэффициент весомости k -ого выходного показателя.

Определение показателей технологического процесса (ТП) изготовления деталей авиационной техники из композиционных

материалов (табл.1) производится на основе анализа конструкции деталей с учетом принятого способа их изготовления и вида материала. Номенклатура показателей и соответствующие весовые коэффициенты для деталей, изготовленных из композиционных материалов, представлена в табл.1.

Таблица 1

Показатели ТП изготовления деталей из КМ

Наименование показателя	Обозначение	Весовые коэффициенты
Входные параметры		
Показатель необходимого технического уровня оборудования	$X_{об}$	0,45
Показатель необходимого технического уровня оснастки	$X_{осн}$	0,35
Показатель необходимого уровня квалификации персонала	$X_{кв}$	0,20
Выходные параметры		
Показатель весового совершенства конструкции	$Y_{м}$	0,2
Показатель сложности конструкции детали	$Y_{сл}$	0,1
Показатель обеспечения жесткости конструкции	$Y_{жест}$	0,25
Показатель обеспечения прочности конструкции	$Y_{пр.к}$	0,3
Показатель стабильности параметров техпроцесса	$Y_{стаб}$	0,1
Показатель производительности технологического процесса	$Y_{пр}$	0,05

По результатам расчетов коэффициентов эффективности технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов формируется оценочное суждение об уровне технических решений, характерных для технологического оснащения конкретного предприятия.

С целью поиска узких мест при сравнительной оценке нескольких вариантов технологических процессов изготовления

деталей из композиционных материалов строится профиль анализируемых технологических процессов (рис.1).

Показатели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Весовое совершенство конструкции										
Сложность конструкции детали										
Обеспечение жесткости конструкции										
Обеспечение прочности конструкции										
Стабильность параметров ТП										
Производительность ТП										
Технический уровень необходимого оборудования										
Технический уровень необходимой оснастки										
Необходимый уровень квалификации персонала										

Рис.1. Профиль анализируемых технологических процессов

При построении профиля анализируемых технологических процессов присвоение баллов по каждому показателю базируется на использовании возможного профиля полярности, представленного в табл. 2.

Таблица 2

Возможный профиль полярности

Показатели	Положительный	Негативный
Весовое совершенство конструкции	– безотходная технология; – при наличии отходов они перерабатываемые и безвредные	- отходы превышают вес детали; - реализация ТП сопровождается образованием неперерабатываемых отходов; - реализация ТП сопровождается образованием вредных отходов

Продолжение табл.2

Показатели	Положительный	Негативный
Сложность конструкции детали	– изготовление деталей сложной пространственной конфигурации; –ТП не требует разделения изделия на отдельные части, соединяемых впоследствии сваркой, склеиванием	– изготовление деталей простой конфигурации; – ТП обеспечивает получение только определенного типа деталей (круглых, плоских и т.д.)
Обеспечение жесткости конструкции	– ТП обеспечивает направление волокон, структуры, увеличивающих жесткость конструкции	–ТП не обеспечивает необходимую жесткость изделия вследствие необеспечения стабильности направляющих волокон, изменения структуры
Обеспечение прочности конструкции	–ТП обеспечивает 100%-ную повторяемость результатов испытаний; –при выполнении ТП не образуются внутренние дефекты, напряжения; - при выполнении ТП свойства улучшаются	–отсутствует повторяемость результатов испытаний; –при выполнении ТП образуются внутренние дефекты, напряжения –при выполнении ТП свойства ухудшаются
Стабильность параметров ТП	– 100%-ная повторяемость деталей по параметрам, заложенным в технические требования чертежа (точность, шероховатость и т.д.); – выполнение технических требований чертежа не зависит от квалификации персонала	–ТП не обеспечивает повторяемость деталей по параметрам, заложенным в технические требования чертежа; –реализация ТП зависит от квалификации персонала
Производительность ТП	–ТП обеспечивает возможность полной автоматизации и механизации	ТП исключает возможность автоматизации и механизации(100% ручной труд)
Технический уровень необходимого оборудования*	ТП предусматривает: – использование универсального оборудования –использование станков с ЧПУ, обрабатывающих центров	ТП предусматривает: – использование специального и специализированного оборудования – ручной труд

Окончание табл.2

Показатели	Положительный	Негативный
Технический уровень необходимой оснастки*	– реализация ТП не предусматривает изготовление специализированной высокоточной оснастки	ТП предусматривает: –изготовление специализированной высокоточной оснастки – изготовление оснастки из труднообрабатываемых материалов
Необходимый уровень квалификации персонала*	– реализация ТП не требует высокий уровень квалификации персонала	– реализация ТП требует высокий уровень квалификации персонала
Примечание.* – Значение в профиле получается путем вычитания из десяти значения данного показателя в баллах по мнению экспертов.		

Таким образом, разработанная методика комплексной оценки эффективности технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов позволяет решать следующие задачи проектирования:

1. Количественно оценивать технологические процессы изготовления деталей из композиционных материалов.
2. Выбирать наиболее эффективные варианты технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов на основе инженерного анализа технико-экономических параметров сравниваемых вариантов.
3. Выявлять узкие места в технологических процессах изготовления деталей из композиционных материалов.
4. Разрабатывать рекомендации по повышению технико-экономической эффективности технологических процессов изготовления деталей из композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Меморандум об образовании Технологической платформы «Индустрия конструкций из композиционных материалов» г.Москва,2010. URL: http://www.tsagi.ru/old2/rus/events/memorandum2

2. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы: Справочник/ Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

УДК 658.3.018

А.А.Бибин, Р.Р.Невьянцева, О.Г.Смольникова (УГАТУ)

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ЖАРОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

В процессе проведения восстановительного ремонта лопаток газовых турбин, используемых в составе газоперекачивающих агрегатов, наиболее актуальной проблемой является удаление дефектного покрытия с целью обеспечения последующего ресурса деталей. Лопатки турбины ремонтируемых агрегатов чаще всего покрывают покрытиями алюминидного типа. Их удаление в ремонтном производстве проводят с использованием химического метода, в ходе которого лопатки погружают в раствор определенного состава и выдерживают в нем до полного снятия покрытия. При серийном освоении технологии ремонта возникает ряд проблем, связанных не только с определением оптимального состава травильного раствора, обеспечивающего минимальное растравливание поверхности жаропрочного сплава лопаток, но и с прогнозированием длительности их обработки.

Цель данной работы – рассмотрение некоторых особенностей построения системы прогнозирования производительности химического удаления алюминидных покрытий с лопаток турбины газоперекачивающих агрегатов.

В работе исследовались лопатки из промышленных никелевых сплавов, серийно применяемых для производства лопаток турбины различных типоразмеров. Для защиты лопаток от воздействия агрессивной высокотемпературной газовой среды на их трактовую

поверхность было нанесено жаростойкое покрытие алюминидного типа толщиной от 30 до 60 мкм. В экспериментах использовали лопатки, прошедшие полный технологический цикл производства. С целью изучения особенностей удаления покрытия из деталей вырезались образцы, с одной стороны которых изготавливали шлиф для изучения микроструктуры поверхностного слоя. Химическое удаление покрытия проводили в растворе запатентованного состава [1]. Водный раствор травления представлял собой смесь неорганических кислот (азотной и соляной) и двух добавок (гептамолибдата аммония и бихромата калия). С целью изучения динамики удаления покрытия в ходе травления проводили измерение бестокового электродного потенциала поверхности относительно хлорид-серебряного электрода сравнения [2]. Для получения информации о состоянии поверхностного слоя обрабатываемых образцов проводили их металлографическое исследование с использованием оптической и растровой электронной микроскопии. Дополнительно перед обработкой образцов выполняли микрорентгеноспектральный анализ с использованием энергодисперсионного анализатора.

При разработке системы прогнозирования производительности обработки в качестве основного параметра была выбрана длительность процесса травления, выражаемая в часах или минутах. Определение длительности травления (τ) может быть проведено с использованием скорости удаления покрытия (V, мкм/мин), если при этом перед проведением ремонта известна его исходная толщина (h, мкм), т.е. $\tau = h/V$. При проведении экспериментов определение длительности травления и, соответственно, скорости удаления покрытия лимитируется трудностями в установлении точного времени, когда произошло полное удаление покрытия.

Согласно данным работ [2, 3] определение времени полного удаления алюминидного покрытия с высокой степенью точности можно проводить путем измерения бестокового электродного потенциала поверхности. Для примера на рис. 1 показан характерный вид кривой «электродный потенциал поверхности – время обработки», на котором видно, что в некоторый момент времени происходит резкое изменение потенциала поверхности. Данный момент времени соответствует времени полного удаления покрытия,

что позволяет использовать его в качестве критерия останова процесса травления. Подход, основанный на измерении электродного потенциала в ходе обработки, позволяет определять длительность травления только непосредственно при реализации процесса съема покрытия, но неприемлем для прогнозирования времени обработки на этапе проектирования технологического процесса ремонта лопаток турбины.

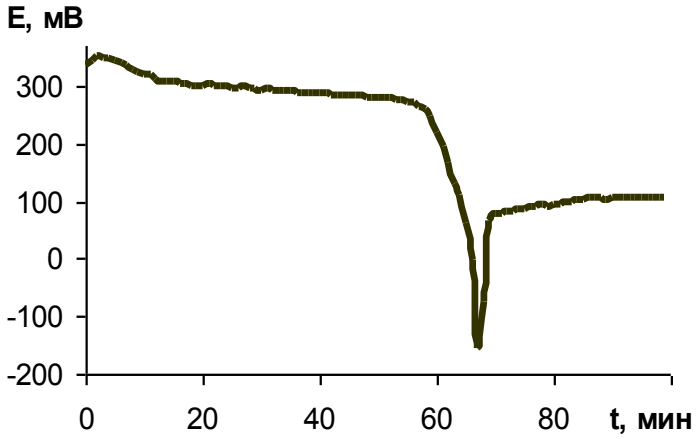


Рис. 1. Вид динамики электродного потенциала поверхности в процессе удаления алюминидного покрытия с поверхности никелевого сплава типа ЖС

Алюминидное покрытие, как объект ремонта, представляет собой сложную гетерофазную систему. По данным металлографического исследования в большинстве случаев алюминидные покрытия, нанесенные на поверхность жаропрочного никелевого сплава, имеют практически одинаковое структурно-фазовое состояние. Так, все жаростойкие алюминидные покрытия характеризуются двухзонным строением, при этом внутренняя зона образуется за счет диффузионного взаимодействия элементов наносимого покрытия с компонентами защищаемого сплава (рис. 2). Во всех случаях основа внешней зоны представлена алюминидными фазами β-NiAl (~ 70…75 %) и γ′-Ni_3Al. Внутренняя зона покрытий также состоит из соединений β-NiAl и γ′-Ni_3Al. Легирующие элементы, диффундирующие из сплава в покрытие в процессе его формирования, незначительно легируют алюминидные фазы и в основном формируют собственные фазы: твердый раствор на основе α-Cr во внешней зоне и карбиды хрома, титана, вольфрама,

молибдена – во внутренней. В случае, если в состав насыщающей смеси или напыляемого слоя входил кремний, то кроме указанных фаз во внешней зоне покрытия происходило образование силицидов тугоплавких элементов и дополнительное легирование алюминидов никеля кремнием.

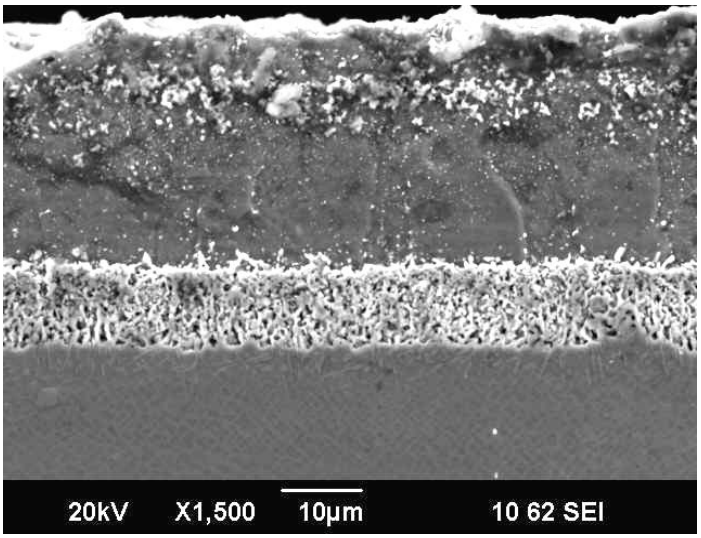


Рис. 2. Структура жаростойкого алюминидного покрытия на никелевом сплаве типа ЖС

Анализ данных, полученных при металлографическом исследовании, показывает, что основными элементами покрытия являются никель и алюминий, а другие элементы (хром, вольфрам, титан, молибден, кремний, кобальт) являются легирующими. Жаропрочные сплавы имеют различный химический состав, что оказывает значительное влияние на содержание элементов в формируемом защитном покрытии и на скорость его съема при удалении химическим методом. Изучение зависимости скорости удаления алюминидных покрытий от их химического состава представлено в работе [4]. Авторами показано, что основное влияние на скорость съема покрытия оказывают никель, алюминий и хром: с возрастанием концентрации никеля и хрома скорость увеличивается, а с повышением содержания алюминия – снижается. Другие элементы покрытия в пределах исследованных концентраций на скорости съема не сказываются.

Математическая обработка данных, полученных в работе [4], позволила получить зависимость скорости съема покрытия V, мкм/мин от концентрации никеля, алюминия и хрома следующего вида:

$$V = - 0{,}14 + 0{,}04 \cdot C - 0{,}004 \cdot C^2, \quad (1)$$

где C – это параметр, зависящий от содержания в покрытии никеля, алюминия и хрома

$$C = \frac{C_{Cr} \times C_{Ni}}{C_{Al}} \ ,$$

где C_{Cr}, C_{Ni} и C_{Al} – концентрация хрома, никеля и алюминия в покрытии соответственно. Все концентрации представлены в весовых процентах. Полученная модель обладает адекватностью на уровне R^2=0,94.

Аналогичное решение для случая, когда анализируются только два элемента (хром и алюминий), показало следующую зависимость:

$$V = - 0{,}1 + 2{,}09 \cdot C_{\text{отн}} - 0{,}97 \cdot C_{\text{отн}}^{\ 2}, \quad (2)$$

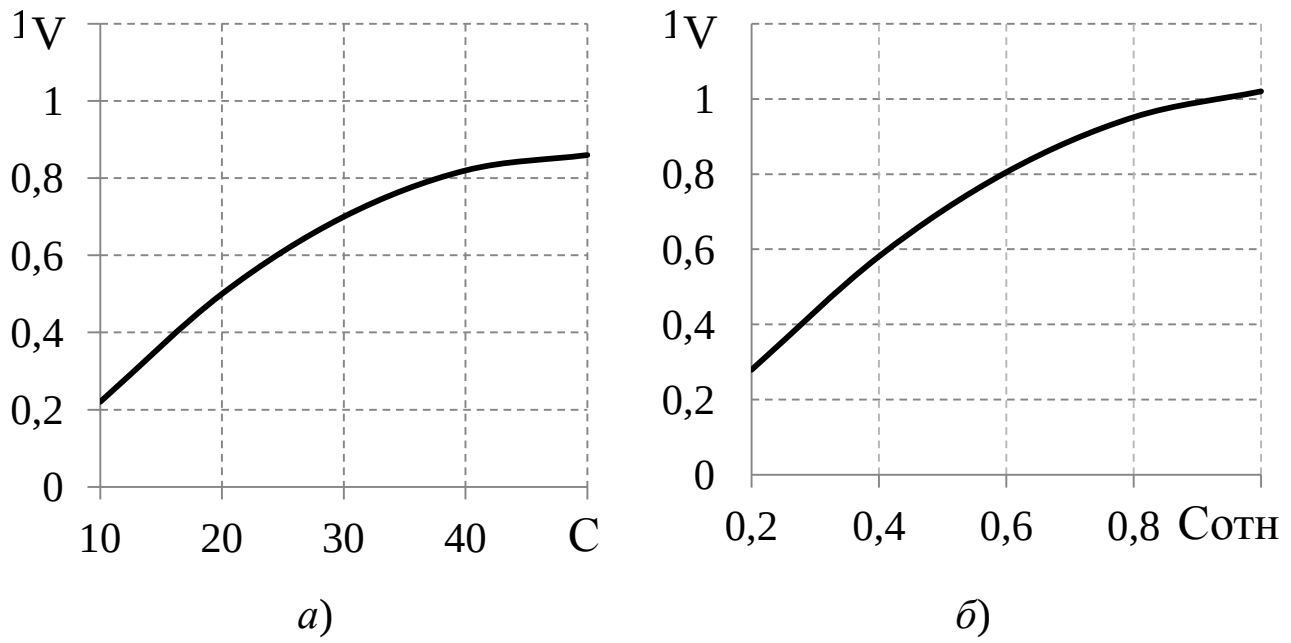
где $C_{\text{отн}}$ – это параметр, зависящий от содержания в покрытии хрома и алюминия

$$C_{отн} = \frac{C_{Cr}}{C_{Al}} \ .$$

Данная модель обладает адекватностью на уровне R^2=0,96.

Графическое изображение полученных зависимостей представлено на рис. 3.

Анализ данных, представленных на рис. 3, показывает, что для обеих моделей характерен аналогичный вид кривых, описываемых квадратичной зависимостью. Кроме того, они обладают практически одинаковой адекватностью. Учитывая данный факт, для построения системы прогнозирования длительности обработки целесообразным является использование зависимости (2) в виду содержания в ней всего двух параметров: концентрации в покрытии хрома и алюминия.



а) *б*)

Рис. 3. Зависимость скорости съема алюминидного покрытия V, мкм/мин от параметров C (а) и $C_{отн}$ (*б*)

Объем проведенных исследований позволил разработать структурную блок-схему, показывающую функционирование системы прогнозирования производительности съема алюминидного покрытия с поверхности жаропрочных сплавов. Данная блок-схема приведена на рис. 4.

На начальном этапе система предусматривает идентификацию покрытия, что предполагает металлографическое исследование соответствующих образцов, вырезанных из лопатки турбины. На данном этапе сначала устанавливается соответствие покрытия нормативным значениям по толщине, составу, структуре и т.д., а затем решается вопрос: относится ли изучаемое покрытие к классу алюминидных. Если да, то дальнейшие работы могут быть продолжены, если нет – необходимо экспертное решение о допустимости ремонта деталей с покрытием, не относящимся к алюминидным. В случае положительного решения при проведении металлографического анализа требуется не только определить суммарную толщину алюминидного покрытия, но и толщины его отдельных структурных зон: внешней и внутренней (диффузионной). Другой необходимой информацией, собираемой на начальном этапе, является также определение содержания в покрытии хрома и алюминия. Данная процедура предполагает проведение

микрорентгеноспектрального анализа и установление количественных значений указанных элементов в весовых процентах. Определение концентрации хрома и алюминия позволяет рассчитать безразмерный коэффициент *C*, на основании которого будет проводиться определение времени съема покрытия химическим методом.

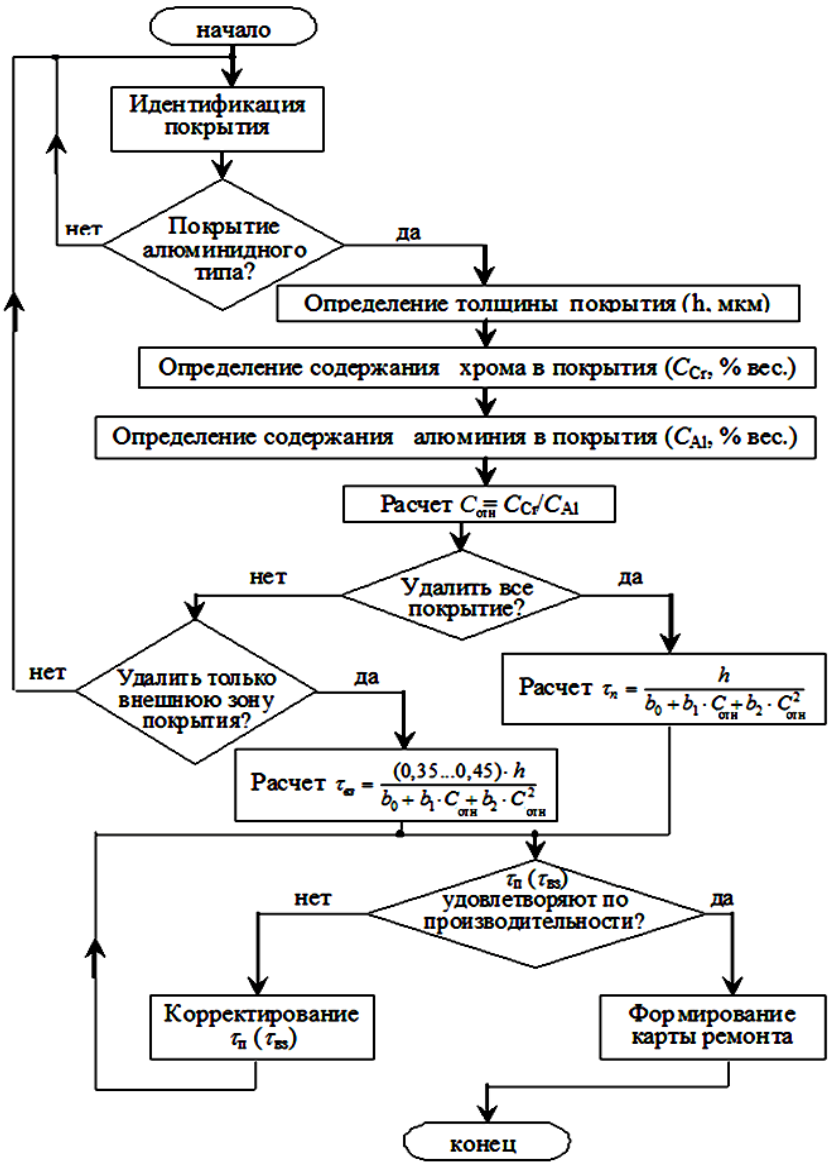


Рис.4. Блок-схема системы прогнозирования производительности удаления алюминидного покрытия с поверхности никелевого сплава типа ЖС

Следующий этап предполагает процедуру решения вопроса о необходимости удаления всего покрытия в целом или только его внешней зоны. Последний вариант возникает в случае утонения

стенки лопатки до критических значений, ниже которых происходит падение прочности материала. Дальнейшие действия связаны с расчетом длительности травления покрытия или его части по формулам, в которых учитывается суммарная толщина покрытия, безразмерный коэффициент *C* и коэффициенты, определенные в ходе регрессионного анализа.

На последнем этапе выполняется экспертная оценка приемлемости вычисленного значения времени травления. В случае удовлетворительного решения проводится автоматизированное оформление карты ремонта с указанием технологических режимов обработки деталей. При неудовлетворительном решении требуется корректировка времени обработки с учетом опыта ремонта лопаток с аналогичным покрытием. Такую процедуру рекомендуется выполнять с привлечением нескольких экспертов.

Таким образом, на основании комплекса проведенных исследований была построена регрессионная модель, показывающая зависимость скорости удаления покрытия алюминидного типа от содержания в нем хрома и алюминия. Для автоматизированного расчета длительности обработки ремонтных лопаток предложена система прогнозирования производительности, представленная в виде блок-схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смыслов А.М., Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р. и др. Патент № 2339738 РФ. Способ удаления жаростойкого покрытия с деталей из жаропрочных никелевых сплавов; заявл. 27.03.2007; опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33.1с.
2. Парфенов Е.В., Невьянцева Р.Р., Сосновский Д.А. Компьютерный измеритель электродного потенциала на базе стандартного игрового порта // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 1. С. 154 – 155.
3. Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р., Быбин А.А. , Смольникова О.Г. Роль электродного потенциала поверхности при изучении процесса удаления алюминидного покрытия с рабочих лопаток турбины ГПА // Вестник УГАТУ, 2003. Т. 4, № 2. С. 143 – 146.
4. Смыслов А.М., Быбин А.А., Невьянцева Р.Р., Смольникова О.Г. Влияние химического и фазового состава на процесс удаления алюминидных покрытий с рабочих лопаток турбины химическим методом // Авиационно-космическая техника и технологии. Харьков: Харьковский авиационный институт, 2010. № 4. С. 102 – 107.

УДК 65.011.56

Ю.И.Заянчковский (ЦКС “БАСК”)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УКП-2008 ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ГТД

Информационно-измерительная система на базе устройства УКП-2008 разработана специалистами ООО «ЦКС«БаСК» на основании ТЗ ОАО «НПП «Мотор». Система предназначена для измерения, обработки, отображения и регистрации параметров авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения при их стендовых испытаниях на установившихся и неустановившихся режимах работы. Система с октября 2011г. находится в эксплуатации на испытательной станции ОАО «НПП «Мотор».

Применение системы позволило организовать высокоэффективный быстродействующий процесс измерения, обработки и анализа накопленной информации в темпе испытаний.

Основными технико-экономическими показателями, характеризующими эффективность внедрения системы УКП-2008 в технологический процесс стендовых испытаний ГТД, являются:

– сокращение времени испытаний и отладки изделий;

– оперативный контроль состояния как испытываемого ГТД, так и измерительных каналов системы и стендового оборудования;

– сокращение времени и трудоёмкости на периодическую поверку и метрологическую аттестацию измерительных каналов системы;

– повышение пропускной способности испытательного стенда на *10*%;

– экономия топливно-энергетических ресурсов (до *8000* кг. топлива) на проведение испытаний одного изделия;

– снижение трудоёмкости испытаний на *14-15*%;

– сокращение (исключение) затрат на приобретение новых приборов для регистрации параметров ГТД на неустановившихся режимах работы;
– повышение точности и достоверности измерения и оценки параметров ГТД при стендовых испытаниях и, в конечном итоге, повышение качества выпускаемых изделий;
– улучшение экологической обстановки в районе испытательной станции за счёт сокращения общего времени испытаний и уменьшения выбросов в атмосферу;
– выдача в темпе испытаний информации, необходимой операторам для управления процессом испытания, регулировки параметров и управления изделием;
– обеспечение санкционирующей обратной связи на процесс производства и сборки двигателей;
– накопление, хранение и документирование информации о результатах контроля параметров ГТД и пр.

Указанные показатели внедрения УКП-2008 подтверждаются соответствующими расчетами, приведенными ниже, и данными эксплуатации системы на стенде. Примечание: количественные значения использованных в расчете параметров, исходя из требований конфиденциальности, условные, хотя и отражают реальные значения.

Расчёт значений показателей внедрения системы УКП-2008

1. Внедрение УКП-2008 с гарантированной по ТЗ и высокой точностью измерения параметров на установившихся режимах позволяет исключить необходимость повторного измерения значений параметров ГТД ориентировочно на $\Delta \mathbf{t_i}$ = 2 минуты на каждой из $\mathbf{N_{КТ}}$=15 контрольных точек. Сокращение времени измерения параметров на каждый двигатель составит

$$\mathbf{C_1 = \Delta t_i * N_{КТ} = 30} \text{ минут} = \mathbf{0,5} \text{ часа}$$

2. Программное обеспечение УКП-2008 выполняет обработку, в реальном масштабе времени, результатов измерений параметров согласно заложенной в память модели ГТД и исключает потери времени на их математическую и графическую (расшифровку осциллограмм и т.п.) обработку.

Для установившихся режимов сокращение времени составляет $\Delta t_{КТ} = 1$ минуту на каждую контрольную точку.

Для неустановившихся (переходных) режимов сокращение времени составляет $\Delta t_{ПЕР} = 2$ минуты на каждый переход.

Общее сокращение времени на обработку результатов измерений во время испытания одного двигателя при количестве контрольных точек $N_{КТ} = 15$ и переходов $N_{ПЕР} = 15$ составит

$$C_2 = \Delta t_{КТ} * N_{КТ} + \Delta t_{ПЕР} * N_{ПЕР} = 0{,}75 \text{ часа.}$$

3. Наличие в УКП-2008 программной поддержки метрологического обеспечения (аттестации и поверки) измерительных каналов позволяет сократить время на подготовку информационно-измерительной системы и стенда к испытаниям в среднем на $\Delta t_{мо} = 1$ минуту на каждый измерительный канал. При общем числе градуируемых измерительных каналов $N_{ИК} = 144$ сокращение времени подготовки системы и стенда к испытаниям составит

$$C_3 = \Delta t_{МО} * N_{ИК} = 2{,}5 \text{ часа.}$$

4. Сокращение времени подготовки и проведения испытаний одного двигателя при внедрении УКП-2008 составит

$$\Delta T_{ИСП} = C_1 + C_2 + C_3 = 3.75 \text{ часа.}$$

При общем существующем времени испытания одного двигателя (с начала и до конца испытаний) $T_{ИСП}$=36часов, это позволяет сократить потребление энергоресурсов и повысить пропускную способность стенда на ***10,4 0%.***

При стоимости одного часа занятости стенда $S_{СТ}$=10,0 тыс. руб. экономия по этому показателю составит

$$C_4 = \Delta T_{ИСП} * S_{СТ} = 37{,}5 \text{ тыс. руб.}$$

5. Сокращение «горячего» времени испытаний позволяет сократить расход топлива. При среднечасовом расходе топлива **G**ч=*8000* кг и общем сокращении времени $\Delta t_{ГОР} = C_1 + C_2 = 1{,}25$ часа экономия топлива составит $\Delta G = 8000 * \Delta t_{ГОР} = 10000$ кг, что при цене топлива $S_{ТОП}$=8,0 тыс. руб. за тонну даёт экономию

$$C_5 = \Delta G * S_{ТОП} = 80{,}0 \text{ тыс. руб.}$$

6. Кроме того, сокращение общего времени испытаний на $\Delta T_{ИСП}$ = **3,75 часа** одного двигателя при нормативе $C_{НОРМ}$= 80 н/часов (при штатной численности бригады испытателей 3 человека) ведёт к снижению трудоёмкости испытаний на **14%.**

7. Внедрение УКП-2008 со встроенной цифровой регистрацией параметров на переходных режимах исключает необходимость приобретения нового светолучевого шлейфового осциллографа типа МИГ стоимостью $\mathbf{S_{ОСЦ}}$=300,0 тыс. руб. При пересчете на один год эксплуатации при 5-летнем сроке службы экономия составит

$$\mathbf{C_7 = S_{ОСЦ} / 5 = 60,0} \text{ тыс. руб.}$$

8. Наличие в УКП-2008 резервных измерительных каналов (50% сверх требований технического задания ТЗ) позволяет оперативно перестраивать систему и испытательный стенд на измерение параметров новых ГТД без необходимости приобретения дополнительных средств измерений и последующей их метрологической аттестации. Стоимость современного технического средства (устройства) на 58 каналов на базе модулей Dataforth (без монтажа, отладки и метрологической аттестации) составляет **14500 $**, т.е. 450,0тыс.руб., что в пересчете на один год эксплуатации дает экономию

$$\mathbf{C_8 = 90,0} \text{ тыс. руб.}$$

9. Сокращение «горячего» времени испытаний на $\Delta\mathbf{t_{ГОР}}$= 1,25 часа при общем времени испытаний $\mathbf{T_{ИСП}}$= 36 часов на один двигатель позволяет улучшить экологическую обстановку в районе испытательной станции ОАО “НПП “Мотор” и снизить объём выбросов продуктов сгорания в атмосферу на 3,5 %.

Таким образом, при общем (условном) числе испытываемых за год двигателей на данном стенде **N**=*10,* экономический эффект от использования УКП-2008 на испытание одного ГТД составляет

$$\mathbf{C_{Э1} = C_4 + C_5 + (C_7 + C_8) / N = 132,5} \text{ тыс. руб.}$$

При этом общий годовой экономический эффект от внедрения системы на базе УКП-2008 только по основным показателям, не считая иных технических (гибкая модульная структура, высокая адаптивность, дружественный интерфейс, повышенный ресурс 10 – 15 лет, эргономика, дизайн и др.) и экологических преимуществ, составит

$$\mathbf{C_{ЭФ} = C_{Э1} * N = 1325,0} \text{ тыс. руб.}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Заянчковский Ю.И., Уразбахтина Л.Б. Автоматизация процессов контроля и испытаний газотурбинных двигателей и установок, их узлов и агрегатов//Наука – производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып.1. Уфа: НИИТ, 2002. С.47 -59.

2. Арсентьев В.С., Заянчковский Ю.И. Автоматизированная система стендовых испытаний ГТД // Наука - производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып.2. Уфа: НИИТ, 2003. С.42 -50.

3. Заянчковский Ю.И., Арсентьев В.С. и др. Устройство модели УКП-2008 для контроля параметров ГТД// Наука – производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып.6. Уфа: Издательство «Гилем», 2011. С.129 -143.

Раздел II

ТЕХНОЛОГИЯ АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

УДК 621.923

В.Л. Юрьев, С.В. Старочкина, С.В. Перлов, И.С.Ковалев,
В.Д. Кондратец, Г.С. Борисов, М.Г. Закиров (ОАО НИИТ)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СТАНКА МОДЕЛИ 4СЭШ-360П4 ДЛЯ АЛМАЗНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД

Постоянное совершенствование технических характеристик изделий, повышение требований к их ресурсу неотъемлемо влечет за собой усложнение конструкции деталей, повышение требований к их точности и качеству изготовления, использование перспективных материалов, что приводит к снижению производительности обработки на существующем оборудовании. Для реализации заданных требований необходимо создание перспективной технологии, специализированного оборудования и инструмента способных обеспечить необходимое качество обработанных поверхностей и повышение производительности обработки.

Одним из перспективных технологических методов обработки деталей из труднообрабатываемых материалов (в частности, жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов и интерметаллидов на основе титана и никеля) является алмазное электрохимическое шлифование (АЭХШ), представляющее собой комбинированный процесс, при котором материал снимается в результате одновременно протекающих процессов: анодного растворения, механического резания алмазными или абразивными зернами и электроэрозионных

явлений при подключении детали и инструмента к источнику технологическоготока (круг – катод, деталь – анод) [1]. Шлифование токопроводящими алмазными абразивными кругами обеспечивает значительный рост производительности обработки, снижение затрат и повышение эффективности процесса при достижении требуемых параметров качества обработанной поверхности. Съем металла при АЭХШ происходит в результате протекания электрохимического процесса и механической работы круга, производимой зернами алмаза или абразива, которые удаляют продукты анодного растворения и срезают обрабатываемый материал, а также исполняют роль депассиваторов, разрушая и удаляя пленку окислов металла, образующуюся на поверхности детали, и снижают силы резания, что благоприятно сказывается на поверхностном слое детали.

Для шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов применяются алмазные, реже абразивные, круги на металлических связках. При использовании кругов на металлических связках возможно шлифование с электрохимической правкой круга. В этом случае устанавливается дополнительный катод, который разрушает связку круга, восстанавливая исходный профиль. При изменении полярности электродов (круг-анод, деталь-катод), так называемая обратная полярность, происходит растворение металлической связки круга. Процесс АЭХШ характеризуется интенсивным самозатачиванием, снижением силы резания, температуры в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью, вследствие чего повышается качество обработанной поверхности и возрастает производительность обработки.

Создание технологического процесса и специализированного станка с числовым программным управлением (ЧПУ) для высокопроизводительного АЭХШ труднообрабатываемых материалов, отвечающего поставленным условиям, позволит увеличить производительность, снизить объем ручных работ, повысить уровень автоматизации производства при обеспечении требуемого качества продукции.

Разработан специализированный электрохимический шлифовальный станок (рис. 1, 2, 3) модели 4СЭШ-360П4, который предназначен для выполнения операций шлифования деталей абразивными (в том числе алмазными) шлифовальными кругами на

металлической связке диаметром от 80мм до 200мм. На станке возможна обработка деталей, имеющих сложнопрофильные поверхности типа лопаток ГТД, кулачков, эксцентриков и т.д. диаметром до 200мм, длиной до 360мм из коррозионностойких сталей и сплавов, титановых сплавов, жаропрочных никелевых сплавов, интерметаллидных сплавов на основе титана и никеля.

Рис.1. Опытный образец станка модели 4СЭШ-360П4

Станок–четырёхкоординатный имеет продольное поступательное движение заготовки по координате X, поперечное поступательное движение инструмента по координате Y, круговое движение заготовки вокруг её продольной оси по координате A, поворот инструмента по координате B вокруг оси Y.

Станок позволяет реализовывать поперечную и продольную схемы обработки деталей, что весьма актуально при обработке деталей малой жесткости.

Основные технические параметры станка представлены в табл. 1.

Станина 1 (рис.2) является основным несущим элементом станка. Станина состоит из передней и задней частей, верхние базовые плоскости которых выполнены для крепления направляющих стола и салазок.

Таблица 1

Наименование показателей	Параметры
1 Класс точности по ГОСТ 8-8	П
1.1 Суммарное отклонение размеров, заданной формы и расположения, мм, не более	0,05
1.2Шероховатость обрабатываемой поверхности Ra, не более	1,25
2 Заготовка, обрабатываемая на станке	
2.1 Предельные размеры заготовки, мм – длина – диаметр	 360 200
2.2 Наибольшая масса заготовки, кг	10
2.4 Материал заготовки	коррозионностойкие стали и сплавы, титановые сплавы, жаропрочные никелевые сплавы, интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля
3 Инструмент	
3.1 Вид	абразивный шлифовальный круг
3.2 Диаметр, мм – наименьший – наибольший	 80 250
3.3 Наибольшая ширина круга, мм	40
4 Шпиндель станка	
4.1 Количество шпинделей, шт.	1
4.2Частота вращения шпинделя инструмента, об/мин	1500…7500
4.3 Регулирование частоты вращения	бесступенчатое
5 Управляемые и установочные перемещения исполнительных органов	
5.1Количество управляемых перемещений, шт.	4
5.2Количество одновременно управляемых перемещений, шт.	3
5.3Наименование и обозначение управляемых перемещений – продольное детали – поперечное инструмента – круговое детали – угловое инструмента	 X Y A B

Окончание табл.2

Наименование показателей	Параметры
X рабочая, мм/мин	6 000
Y рабочая, мм/мин	6 000
A рабочая, мин-1	10
B установочная, град./мин	3 600
X ускоренная, мм/мин	15 000
Y ускоренная, мм/мин	15 000
5.5 Количество установочных перемещений исполнительных органов	2
5.6 Наименование и обозначение перемещений систем измерения	
– вертикальное измерителя круга	Z1
– вертикальное измерителя заготовки	Z2
6.Максимальные характеристики источника технологического тока	
6.1 Напряжение, В	35
6.2 Сила тока, А	200
7 Силовая характеристика	
7.1 Наибольшие крутящие моменты, Нм	
– привода вращения А	15
– привода подачи X	25
– привода подачи Y	25
– привода вращения В	15
7.2Наибольшая суммарная потребляемая мощность, кВт	15
7.2 Расход СОТС, л/мин	5…40
7.3 Объем емкости СОТС не менее, л	190
8 Габариты и масса станка, не более	
– длина, мм	3000
– ширина, мм	2800
– высота, мм	2200
– общая площадь станка, $м^2$	9
– общая масса, т	10

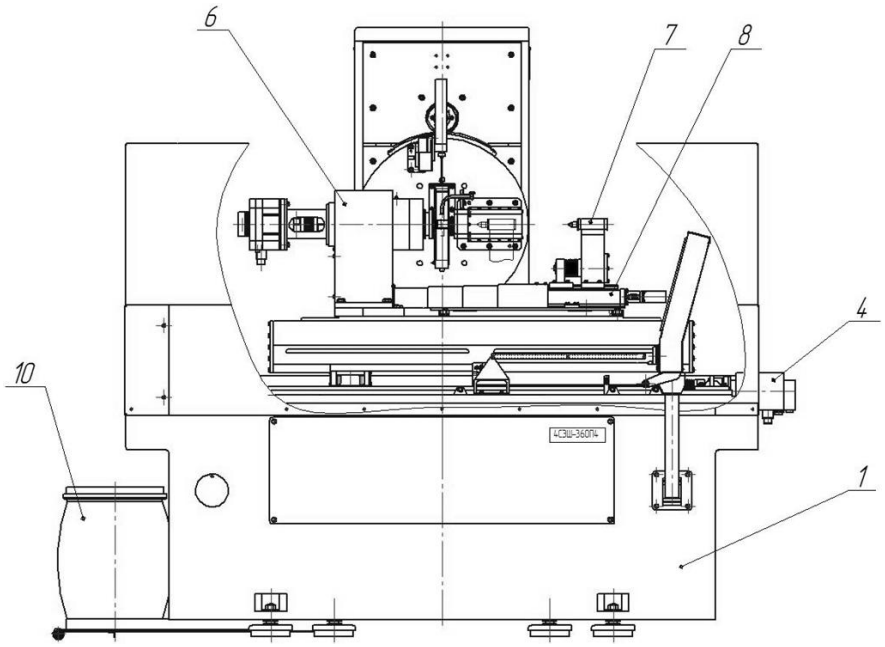


Рис. 2. Вид станка спереди

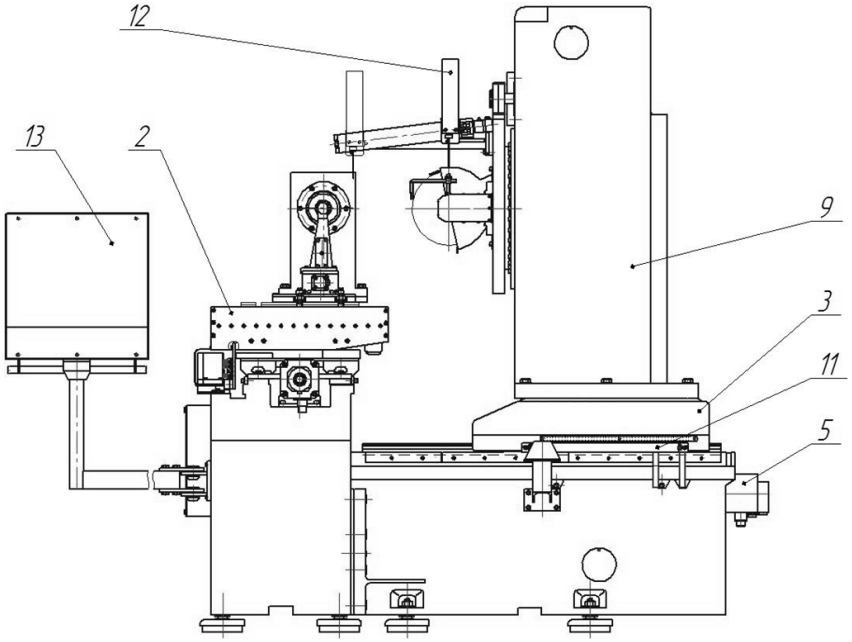


Рис. 3. Вид станка сбоку

На передней части станины на продольных направляющих качения смонтирован стол 2, а на задней части станины на таких же направляющих смонтированы салазки 3. Стол и салазки предназначены для обеспечения поступательных перемещений обрабатываемой детали и инструмента по взаимно-перпендикулярным координатам X и Y. Направляющие качения –

рельсовые с шариковым сепаратором, позволяющие достичь высоких скоростей и точности перемещения исполнительных органов, плавное движение, низкий уровень шума при работе. Приводы стола 4 и салазок 5 (рис.2) состоят из серводвигателя со встроенным редуктором, сильфонной муфты и шарико-винтовой пары, установленной в подшипниковые опоры. Передачи выполнены безлюфтовой конструкции.

На горизонтальной плоскости стола установлены левая 6 и правая 7 бабки (рис.2).

Бабка левая предназначена для круговой подачи детали по координате А, представляет собой конструкцию в виде корпуса с установленным в нем горизонтально-шпиндельным валом, вращение которого производится серводвигателем через сильфонную муфту. Шпиндельный вал электрически изолирован в местах его опор, а подвод электрического потенциала производится через щёточный узел, расположенный внутри корпуса бабки. Вал шпинделя оснащен датчиками нулевого положения шпинделя и энкодером отсчета угловых положений.

Бабка правая предназначена для поджима заготовки и её фиксации в осевом положении центром. Она смонтирована на линейном приводе 8 с возможностью перемещения вдоль стола по координате X. На линейном приводе расположены две каретки, на одной из которых располагается непосредственно центр, а другой кареткой через пружину производится поджим центра к заготовке с заданным усилием. Усилие поджима фиксируется электронным динамометром и может задаваться системой ЧПУ.

Головка шлифовальная 9 (рис.3) установлена на салазках и предназначена для приведения во вращательное движение шлифовального круга с обеспечением необходимой мощности резания. Состоит из двух частей: привода главного движения, представляющего собой асинхронный электродвигатель и зубчатоременную передачу, и привода углового перемещения B вокруг оси Y, состоящего из серводвигателя и зубчатой передачи поворота. Центры масс двигателя, шлифовального круга и привода углового перемещения расположены в одной плоскости, что позволяет избежать излишних нагрузок на серводвигатель. Отказ от использования мотор-шпинделя связан с невозможностью его

применения при реализации электрохимического процесса вследствие возникновения блуждающих токов, нарушающих его работу. Шпиндель шлифовального круга также электрически изолирован от массы станка, как и вал левой бабки.

Направляющие защищены от попадания влаги и грязи кожухами, а рабочая зона ограничена рабочей камерой (не показаны).

Станок снабжён устройством очистки шлифовального круга, расположенным внутри корпуса шлифовальной бабки и предназначенным для электрохимической очистки и правки шлифовального круга. Очистка круга осуществляется в автоматическом режиме при обратной полярности от источника тока 4ТИП-1МП.

Система охлаждения 10 состоит из 4-х пластиковых емкостей, обеспечивающих четырехступенчатую фильтрацию СОТС, и погружного насоса, подающего СОТС в зону обработки. Емкости расположены на подвижной платформе для удобства их чистки и смены отработанной СОТС.

Обратная связь работы станка осуществляется с помощью системы измерения, обеспечивающей измерение движения исполнительных механизмов станка, с помощью измерительных линеек 11 и измерительного щупа 12 (рис.3).

Управление станком осуществляется от промышленного компьютера на пульте управления 13 с сенсорным монитором, закреплённым на передней части станины.

В ходе выполнения государственного контракта изготовлен опытный образец станка 4СЭШ 360-П4. Изготовление узлов опытного образца станка и сборка проводились на производственных участках ОАО НИИТ. Проведён пуск и апробирование работы станка. На рис.4 показана установка лопатки компрессора ГТД на станке 4СЭШ 360-П4 при настройке станка.

В качестве примера использования станка 4СЭШ-360П4 для шлифования сложно-фасонных поверхностей деталей разработан технологический процесс алмазного электрохимического шлифования сложно-фасонных поверхностей спинки и корыта пера лопаток 1 ступени компрессора ГТД (рис.4).

Условия обработки: обработка ведется поперечной строкой тороидальным алмазным шлифовальным кругом на металлической

связке формы 1FF1 150×15×5×32R75 характеристики АС32 315/250 М2-01 К4. Схема шлифования представлена на рис. 5.

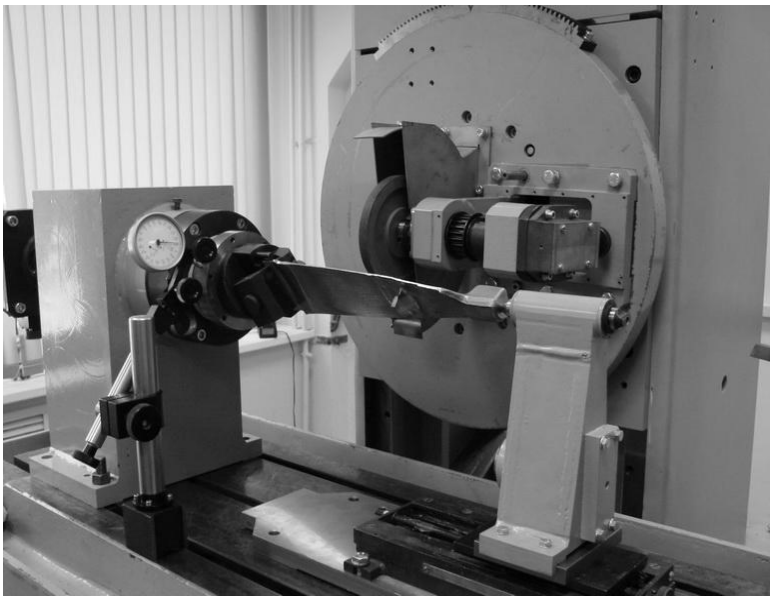


Рис. 4. Установка лопатки на станке 4СЭШ 360-П4

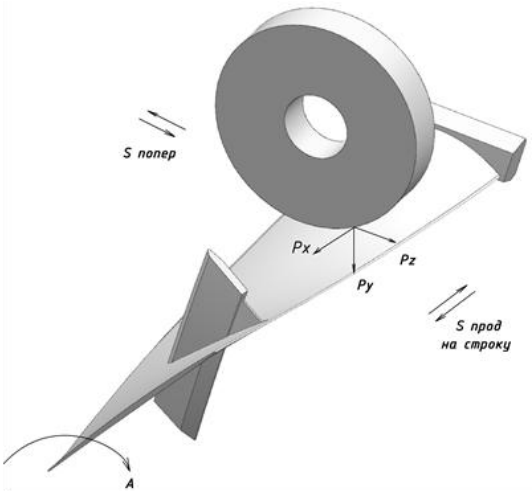


Рис. 5. Принятая схема обработки лопатки при электрохимическом шлифовании на станке 4СЭШ-360П4

Шлифованию подлежит профиль пера лопатки компрессора высотой до 360мм из материала типа титановый сплав ВТ3-1. В качестве заготовки может быть использована изотермическая штамповка, штамповка с последующей электрохимической обработкой, штамповка с последующим фрезерованием профиля

пера. Заготовки лопаток, полученные штамповкой, должны пройти термическую обработку (отжиг) на снятие остаточных напряжений. Рабочие поверхности и основание хвостовика заготовки должны быть обработаны окончательно. Заготовки рабочих лопаток, поступающие на операцию шлифования профиля, закрепляются с поджатием центром. Целесообразно оставлять припуск по перу в пределах 0,1…0,5 мм.

На станке 4СЭШ-360П4 возможна реализация схемы алмазного электрохимического шлифования с одновременной очисткой и правкой круга.

В зону очистки круга подается из насадки электролит, который захватывается вращающимся кругом и заполняет пространство между связкой круга, обрабатываемой деталью, и выступающими из связки зернами алмаза. Процесс электрохимического шлифования лопаток с одновременной правкой алмазного круга на металлической связке заключается в механическом съеме металла детали, сопровождаемом электрохимическим растворением связки алмазного круга под воздействием постоянного тока и электролита. Возможно использование схемы электрохимического шлифования, когда к кругу на металлической связке поджимается правящий электрод, соединенный с отрицательным полюсом источника технологического тока, а обрабатываемая деталь соединяется с положительным полюсом, что обеспечивает правку круга.

Перед операцией шлифования необходимо выполнить разбивку заготовок лопаток на группы, отличающиеся величинами максимальных припусков.

Траектория движения лопатки и шлифовального круга задается управляющей программой (УП) от системы ЧПУ.

Цикл обработки лопаток с антивибрационной полкой включает в себя подвод лопатки и шлифовального круга в нулевую точку УП согласно карте наладки, рабочий ход до антивибрационной полки, обход полки, рабочий ход после антивибрационной полки, отвод круга от лопатки, ускоренный возврат лопатки в исходное положение.

Рекомендуемые режимы резания при алмазном электрохимическом шлифовании лопаток на станке 4СЭШ-360П4 приведены в табл.2.

Таблица 2

Материал лопатки	Характеристика круга	Режимы обработки						
		Скорость резания, м/с	Контурная подача, м/мин	Подача на строку, мм/об	Глубина резания, мм	Напряжение, В	Величина тока, А	Число проходов на
ВТ3-1	АС32 315/250 М2-05 К4	25	1000	1,5	0,1	6-8	10-50	1

Шлифование титановых сплавов следует выполнять с использованием электролита на водной основе, состав которого приведён в табл.3.

Таблица 3

Наименование веществ	ГОСТ (ТУ)	% содержания
Калий азотнокислый	ГОСТ4217-77	10,0
Натрий фосфорнокислый	ГОСТ9337-79	3,0
Натрий тетраборнокислый	ГОСТ4199-76	0,5-1,0
Триэтаноламин	ТУ6-09-2448-72	0,5-1,0

Рекомендуемый расход подаваемой в зону обработки СОТС должен составлять 30 - 40 л/мин.

Соблюдение рекомендуемых режимов шлифования, технологических условий и состава электролита позволят получить в поверхностном слое заданные качественные параметры, исключить структурно-фазовые превращения, обеспечить заданную шероховатость.

Технологический процесс обработки лопаток на станке 4СЭШ-360П4 обеспечит повышение уровня автоматизации производства, сокращение объема ручных доводочных работ, повышение точности обработки лопаток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев В.Л., Грибановский В.А., Старочкина С.В. Технология изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2011. 611с.

УДК 621.794
ББК 34.431

Н.В. Абраимов, А.М. Терехин, Ю.П. Шкретов (ФГУП «НПЦГ «Салют»)

К ВОПРОСУ О ГОРЯЧЕМ ИЗОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ ЛОПАТОК ТУРБИН И ЛОКАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ГАЗОВОМ АЛИТИРОВАНИИ

Горячее изостатическое прессование (ГИП) широко используется для повышения плотности отливок деталей из никелевых, кобальтовых, железных, титановых, алюминиевых сплавов. Прессование отливок лопаток газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов с равноосной структурой позволяет повысить плотность и однородность структуры, характеристики пластичности, циклической долговечности [1]. Этот эффект связан с залечиванием усадочной микропористости, обусловленной неравномерностью затвердевания расплава. Кроме того, ГИП может успешно использоваться для залечивания микроскопических дефектов, накопленных в деталях в процессе эксплуатации при длительном воздействии высоких температур и напряжений. В связи с низкой скоростью охлаждения лопаток при ГИП для восстановления тонкой структуры после ГИП выполняется высокотемпературная термическая обработка (ВТВО) (обычно в вакууме).

Эффективность ГИП зависит от выбора параметров технологического процесса – температуры, давления, продолжительности выдержки. Для охлаждаемых лопаток турбин эффективность

ГИП в значительной мере зависит от содержания вредных примесей в составе газовой среды (аргона). Недопустимое содержание вредных примесей приводит к насыщению ими поверхностного слоя, обеднению легирующими элементами и разупрочнению деталей. В связи с этим для сохранения прочностных свойств деталей поверхностные слои должны защищаться от повреждений технологическими покрытиями, прежде всего это относится к охлаждаемым лопаткам турбины.

Цель работы состоит в исследовании влияния температуры, давления, продолжительности, состава газовой среды на состояние структуры и свойств сплава ЖС6У и покрытий на нем.

Эксперименты проводили на охлаждаемых лопатках турбины двигателя АЛ-31Ф. Для защиты от воздействия среды при газостатировании лопатки подвергали напылению сплава NiCrAlTaWHfSiY на внешние поверхности с последующим газовым алитированием при температуре 1000°С в течение 4 часов. Горячее прессование осуществляли в среде аргона при следующих режимах (табл.1).

Таблица 1

Режимы ГИП лопаток турбины

Температура, °С	Давление, МПа	Время выдержки, час
1200	170	2,5
1200	160	2,6
1030	150	3
1000	110	2,5
1000	90	2,5
1000	70	2,5
950	110	3

В жаропрочных сплавах типа ЖС упрочняющая γ′-фаза начинает растворяться при нагревании примерно с 800-900°С. Полное растворение γ′-фазы в сплаве ЖС6У происходит при нагреве до температуры 1220 – 1230°С [2]. По данным Н.В. Петрушина, температура полного растворения γ′-фазы составляет 1234°С, а начало плавления эвтектической γ′-фазы составляет 1212°С [3].

У сплавов с направленной и монокристаллической структурой полное растворение γ′-фазы достигается при температурах 1270 – 1300°С (табл.2).

Интенсивная пластическая деформация сплавов с направленной и монокристаллической структурой при высокой температуре неизбежно сопровождается протеканием процессов рекристаллизации и образованием зон с равноосной структурой, что вызывает снижение характеристик жаропрочности. Сообщения о некотором повышении служебных свойств лопаток с монокристаллической структурой, очевидно, связаны с деформированием при температурах, не превышающих температуры начала рекристаллизации сплавов.

Таблица 2

Температуры фазовых превращений сплавов

Марка сплава	$T_{п.р.}$, °С	$T_{эвт.}$, °С	$T_{s.}$, °С	$T_{l.}$, °С	T_{mc}, °С
ВЖЛ12Э	1250	1275	1282	1325	1300
ЖС6У	1234	1249	1276	1345	1324
ЖС6У	1248	1270	1292	1379	1346
ЖС26	1275	1280	1294	1369	1350
ЖС30	1245	1310	1295	1374	1318
ЖС32	1276	1284	1322	1381	-
ЖС36	1278	1306	1340	1408	-
ЖС40	1296	1310	1350	1388	-
CMSX-2	1304	1315	1325	1375	-
CMSX-4	1265	1325	1361	1391	-

$T_{п.р.}$ – температура полного растворения γ ′-фазы;
$T_{эвт.}$ – температура начала плавления неравновесных фаз эвтектического происхождения;
$T_{s.}$ – температура солидус сплавов;
$T_{l.}$ – температура ликвидус сплавов;
T_{mc} – температура начала выпадения карбидов при кристаллизации сплавов.

Сообщения о некотором повышении служебных свойств лопаток с монокристаллической структурой, по-видимому, связаны с деформированием при температурах, не превышающих температуры начала рекристаллизации сплавов.

ГИП лопаток турбин при температуре ниже $T_{п.р.}$, когда достигается полное растворение вторичной γ′-фазы, способствует выравниванию химического состава сплавов перед последующей термической обработкой с нагревом до температуры гомогенизации. В то же время нельзя не учитывать и возможность локального оплавления отдельных структурных составляющих сплавов при нагреве до температуры гомогенизации. Ранними исследованиями Н.Ф. Лашко на сплаве ЖС6У установлено, что нагрев до температуры 1220 °С приводит к образованию локальных оплавившихся структур [4]. Микролегирование сплава повышенным содержанием бора до 0.035 %, вызывает появление граничной ликвации и локализованного плавления металла по границам зерен. Это явление авторы связывали с ликвацией боридов при содержании бора выше 0.025 %.

Неоднородность распределения легирующих элементов в сплаве ЖС6У приводит к тому, что температура локального солидуса может колебаться в диапазоне от 1210 °С до 1245 °С.

При температуре газостатирования, превышающей температуру локального солидуса, возможно оплавление по границам зерен сплава.

Упрочняя границы зерен, бор значительно повышает длительную прочность сплава путем торможения диффузионных процессов на границах зерен. В сплаве ЖС6У бор обычно содержится в виде метастабильной фазы Me_3B_3(W 68,4 Cr 18,8 Mo 12,8)$_3B_2$, которая при гомогенизации превращается в Me_5B_3 (W 84,0 Cr 10,2 Mo 5,8**)** $_5B_3$.

Карбидная фаза сплава ЖС6У представлена карбидами (Ti,Nb)C и $Me_{23}C_6$, которые сохраняют устойчивость до температур, соответственно, 1300°С и 1050°С.

При температуре ГИП 1200 - 1210°С фазовый состав сплава ЖС6У состоит из γ-твердого раствора, первичной γ′-фазы эвтектического происхождения (которая практически не оказывает заметного влияния на характеристики жаропрочности) и карбидов MeC. Во время горячего изостатического прессования отливок развивается интенсивная пластическая деформация в направлении от поверхности вглубь металла, которая сопровождается завариванием микропор, упрочнением в начальный период, обусловленным ростом плотности дислокаций, протеканием процессов динамической

полигонизации и рекристаллизации, формированием новой субзеренной структуры.

Залечивание микропор литейного происхождения осуществляется по механизму диффузионной высокотемпературной ползучести, которая вначале контролируется сжимающими напряжениями, вызывающими пластическое течение металла, а затем поверхностным натяжением [5]. Приложенные сжимающие напряжения в форме всестороннего обжатия в три, четыре раза уменьшают время растворения пор в металле по сравнению с высокотемпературным отжигом без приложения напряжений сжатия.

Однако наличие газа в микропорах может привести к резкому увеличению противодавления и к стабилизации микропористости, прежде всего если молекулы газа не растворяются в металле во время ГИП. Микропоры, содержащиеся в поверхностном слое, после обжатия находятся в состоянии резкого увеличения обратного перепада давления при термической обработке в вакууме.

Алюминидные покрытия при температуре гомогенизации сплава находятся в состоянии высокой пластичности, поэтому обратный перепад давления в стабилизированных порах может приводить к локальному вспучиванию слоя покрытия. Локальный отрыв слоя покрытия от поверхности лопаток турбины может быть спровоцирован пористостью технологического происхождения, обусловленную загрязнением поверхности и резким уменьшением прочности сцепления покрытия с основным металлом.

В процессе ГИП в среде аргона обычно наблюдается образование газонасыщенных окисленных слоев на глубину до 0.06мм и более [6]. С другой стороны ГИП сопровождается интенсивной пластической деформацией, поэтому в структуре сплава ЖС32МОНО после закалки в вакууме наблюдается большое количество равноосных зерен, на границах которых сосредоточено большое количество частиц карбида $Me_{23}C_6$. Частицы $Me_{23}C_6$, сформированные в плотные, почти сплошные цепочки, значительно ослабляют границы зерен и служат источником образования микротрещин.

Обеднение поверхностного слоя сплава ЖС32МОНО на лопатках турбины двигателя АЛ-31Ф на глубину до 0.05 мм наблюдается при наработке в составе двигателя 1500 часов и более. В

отсутствие покрытия в поверхностном слое резко снижается содержание алюминия и хрома.

В поверхностном слое наблюдается образование зон, заполненных оксидами. Глубина рекристаллизованного слоя достигает 0.1мм. Наиболее существенные повреждения наблюдаются на границах рекристаллизованных зерен. Окисление частиц карбидов сопровождается образованием газовой фазы CO_2. Наличие газовой фазы является одной из основных причин образования полостей при окислении. Поэтому без применения мер защиты поверхностный слой лопаток турбины после обработки в газостатах аналогичен по составу и структуре слою на лопатках после длительной наработки в составе двигателя.

Защитные покрытия предотвращают повреждение поверхностного слоя при ГИП.

Рассмотрим структурные изменения в поверхностном слое лопаток турбины из сплава ЖС6У при высокотемпературном газостатировании (t =1200 – 1230°С, р=160 – 170 МПа, τ=1.2 – 3 часа).

Из-за низкой скорости охлаждения (10-11 град/мин до температуры 1000°С) наблюдается укрупнение частиц упрочняющей γ′-фазы. Для восстановления тонкой структуры проводили закалку в вакууме при температуре 1210°С в течение 3.5 час. После закалки наблюдается измельчение частиц γ′-фазы. В структуре сохраняются крупные нерастворившиеся частицы эвтектической первичной γ′-фазы и глобулярные частицы карбидов в основном по границам зерен сплава.

Таким образом, ГИП с последующей восстановительной термической обработкой повышает долговечность сплава ЖС6У. Алюминидные покрытия в процессе тепловых воздействий при ГИП и ВТВО получают значительные повреждения, однако поверхностный слой сплава сохраняет несущие свойства. Покрытие надежно защищает сплав от образования газонасыщенных слоев при ГИП в среде аргона.

ГИП уменьшает микропористость отливок лопаток и повышает однородность структуры сплава ЖС6У. Для защиты от газовой коррозии после очистки лопаток от технологических покрытий требуется нанесение жаростойких эксплуатационных покрытий. Уплотнение сплава при ГИП и повышение однородности структуры

предотвращает растравливание поверхностей при химическом удалении покрытий как с наружных поверхностей, так и в полостях охлаждаемых лопаток турбин.

Горячее изостатическое прессование охлаждаемых лопаток турбин при более низких температурах, не превышающих температуру эксплуатации, рассматривается нами, прежде всего, как вид обработки, предназначенной для повышения плотности, однородности структуры и долговечности применяемых защитных покрытий [7]. Известно, что пластичность фазы β-NiAl, основной структурной составляющей алюминидных покрытий, при нагреве до температуры хрупкости резко возрастает и при 950°С превышает 50%. Поэтому обжатие покрытий в состоянии высокой пластичности позволяет повысить их плотность, уменьшить микропористость и получить более мелкозернистую структуру, которая благоприятно сказывается на повышении вязкости слоев в области температурной хрупкости. Действительно, ГИП покрытий при температуре 1000°С и давлении 50 – 100 МПа обеспечивает существенное (почти двукратное) повышение термостойкости покрытий, однако не избавляет от необходимости устранения дефектов, связанных с качеством очистки поверхностей деталей на операциях, предшествующих формированию покрытий, а также устранения макроскопических дефектов структуры покрытий, прежде всего связанных с применением конденсационных технологий их нанесения.

Проблема локальной защиты от насыщения поверхностей деталей, например, замковой части рабочей лопатки ТВД, при нанесении защитных покрытий (алитировании, хромоалитировании, алюмосилицировании, хромировании и др.) весьма актуальна как в процессе серийного производства, так и при ремонте. Решение этой проблемы во многом определяется способом нанесения защитных покрытий. Например, при конденсационном методе, а также в шликерных технологиях, достаточным является применение экранов в качестве технологической оснастки при формировании покрытий.

Однако в газовых технологиях, когда перенос элементов осуществляется с помощью химических транспортных реакций, экранирование оказывается недостаточным.

В то же время эффективная защита замков лопаток турбин от насыщения алюминием при газовом алитировании позволяет

осуществлять нанесение покрытия на финишной стадии обработки деталей, когда выполнены практически все механические операции. В данном случае, такое построение технологическое процесса, когда покрытие наносится перед сборкой деталей в ротор двигателя, практически исключает возможность механических повреждений покрытий. Кроме того, такая технология обеспечивает наиболее надежную защиту поверхностей деталей и позволяет исключить применение шликерных технологий, а следовательно, снять дополнительные виды термической обработки (отжиг) и уменьшить трудоемкость изготовления деталей.

Разработка эффективной защиты от насыщения решает проблему ремонтопригодности деталей в случае серийного применения технологии газового алитирования, позволяет восстанавливать покрытие на деталях, выработавших установленный ресурс.

Известно, что при газовых технологических процессах перенос элементов осуществляется с помощью химических транспортных реакций [8]. Обычно для переноса элементов используют галогениды, чаще всего хлориды. При газовом алитировании перенос алюминия протекает по реакциям диспропорционирования молекул хлоридов алюминия. Основными компонентами газовой смеси являются галогениды алюминия $AlCl_3$, $AlCl_2$, AlCl, которые интенсивно перемешиваются с помощью вентилятора, омывая поверхности деталей, подлежащих алитированию.

Целью работы является разработка способа предотвращения контакта поверхности детали, не подлежащей насыщению, с молекулами газовой смеси, ответственными за транспортировку алюминия при газовом алитировании.

В качестве активатора при алитировании использовали соль $AlCl_3$. Источником алюминия служила ванна с расплавом алюминия. Процесс проводили при температуре 1000°С. Материалом для алитирования служили охлаждаемые лопатки турбины из сплава ЖС6У.

При нагревании $AlCl_3$ испаряется и взаимодействует с алюминием расплава с образованием хлоридов:

$$2\ AlCl_3 + Al_{ж} = 3AlCl_2,$$

$$AlCl_3 + 2Al = 3AlCl.$$

Таким образом, поверхность деталей омывается газовой смесью, содержащей $AlCl_3$, $AlCl_2$, AlCl.

На поверхности деталей протекают реакции осаждения атомарного алюминия:

$3AlCl_2 = Al_{ат.} + 2AlCl_3$,

$3AlCl = 2Al_{ат.} + AlCl_3$.

Активные атомы алюминия вначале растворяются в поверхностном слое сплава, а затем образуют соответствующие интерметаллиды, составляющие покрытие:

$Al_{ат.} + Ni = NiAl$,

$3Al_{ат.} + Ni = Ni_2Al_3$.

Первой важнейшей составляющей защиты замков лопаток от насыщения является экранирование.

Однако молекулы галогенидов легко проникают по щелям и каналам между поверхностью экрана и детали. Поэтому на поверхности замка протекают реакции диспропорционирования. Но, так как содержание хлоридов на поверхности замка меньше при наличии экранов, выход продуктов реакции ($Al_{ат.}$) существенно меньше, чем на поверхности пера лопаток.

Второй важнейшей составляющей защиты замков лопаток является порошок оксида алюминия, располагающийся в промежутке между экраном и поверхностью замка лопаток.

Частицы оксида алюминия на 50 – 60% объемных долей заполняют пространство в промежутке между экраном и поверхностью замка. Поэтому скорость диффузионного перемещения молекул галогенидов алюминия к поверхности замка уменьшается, однако применение частиц оксида алюминия не защищает от протекания реакций переноса и алитирования поверхности замка лопаток, хотя выход продуктов реакции ($Al_{ат.}$) и, следовательно, скорость алитирования резко снижаются.

Таким образом, для предотвращения алитирования замков в составе порошковой смеси должны присутствовать такие частицы металла, которые адсорбировали бы молекулы галогенидов алюминия и связывали бы осаждаемые атомы алюминия в тугоплавкие соединения. В качестве частиц-адсорбентов могут использоваться порошки никеля, кобальта, железа, хрома, сплавов типа ЖС, а частицы оксида алюминия используются для предотвращения

спекания металлических частиц. Так решается вопрос технологичности.

Поэтому третьей важнейшей составляющей смеси для защиты замков от насыщения является включение металлических частиц никеля, кобальта, железа, хрома.

Включение в состав порошковой смеси частиц никеля предотвращает протекание реакций химического транспорта алюминия на поверхности замка лопаток. Химические транспортные реакции протекают на поверхности частиц никеля, которые алитируются:

$3AlCl_2 = Al_{ат.} + 2AlCl_3$,

$3AlCl = 2Al_{ат.} + AlCl_3$,

$Al_{ат.} + Ni = NiAl$

или

$Al_{ат.} + Co = CoAl$.

В результате в газовой среде в полости порошковой массы резко падает концентрация $AlCl_2$ и AlCl. В связи с отсутствием алюминия в составе защитной порошковой массы не могут протекать обратимые реакции восстановления $AlCl_2$ и AlCl и процесс алитирования на поверхности замков лопаток не происходит.

Применяемый глинозем должен предварительно прокаливаться на воздухе при температуре 1250 – 1350°С.

Поскольку газ проникает через поры порошковой смеси, то для заполнения полостей между замком и защитным экраном целесообразно применять мастики, в составе которых вещества обеспечивали бы при нагревании формирование плотных беспористых структур с низкой адгезией к основному металлу во всем температурном интервале технологического процесса. В качестве связующего в таких мастиках могут использоваться различные органические соединения, например, коллоксилин, растворенный в тяжелых эфирах уксусной и щавелевой кислот, эпоксидная, фенольно-формальдегидная и др. смолы. При нагреве таких связующих углерод, входящий в состав компонентов мастик, взаимодействует с кислородом и легко окисляется до CO и CO_2.

Связующее практически полностью улетучивается из мастики в процессе нагрева до температуры 250 – 300°С путем окисления его кислородом остаточного воздуха в вакуумных электропечах.

В общем случае требования к технологии локальной зашиты поверхностей при нанесении диффузионных жаростойких покрытий можно свести к следующему:

1. Отсутствие на защищаемых поверхностях деталей химических элементов, формирующих покрытие.

2. Технология защиты не должна оказывать влияние на состав, структуру и свойства как защитного покрытия, так и основного металла.

3. Отсутствие на защищаемых поверхностях деталей частиц защитных мастик.

4. Высокая технологичность процесса защиты.

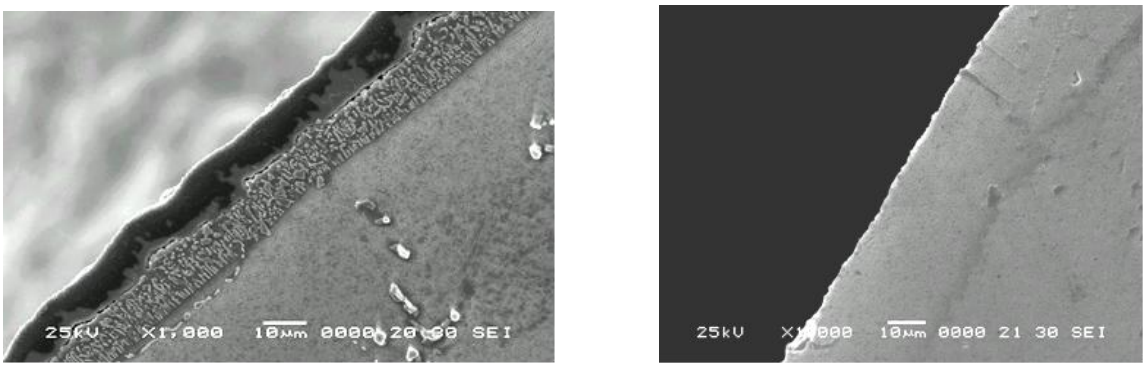
Таким образом, комбинированная система защиты в качестве основных элементов должна содержать металлический экран, вещество, содержащее «поглотитель» алюминия, и технологические присадки (мастика).

Для оценки эффективности комбинированной системы защиты при газовом алитировании в качестве металлического экрана был изготовлен разборный контейнер [9]. В полость между поверхностями контейнера и замком лопаток запрессовывали защитную мастику, содержащую порошки прокаленного при температуре 1350°С глинозема марки Г-00 и карбонильного никеля марки ПНК-l. В качестве связующего, для обеспечения технологичности, применяли раствор коллоксилина в амилацетате и диэтилоксолате, который широко применяется для приготовления краски при шликерном алитировании и алюмосилицировании.

Газовое алитирование проводили в установке УМДП (рис.1), разработчик ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», при непрерывном перешивании газовой среды вентилятором. В качестве активатора применяли треххлористый алюминий $AlCl_3$. Процесс проводили на лопатках турбины из сплава ЖС6У при температуре 1000°С в течение 4-х часов. Фотография структуры поверхности на пере и замке лопатки представлена на рис.2.

После завершения процесса и разборки экрана порошковая смесь легко удаляется волосяной щеткой. Поверхность замков имела светлый металлический цвет и не содержала припекшихся частиц никеля и оксида алюминия.

Рис.1. Установка УМДП



а) б)

Рис. 2. Микроструктура поверхности лопатки: *а) – перо, б) – замок х1000*

Металлографическим анализом установлено отсутствие диффузионного насыщения поверхностного слоя замков при алитировании. Геометрические размеры замков соответствовали исходному состоянию лопаток, предшествовавшему алитированию.

Структурные изменения в поверхностном слое замков лопаток отсутствовали.

Рентгеноспектральным анализом установлена идентичность химического состава поверхностного слоя и сердцевины замка лопаток (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав сплава ЖС6У в замковой части лопаток турбины и покрытия на поверхности пера после газового алитирования при температуре 1000 °С с применением защиты замка

Участок анализа		Содержание основных элементов, % вес.					
		Ni	Cr	Al	Ti	Co	W
Перо		56.7	4.8	21.7	1.5	7.8	0.0
Замок	Поверхность	61.5	8.6	5.6	2.2	10.0	11.0
	Сердцевина	62.6	8.3	5.9	2.6	9.3	10.2
По ОСТ 1-90126-85		Осн.	8,0-9,5	5,1-6,0	2,0-2,9	9,0-10,5	9,5-11,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К.: Пер. с англ. В 2-х книгах. М.: Металлургия, 1995. Кн.1 - 384с. Кн.2 - 384с.
2. Ковалев А.И., Хацинская И.М., Ефимова Т.И. Влияние легирования на тепловое расширение жаропрочных никелевых сплавов// Авиационные материалы: научно-технический сборник. М.: ВИАМ, 1983. С.49 - 56.
3. Петрушин Н.В., Сорокина Л.П., Журков С.Н. Структурные особенности деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при циклическом нагружении// Металловедение и термическая обработка металла. 1995. №6. С.2-5.
4. Лашко Н.Ф. Физико-химические методы фазового анализа сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 479 с.
5. Хаюров С.С. Горячее изостатическое уплотнение отливок// Зарубежная техника. 1985. № 3. С. 43 - 53.
6. Кузьмичева Л.Г., Яновская Н.П., Введенская Е.К. Об эффективности использования высокотемпературной газостатической обработки деталей ГТД// Новые технологические процессы и надежность ГТД: сб. статей под ред. В.А. Скибина. Выпуск 2. М: ЦИАМ, 2001. С.160 - 169.
7. Абраимов Н.В., Терехин А.М., Шкретов Ю.П. Структурные изменения в алюминидном покрытии на сплаве ЖС32 при баротермической обработке// Коррозия: материалы, защита. № 9, 2008 г. С.23 - 29.
8. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001 г. 622 с.
9. Устройство для защиты участков поверхности деталей: пат. № 28871 Рос.Федерация. 2002123768/20, заявл.11.09.2002; опубл. 20.04.2003. 11 с.

УДК 621.791.92

К.А. Кярамян, А.М. Лыков (ФГУП «НПЦГ «Салют»)

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ В ПРОЦЕССЕ НАПЛАВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

При проведении процессов наплавки металлических материалов, в том числе с использованием плазменных источников нагрева, необходимо исследовать влияние технологических параметров на температурные условия в металле, которые влияют на формирование различных структур в системе “наплавляемый материал – основа”. В связи со сложностью экспериментальных исследований этих условий, теоретические расчеты являются крайне важными.

Целью настоящей работы являются теоретические исследования влияния некоторых технологических параметров процесса наплавки (температуры, толщины наплавляемого материала, величины и длительности теплового воздействия на поверхность и др.) на температурные условия в материале и структуру образующегося поверхностного слоя. Использованный метод позволяет проводить расчеты при различных граничных условиях на поверхности, а также в виде разрывных функций [1]. На рис.1 приводятся результаты расчета движения фронта расплава при различных тепловых потоках на поверхности материала Q, при толщине наплавляемого слоя 1 мм и его температуре $T_н$ = 2000°С.

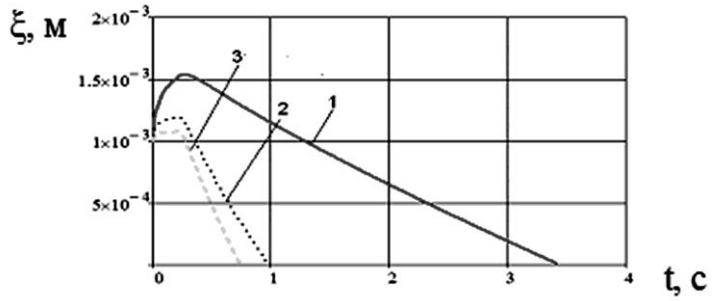


Рис. 1. Движение фронта расплава в зависимости от времени, при различных величинах теплового потока (Q): *1 - 0,5·10^7, 2 - 1·10^7, 3 - 1,3·10^7 Вт/м^2*

Более глубокое проплавление материала основы при меньших тепловых потоках на поверхности обусловлено большей степенью прогрева ее до температуры плавления перед нанесением наплавляемого слоя.

На рис.2 представлена зависимость температуры поверхности наплавляемого слоя от времени для различного теплового потока при Тн=2000ºС, толщине наплавляемого слоя 1 мм и длительности теплового воздействия 0,2 с.

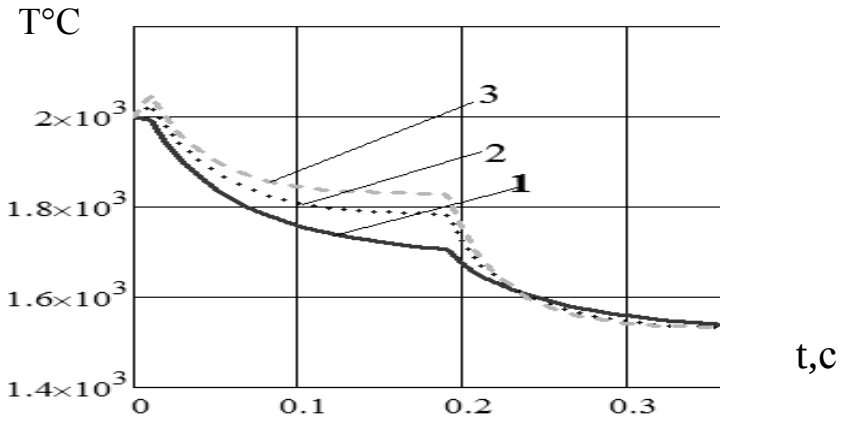


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности наплавляемого слоя от времени для различной величины теплового потока (Q): *1- 0,5·10⁷, 2 - 1·10⁷, 3 - 1,3·10⁷Вт/м²*

При Q=0,5·10^7 Вт/м^2, $T_н$=2000ºС и толщине наплавляемого слоя 1 мм температура поверхности снижается до 1700ºС за время 0,2 с за счет теплоотвода в массу материала. При Q=1,3·10^7 Вт/м^2 наблюдается увеличение температуры поверхности до 1850ºС.

Температура поверхности наплавляемого слоя в зависимости от времени для различных толщин слоя: 1, 2 и 5 мм, при Q=1·10^7 Вт/м^2, $T_н$=2000ºС и длительности теплового воздействия 0,2 с представлена на рис. 3.

При толщине наплавляемого слоя 1мм, Q=1·10^7 Вт/м^2, $T_н$=2000ºС температура поверхности снижается до1800ºС за время 0,2 с. При толщине слоя 5 мм наблюдается увеличение температуры поверхности до 2300°С, а после прекращения действия плазмы – её уменьшение.

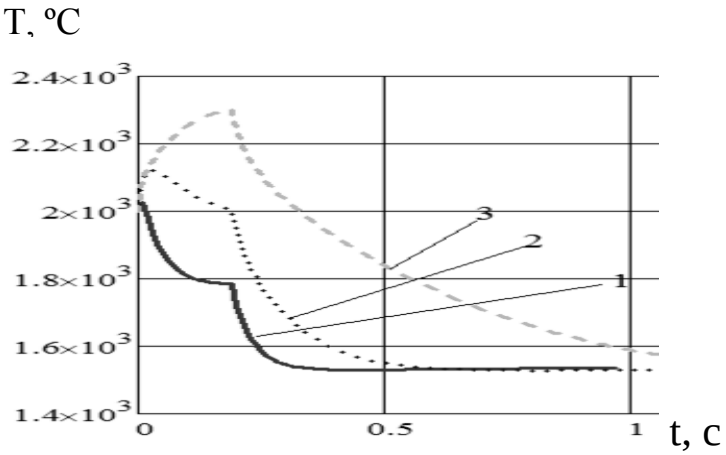


Рис.3. Зависимость температуры поверхности наплавляемого слоя от времени для различной толщины наплавляемого слоя: *1 – 1, 2 – 2, 3 - 5мм*

Распределение температуры по глубине наплавленного слоя и материала основы для различного времени в процессе кристаллизации для $T_н$ = 2000 ºС, Q=1*10^7 Вт/м^2, длительности теплового воздействия 0,2 с и толщине наплавляемого слоя 5 мм приведено на рис. 4.

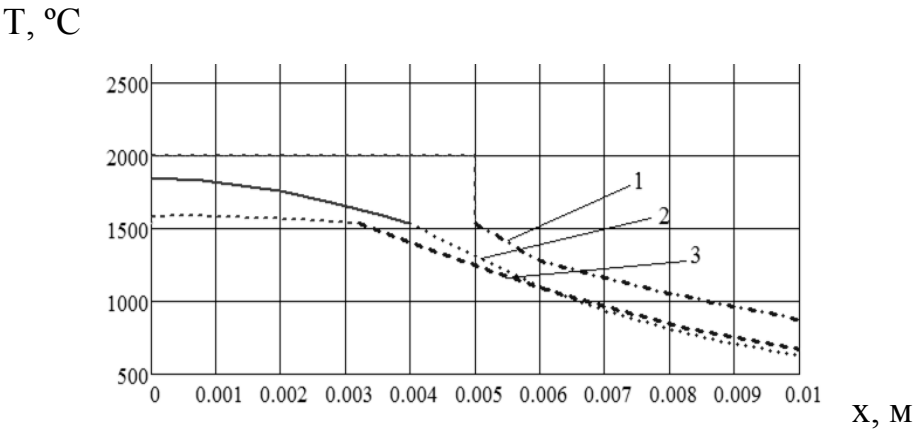


Рис. 4. Распределение температуры по глубине (в расплаве и в материале) в процессе кристаллизации в различные времена: *1 – 1 , 2 - 51 , 3 – 103с*

При этом распределение температуры по глубине (в момент завершения кристаллизации) используется для расчета температуры и скорости ее изменения во времени (скорости закалки) в процессе остывания системы покрытие-основа с применением зависимости, описанной в монографии [2].

Предварительный прогрев может применяться для варьирования структуры и соответственно физико-химических и эксплуатационных свойств поверхностного слоя.

На рис.5 приведены такие зависимости для температуры поверхности покрытия от времени для колесной стали 2, представленные на диаграмме анизотермического распада аустенита, при предварительном прогреве металлической основы перед наплавкой.

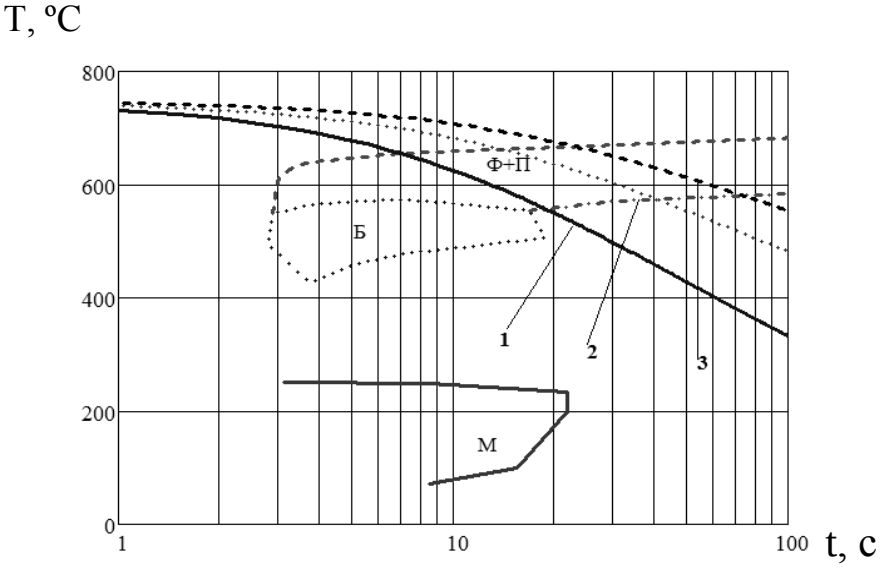


Рис.5. Изменение температуры на поверхности материала (в процессе остывания) в зависимости от времени на диаграмме анизотермического распада аустенита при различной температуре предварительного нагрева материала*: 1-0 , 2-200 , 3-300 ºС, при* $Q=1*10^7$ *Вт/м*^{2}, $T_н$ = 2000ºС, *толщине наплавленного слоя – 2мм и длительности теплового воздействия 0,2с. М-мартенсит, Б-бейнит, Ф+П-феррит +перлит*

Вывод: Проведен теоретический анализ влияния некоторых технологических параметров на температурные условия в массе материала в процессе наплавки металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lykov A.M., Kyaramyan K.A., Naumenko N.N. Calculation of Plasma Deposition Process.// International Conference Plasma Physics and Plasma Technology: contributed papers. V. 2. Minsk. 2012, p.861- 864.

2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 593 с.

УДК 669.245:621.791.722

В.В. Докашев, А.С. Ромашов, Е.О. Фомичев,
А.А. Жигунов (*ФГУП «НПЦ Г«Салют»)*

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СВАРКИ НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ 171 МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Разработка перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) постоянно требует разработки новых конструкционных материалов, условия работы которых существенно усложняются – на материалы воздействуют статические и динамические напряжения, а также знакопеременные, термические и другие нагрузки. При этом только в первых ГТД рабочие температуры материала составляли 700°С…800ºС и в дальнейшем значительно повысились, достигнув в настоящее время 1050°С…1100ºС и даже выше.

Повышение температуры рабочего газа и, следовательно, рабочих температур ($t_{раб}$) наиболее теплонагруженных деталей двигателей обеспечивает увеличение эффективности работы, повышение удельной мощности, уменьшение габаритов и снижение массы двигателя, снижение удельного расхода топлива и, как следствие, повышение экономичности двигателя, улучшение экологии, но рабочие температуры ($t_{раб}$) наиболее теплонагруженных деталей при этом возрастают.

В связи с этим, для деталей горячего тракта газотурбинных двигателей нового поколения (жаровой трубы, камеры сгорания, элементов сопла и форсажной камеры) в ФГУП «ВИАМ» был разработан новый жаропрочный свариваемый сплав ВЖ171 с температурой работы до 1250°С.

Сбалансированность компонентов марки ВЖ171 обеспечивает стабильность структуры – в процессе эксплуатации не происходит выделение частиц топологически плотноупакованных фаз (хрома, вольфрама и т.п.). Главное отличие сплава ВЖ171 от применяемых сплавов-аналогов ВЖ98, ВЖ101 и других состоит в упрочнении его дисперсными частицами нитридов, формирующихся при химико-

термической обработке в процессе внутреннего азотирования. Стабильность нитридов (температура плавления нитрида титана по разным данным колеблется в пределах 2930°С…3205°С), сохраняющихся вплоть до температуры плавления матрицы, обеспечивает высокую рабочую температуру сплава.

Сварка никеля и его сплавов затруднена вследствие их высокой чувствительности к изменению физических и механических свойств в зависимости от содержания примесей и повышения концентрации растворенных газов в металле шва.

Электроннолучевая сварка (ЭЛС), по сравнению с другими видами сварки, характеризуется высокой концентрацией энергии в электронных пушках и практически идеальными защитными свойствами вакуума, что позволяет получать сварные соединения с узкой зоной термического влияния и малыми деформациями без обогащения металла шва вредными примесями.

ЭЛС опытных образцов проводили на установке ЭЛУ–20, укомплектованной энергоблоком БЭП – 60/15К с прямоканальной пушкой ЭПК–60/30. Сварку проводили со сквозным проплавлением («на весу») по целому материалу (без стыка).

В качестве образцов были использованы пластины толщиной 0,8 мм без азотирования и с азотированием. Режимы сварки образцов указаны в табл.

Таблица

Режимы сварки опытных образцов

№	Материал	Режим сварки
1	ВЖ171 до азотирования (образец № 1)	1. Ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 30 м/час. ток сварки 5 мА. 2. Ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 30 м/час. ток сварки 7 мА.
2	ВЖ171 после азотирования (образец № 2)	1. Ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 30 м/час. ток сварки 5 мА. 2. Ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 30 м/час. ток сварки 7 мА.
3	ВЖ171 после азотирования (образцы № 3, 4)	Сварка проводилась на подкладке из неазотированного материала. 1. Ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 30 м/час. ток сварки 6 мА. 2. Ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 30 м/час. ток сварки 7 мА. 3. Ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 30 м/час. ток сварки 10 мА.

Следует отметить, что при сварке неазотированных образцов на всех режимах наблюдалось спокойное формирование сварного шва, в то время как сварка азотированных образцов характеризовалась сильнейшим разбрызгиванием металла из сварочной ванны (рис.1). Такое протекание процесса может быть связано с тем, что при расплавлении металла и последующей кристаллизации шва происходит выделение атомарного азота.

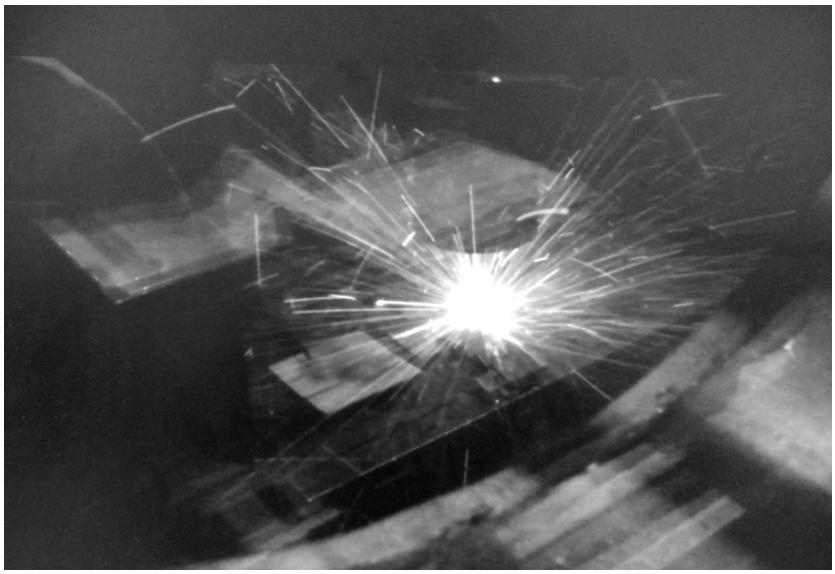
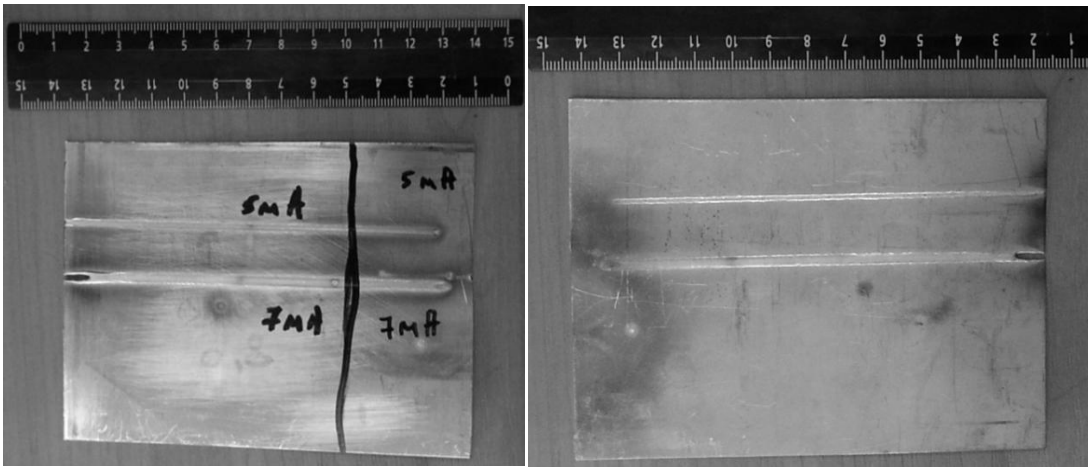


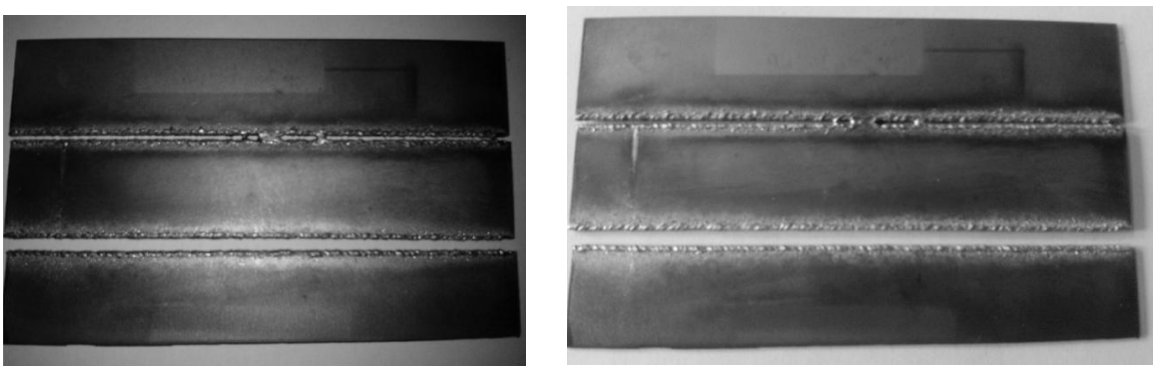
Рис.1. Сварка азотированного материала ВЖ 171

Внешний вид полученных образцов показан на рисунках 2, 3, 4.



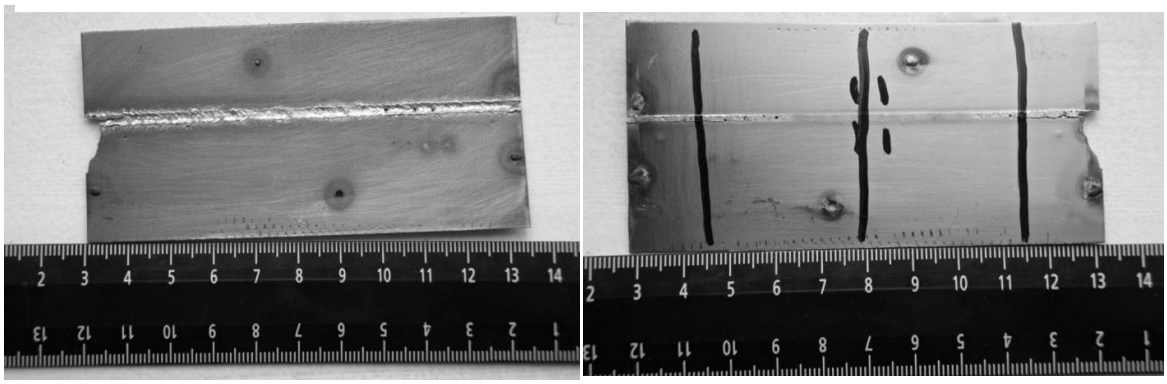
а) лицевая сторона *б) корневая сторона*

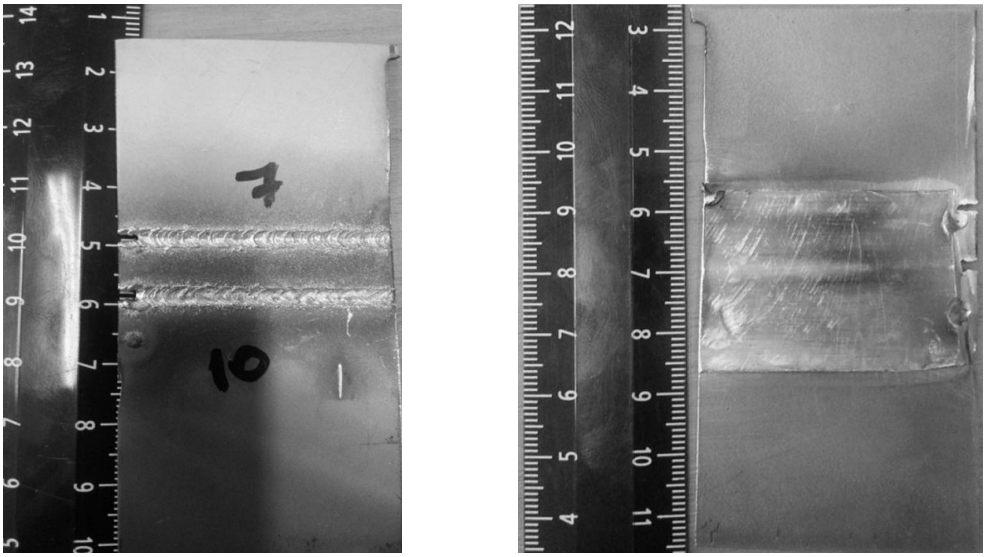
Рис.2. Внешний вид образца № 1



а) лицевая сторона *б) корневая сторона*

Рис.3. Внешний вид образца № 2





а) лицевая сторона б) корневая сторона

Рис.4. Внешний вид образцов № 3, 4

Металлографические исследования образца № 1 (рис.2) показали, что в обоих швах имеется сквозной проплав листа, дефектов (подрезов, пор, трещин) в швах и по их границам с основным материалом выявлено не было.

При сварке образца № 2 (рис.3) не удалось получить сварной шов – литая зона полностью отсутствовала, произошел рез образца.

Металлографическими исследованиями образца № 3 (ток сварки 6 мА) выявлено следующее:

– проплавление листа прошло не полностью (примерно на 2/3 толщины листа),

– в исследуемых зонах (рис.5) дефектов (подрезов, пор, трещин) в швах и по границам швов с основным материалом выявлено не было.

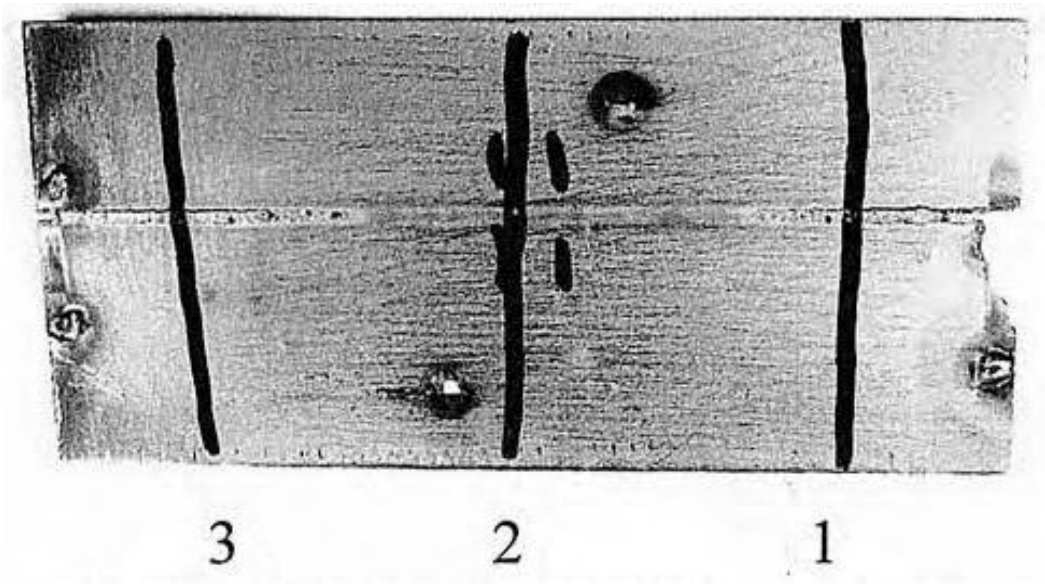


Рис. 5. Зоны исследования образца № 3

Металлографическими исследованиями образца № 4 (ток сварки 7 и 10 мА) выявлено следующее:

– в обоих швах и по границе сварных швов с основным материалом образца дефектов (подрезов, пор и трещин) не наблюдается,

– в обоих швах имеется сквозной проплав листа и проплавление части подкладки: в шве с 7 мА на глубину до 0,02 мм, а в шве 10 мА до 0,3 мм,

– со стороны входа луча в сварных швах наблюдается утяжина (усадка) глубиной до 0,5 мм и выплеск металла по краям шва толщиной до 0,1 мм,

– сварной шов 10 мА однородный, а в шве 7 мА наблюдается слоистое строение.

Таким образом, в работе получены следующие результаты:

1. Полученные режимы сварки неазотированного листа из сплава ВЖ171 можно считать оптимальными для толщины 0,8 мм.

2. Показана принципиальная возможность получения сварных соединений сплава ВЖ171 в азотированном состоянии с применением технологических подкладок из неазотированного материала.

3. Необходимо:

– провести исследования влияния металла из неазотированной подкладки на жаропрочность сварного соединения;

– определить оптимальное соотношение между свариваемой толщиной материала и необходимой глубиной внедрения проплава в подкладку с целью полноценного формирования сварных швов (без подрезов и занижений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Ломберг Б.С. и др. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы: юбилейный научно-технический сборник «80 лет. Авиационные материалы и технологии». М.: «ВИАМ», 2012. С. 4-11.

2. Моисеенко В.П. Материалы и их поведение при сварке. М.: Издательство «Феникс», 2009. 304 с.

УДК 621.791.72

В.А. Гейкин, В.В. Докашев, Г.В. Мартышин,
Ю.Г. Быков (*ФГУП «НПЦГ «Салют»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СОЕДИНЕНИЯ Ti_2NbAl

Сплавы на основе алюминидов титана в температурном интервале 650 – 850°С превосходят применяемые в настоящее время материалы на основе титана, железа, никеля по удельной жаропрочности, удельному модулю упругости и обладают при этом высокой жаростойкостью. Эти сплавы могут быть эффективно использованы в деталях компрессора высокого давления и турбины низкого давления перспективных ГТД.

При легировании сплава на основе интерметаллидного соединения (ИС) Ti_3Al ниобием в количестве более 10% в его структуре появляется орто – фаза – интерметаллидное соединение (ИС)Ti_2NbAl, которое имеет высокую температуру плавления, низкий коэффициент термического расширения и достаточно высокий уровень жаропрочности [1].

В работе [2] были установлены оптимальные режимы обработки давлением и последующей термообработки интерметаллида Ti_2NbAl. Оптимальный режим термомеханической обработки в последовательности: ковка при 1060ºС с последующей прокаткой при 1050 ºС, нагрев под закалку до температуры 1025ºС с выдержкой при этой температуре 1час и охлаждением в масле, и старение при температуре 750ºС 3 часа, охлаждение на воздухе, позволили получить следующие свойства листа – $\sigma_в^{20}$ = 1081 МПа, $\sigma_{0,2}^{20}$ = 928 МПа, δ^{20} = 7,2 %, ψ^{20} = 12,1 % и $\sigma_в^{650}$ = 700 МПа.

Имея преимущества перед другими конструкционными сплавами на различной основе по удельной жаропрочности интерметаллическое соединение Ti_2NbAl имеет некоторые недостатки, основным из которых следует считать более сложный технологический процесс обработки давлением.

В настоящей работе исследовались листы сплава на основе ИС Ti_2NbAl толщиной 2,5мм, полученные по следующей технологии: отливка заготовки проведена в вакуумной печи, далее ковкой в температурном интервале 1050 – 1140°С со степенью деформации 25% была получена заготовка в виде полосы, которая прошла дальнейшую горячую прокатку в температурном интервале 930 – 950ºС со степенью деформации 5 – 12% за один проход. Всего было выполнено шесть проходов. С одного нагрева проводили два прохода, а специальную термообработку не проводили. Химический состав полученных листов приведён в табл.1.

Таблица 1

Химический состав листов толщиной 2,5 мм и сплава ВТИ-4

полуфабрикат, сплав	химический состав , %					
	Ti	Nb	Al	Si	Ta	Zr + Mo
лист 2,5 мм	основа	42,2	9,62	0,19	0,23	—
сплав ВТИ- 4 [1]	основа	40 - 45	9 – 12,5	0,1 – 0,25	—	1,0 – 2,0

В работе [3] было показано, что легирование орто-фазы ванадием, способствует повышению прочностных и пластических свойств сплава, а легирование цирконием, молибденом и кремнием повышает его жаропрочные свойства и стойкость к окислению.

Как видно из табл.1, химический состав исследуемых листов очень близок к сплаву ВТИ-4. По существу сплав ВТИ-4 – это сплав на основе орто-Ti_2NbAl-фазы с наличием упрочненной сложными карбидами и силицидами неупорядоченной β-фазы [3]. Следовательно, и по механическим свойствам полученные листы толщиной 2,5мм должны быть близки к свойствам листов аналогичной толщины из сплава ВТИ-4, которые по данным [1] имеют следующие значения в термообработанном состоянии $\sigma_в^{20}$ =1128–1140МПа, $\sigma_{0,2}^{20}$ =1078–1092МПа, δ^{20} = 6,2–6,8% и σ_{100}^{650} = 350МПа.

Следует отметить, что в настоящее время недостаточно сведений о свариваемости интерметаллического соединения Ti_2NbAl,

что, безусловно, сдерживает оценку перспективности данного соединения как конструкционного материала.

В связи с этим целью данной работы было исследование свариваемости сплава на основе ИС Ti_2NbAl на листах толщиной 2,5 мм электроннолучевым и аргонодуговым методами сварки.

В работе [4] под свариваемостью металлов понимается их свойство образовывать согласно используемой технологии сварки соединение, которое соответствует требованиям неразъёмной конструкции и условиям её эксплуатации. Применительно к титановым сплавам под свариваемостью следует считать способность сплавов к образованию надежного сварного соединения без дефектов типа микропор и микротрещин [5] и обеспечивающего заданный ресурс эксплуатации детали.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС), по сравнению с другими видами сварки, характеризуется большой проплавляющей способностью при меньшем расплавлении и ограниченном термическом воздействии на свариваемый сплав, благодаря чему возникают небольшие сварочные напряжения и деформации. Поскольку сварка проводится в вакууме, химический состав металла шва идентичен основному металлу и механические свойства сварного соединения такие же, как и у основного металла. Вследствие этого метод ЭЛС нашел широкое применение в технологии изготовления сварных конструкций ГТД.

ЭЛС опытных образцов проводили на установке ЭЛУ–20, укомплектованной энергоблоком БЭП–60/15К с прямоканальной пушкой ЭПК–60/30. Сварку на плоских образцах проводили на проплав по целому материалу «на весу» и по стыку на подкладке. На всех режимах при сварке «на весу» наблюдалось хорошее формирование сварного соединения с вершины и корня шва. Режимы сварки приведены в табл.2.

Внешний вид сварных соединений приведен на рис.1.

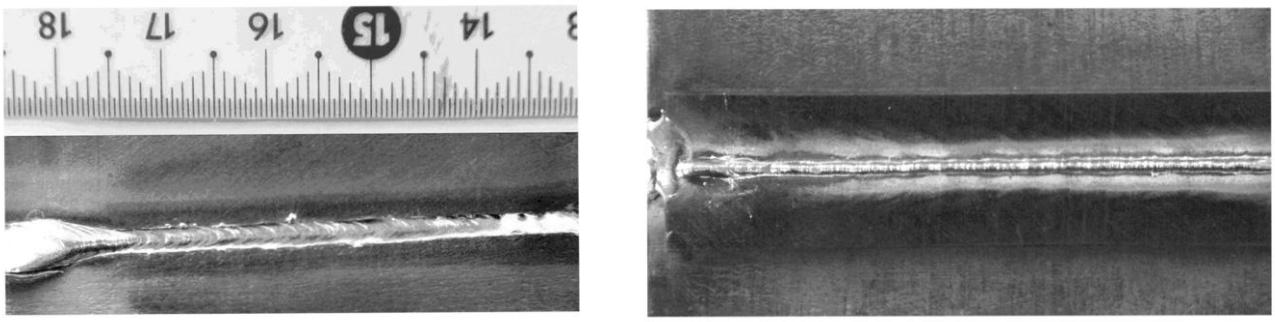
Сварные швы имели V–образное сечение, с шириной по наружней поверхности 2,7–3,2 мм, а с внутренней – 1,3–2,0мм. Визуальным контролем и методом цветной дефектоскопии поверхностных дефектов обнаружено не было. Рентгеновский контроль проведён на аппарате РАП–150/300, позволяющим выявить поры с размером до 0,1мм. После электронно-лучевой сварки по

исследуемым режимам внутренних дефектов не выявлено. Металлографическим методом металлургических и других дефектов в материале сварных швов также не обнаружено (рис.2).

Таблица 2

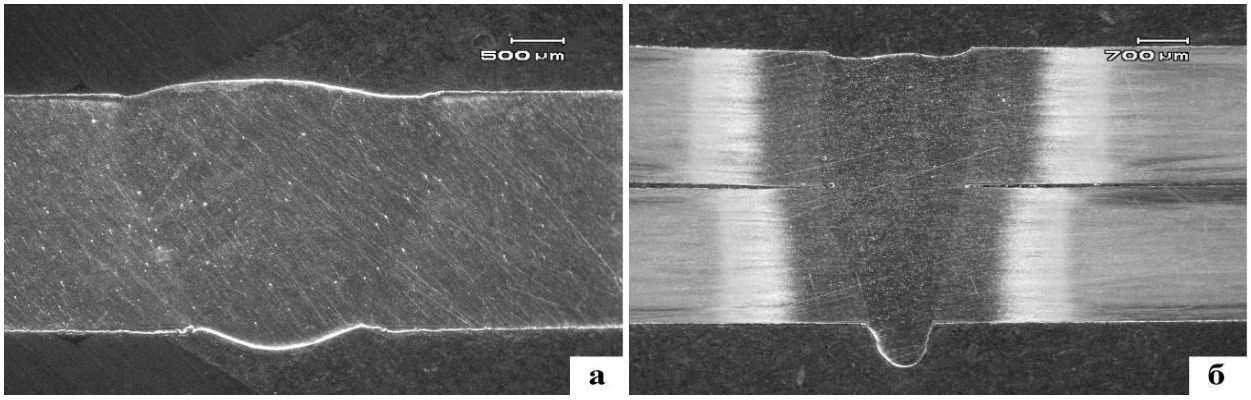
Режимы электронно-лучевой сварки

Номер сварного шва	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток сварки, мА	Скорость сварки, м/ч
1 (на весу)	60	25,0	30
2 (на весу)	60	17,5	20
3 (на весу)	60	15,0	15
4 (в стык; на подкладке)	60	25,0	30



а) б)

Рис.1. Внешний вид сварных швов № 3 (*а*), №4 (*б*)



а) *б*)

Рис.2.Макроструктура сварных швов № 2 (*а*), №4 (*б*)

Измерение микротвердости проводили на приборе LEIGA MNT–10 с нагрузкой 100г. Распределение микротвердости в поперечном сечении сварного шва позволяет судить о степени ослабления механических свойств сварного соединения по сравнению с основным металлом. В табл.3 приведены значения микротвердости сварного шва, основного металла и зоны термического влияния (ЗТВ).

Таблица 3

Результаты измерения микротвердости сварного соединения, полученного методом ЭЛС

Номер сварного шва	Микротвердость HV, кгс/мм^2		
	сварной шов	основной металл	ЗТВ
1	313	353	323
2	369	353	332
3	374	353	339
4 (в стык; на подкладке)	374	337	303

Полученные результаты показывают, что минимальные значения микротвердости зафиксированы в зоне термического влияния, однако разница в значениях небольшая и составляет 10% по сравнению с основным металлом.

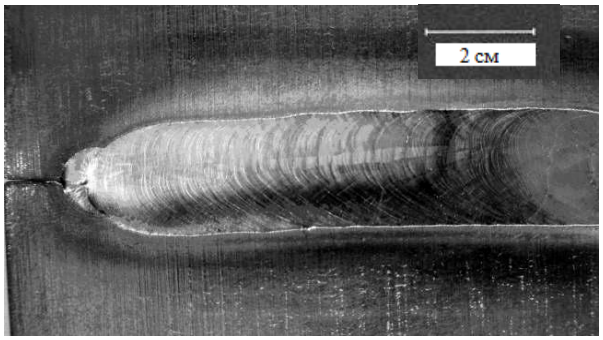
Автоматическая аргонодуговая сварка была проведена на установке. Образцы сваривали в стык и на проплав. Режимы сварки даны в табл.4.

Внешний вид сварного шва приведён на рис. 3а, а на рис. 3б, 3в показана макроструктура сварного шва, сваренного в стык и на проплав.

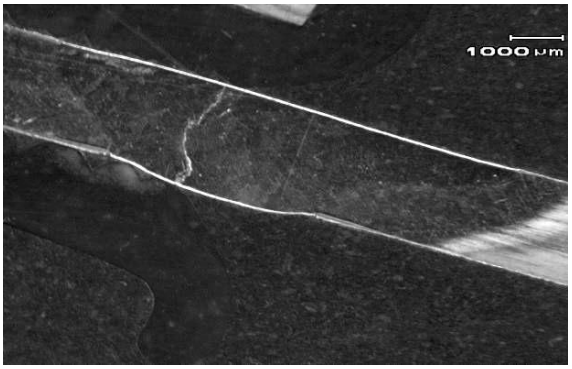
Таблица 4

Режимы аргонодуговой сварки

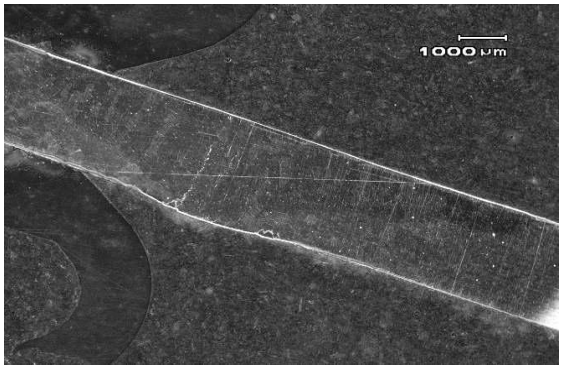
Номер сварного шва	Скорость сварки, м/ч	Ток сварки, А	Длина дуги, мм	Примечание
5 Стыковой	7,0	120	1,0	непровар
6 Проплав	7,0	130	1,0	



а) внешний вид



б) макроструктура шва № 5



в) макроструктура шва № 6

Рис.3.Сварной шов, полученный аргонодуговой сваркой

Ширина сварного шва с наружной стороны была 11 – 12мм, независимо от вида соединения, а с внутренней стороны 7,5мм при сварке в стык и 3мм при сварке на проплав. Значения микротвердости составили 300кгс/см^2 – основной металл, 330 кгс/см^2 –ЗТВ и сварного шва – 354 – 400кгс/см^2, что сопоставимо с результатами измерений микротвердости соединения, полученного электроннолучевой сваркой.

Методами цветной дефектоскопии и металлографии в зоне термического влияния были обнаружены трещины, которые показаны на рис. 4.

Изломы, вскрытые по этим трещинам, показали отсутствие окисления и статический характер разрушения. Вероятно, одной из причин образования трещин при аргонодуговой сварке является специфика процесса кристаллизации малопластичного интерметаллидного соединения Ti_2NbAl. В ограниченном объёме

сварочной ванны не успевают проходить в полном объёме релаксационные процессы и остаточные напряжения вызывают микрорастрескивание в околошовной зоне. Исследования по аргонодуговой сварке данного сплава необходимо продолжить в направлении снижения погонных энергий процесса сварки.

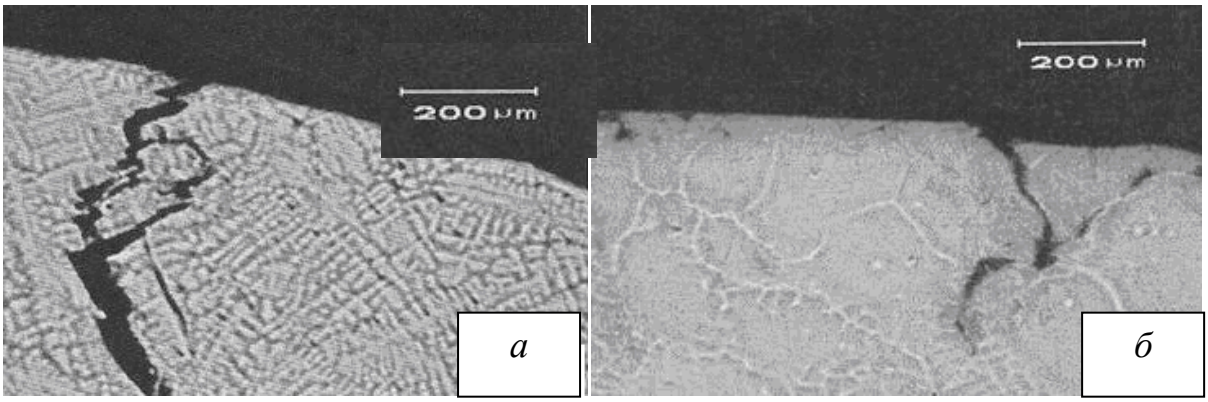


Рис.4.Микроструктура сварных швов образцов в зоне дефектов:

а) – шов № 5, б) – шов № 6

На основании проведённых исследований сварных соединений сплава на основе интерметаллидного соединения Ti_2NbAl методами металлографии, рентгеновского контроля, цветной дефектоскопии установлена возможность получения качественного сварного соединения листов толщиной 2,5мм методом электронно-лучевой сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. С. 491-505.
2. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана.// Авиационные материалы и технологии: научно-технический сборник. М.: ВИАМ, 2012. №5. С. 196 – 206.
3. Шарова Н.А., Живушкин А.А., Васильев А.В., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Иванов В.И. Использование новых титановых сплавов при формировании конструктивного облика компрессора перспективного авиационного двигателя//

Современные титановые сплавы и проблемы их развития: научно-технический сборник. М.: ВИАМ, 2010 С. 62 – 68.
4. Сорокин Л.И. Электронно- лучевая сварка жаропрочных сплавов// Сварочное производство, 1998. №5. С. 9 – 15.
5. Муравьёв В.И., Матвиенко Д.В. Особенности несущей способности сварных титановых конструкций// Сварочное производство. 2004, №9. С. 7–14.

УДК 621.785.532

А.В. Виноградов, Л.П. Фомина (*ФГУП «НПЦГ «Салют»*)

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО И ВАКУУМНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» является ведущим в России предприятием по производству, ремонту и обслуживанию надежных, безопасных современных авиационных двигателей для военной и гражданской авиации, а также оборудования, оснастки и инструмента. По организационно-производственной структуре предприятие относится к серийному, с полным технологическим циклом производства. Оно располагает всей совокупностью заготовительных, обрабатывающих и сборочных цехов. В соответствии с мировой тенденцией создания новых производственных систем на предприятии интенсивно ведутся работы по техническому переоснащению. Закупается импортное оборудование, модернизируются участки, разрабатываются технологии для рационального использования нового оборудования.

Одним из основных выпускаемых изделий на предприятии является авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) АЛ-31Ф (рис.1) и его модификации. Трансмиссия АЛ-31Ф (рис.2) выполнена в виде двух коробок агрегатов (рис.3). Важный узел трансмиссии – центральный конический привод, состоящий из зубчатых передач. Через него передается вся энергия, идущая на привод агрегатов. Надёжная работа этих зубчатых передач определяет живучесть

самолета и двигателя, так как поломка прекращает работу топливных насосов, электроснабжение и работу гидравлической системы [1].

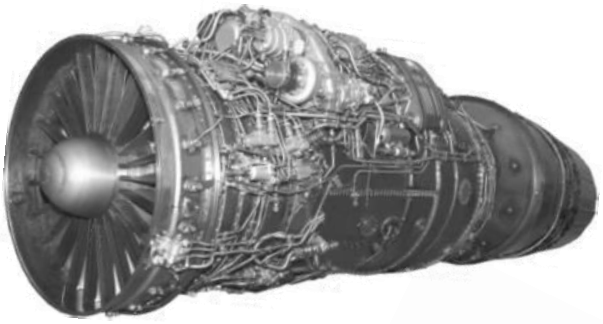


Рис. 1. Турбореактивный двухконтурный двигатель АЛ-31Ф

Рис. 2. Истребитель СУ-27

Рис. 3. Коробка агрегатов двигателя АЛ-31Ф

Для изготовления зубчатых колес специально разработаны ВИАМом и рекомендованы в качестве цементуемых комплексно-легированные, высокопрочные теплостойкие стали мартенситного класса: 16Х3НВМФБ-Ш (ВКС-5), 14ХГСН2МА (ДИ3А), 16Х2Н3МФБАЮ-Ш (ВКС-7) И 10Х3Н3М2ВФБ-Ш (ВКС-10) [2]. Выбор вида химико-термического упрочнения рабочих поверхностей зависит от конструктивно-технологических особенностей и эксплуатационных характеристик деталей. Для обеспечения контактной выносливости, выносливости зубьев при изгибе, стойкости к заеданию целесообразно применять цементацию, а для обеспечения высокой твердости поверхности, износостойкости и высокой теплостойкости рабочей поверхности – азотирование. В

настоящее время среди современных упрочняющих технологий, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики деталей ГТД, особый интерес представляют ионно-плазменные и вакуумные процессы цементации и азотирования.

Освоение процесса ионной и вакуумной цементации проводилось совместно с сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2002г. на впервые в России созданном участке ионной и вакуумной химико-термической обработки предприятия «Салют». Участок включает установку «Салют-60М» для ионного азотирования (с дополнительным подогревом деталей), разработанную совместно с сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также моечную машину, низкотемпературный ларь и однокамерную вакуумную печь с системой охлаждения в газовом потоке под давлением для различных видов термообработки. Базовой единицей участка является трехкамерная печь фирмы «Ipsen» (рис.4), предназначенная для проведения процессов как ионной, так и вакуумной цементации (нитроцементации), которые можно сочетать с непосредственной закалкой.

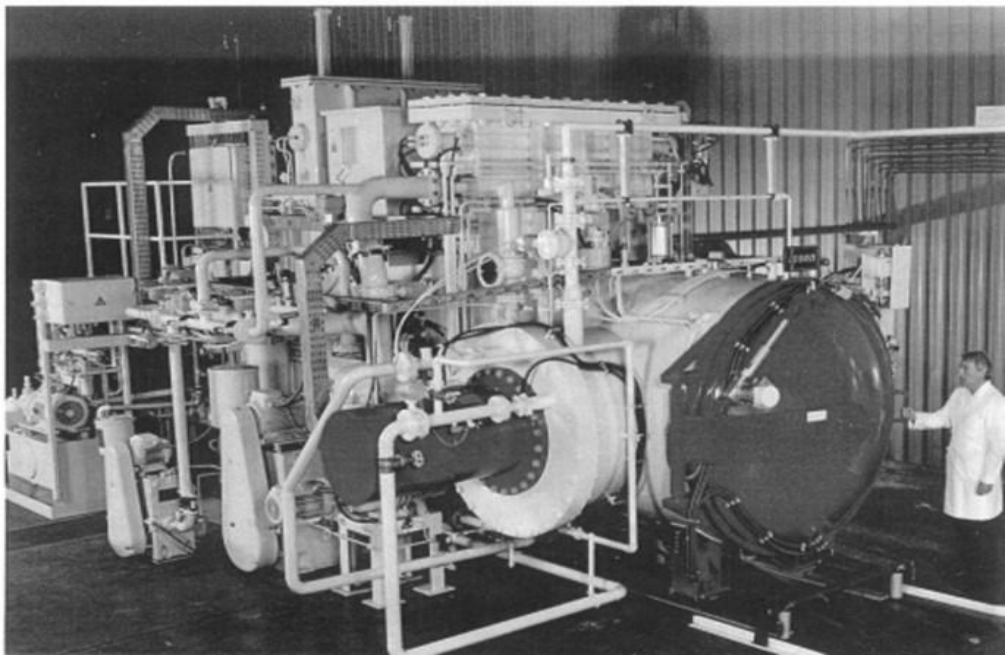


Рис. 4. Общий вид промышленной трехкамерной установки фирмы «Ipsen»

Авиационный ГТД включает более ста цементируемых деталей, из которых основное количество составляют зубчатые колеса различных типоразмеров [1]. Конструктивные типы колес разнообразны: цилиндрические, конические, прямозубые, косозубые, и пр. Зубчатые колеса выполняют ″ажурными″, максимально облегченными. При изготовлении они являются одними из сложных деталей двигателя.

Главное достоинство ионной [1] и вакуумной [3] цементации заключается в формировании диффузионных слоев, обладающих высокой несущей способностью без окисления и обезуглероживания поверхности. Однако при ионной цементации в наиболее охлажденных зонах токовводов происходит осаждение сажи, являющейся токопроводящей и вызывающей электропробои и нестабильность тлеющего разряда. Поэтому для использования в производстве было отдано предпочтение вакуумной цементации, обладающей практически не меньшими достоинствами.

Эксплуатационные свойства зубчатых колес возрастают по мере увеличения прочности и твердости сердцевины, достигая максимальных значений (σ=1200МПа, HRC 42-43) [2]. Такие свойства обеспечивают стали типа ВКС-5 структуру малоуглеродистого мартенсита. Особенностью науглероживания этих сталей является повышенная склонность к карбидообразованию. В результате цементации образуются диффузионные слои (рис.5), состоящие из трех зон:

- активной карбидной зоны, состоящей из частиц легированного цементита,
- зоны специальных карбидов,
- зоны твердого раствора.

Условием обеспечения высокой твердости поверхности является зона карбидов. Протяженность этой зоны должна быть не менее 0,3мм, так как значительная ее часть (0,2мм) удаляется при шлифовании. Зубошлифование является обязательной операцией для восстановления степени точности зубчатых колес после высокотемпературной химико-термической обработки, в результате которой возникают деформации и коробления. Окончательно готовые детали приобретают твердую цементированную поверхность 60-64 HRC и вязкую сердцевину 38 – 43 HRC [1,2].

Технологический маршрут упрочнения зубчатых колес из сталей типа ВКС-5, ДИЗА состоит из предварительной термической обработки, вакуумной цементации и окончательной термической обработки с промежуточными этапами механической обработки. Для ряда деталей разработаны технологические маршруты с непосредственной закалкой и с двойной цементацией для упрочнения шлиц [1]. Разработаны режимы вакуумной цементации, отвечающие условиям высокого сопротивления усталостному разрушению, сопротивлению к заеданию и контактной выносливости [4], что важно для целой группы высокоскоростных зубчатых колес ГТД.

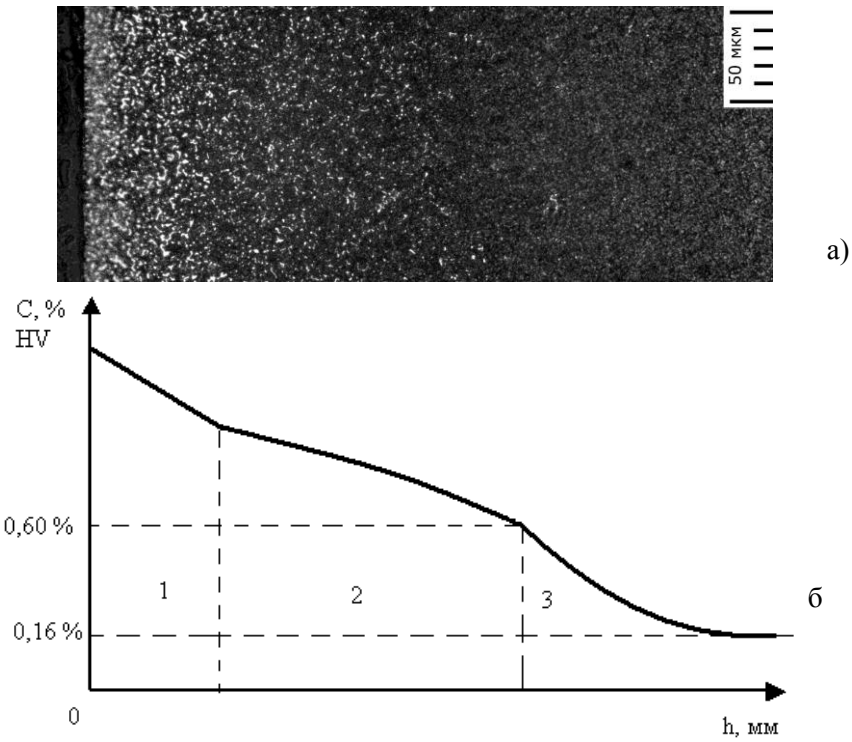


Рис. 5. Микроструктура цементированного слоя (а) и схема распределения по слою концентрации углерода С и твердости HV в различных зонах цементированого слоя стали ВКС-5 (б): *1) активная карбидная зона, 2) зона специальных карбидов и 3) зона твердого раствора*

Ионное азотирование зубчатых колес применяют как процесс, альтернативный процессу цементации, так как он относится к малодеформационным способам поверхностного упрочнения деталей. Низкая температура процесса (480 – 580°С) и отсутствие фазовых превращений при упрочнении обуславливают значительное снижение деформаций деталей [1,2].

Освоение процесса ионного азотирования на предприятии «Салют» проводилось при активном участии ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана. В 1969г. была создана первая опытно-промышленная установка ионного азотирования мощностью 30кВт. С 1981г. совместно с ПНИТИ (г.Пермь) разработана и успешно функционирует по настоящее время установка «Ион-30», предназначенная для упрочнения, как деталей основного производства, так штампового и режущего инструмента. Для ионного азотирования зубчатых колес и других деталей авиационного двигателя совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана, разработана и введена в строй в 1999г. установка «Салют-60» (рис.6) полезной мощностью 70кВт., вместимость камеры 1,1м^3, максимальная масса садки 600кг. Эта установка работает и сегодня, выпуская продукцию, параллельно ведется переоснащение химико-термического производства. В 2005г. была приобретена немецкая ионно-плазменная установка «Эльтропульс» для азотирования с функцией дополнительного подогрева деталей и полной автоматизацией процесса (рис.7).

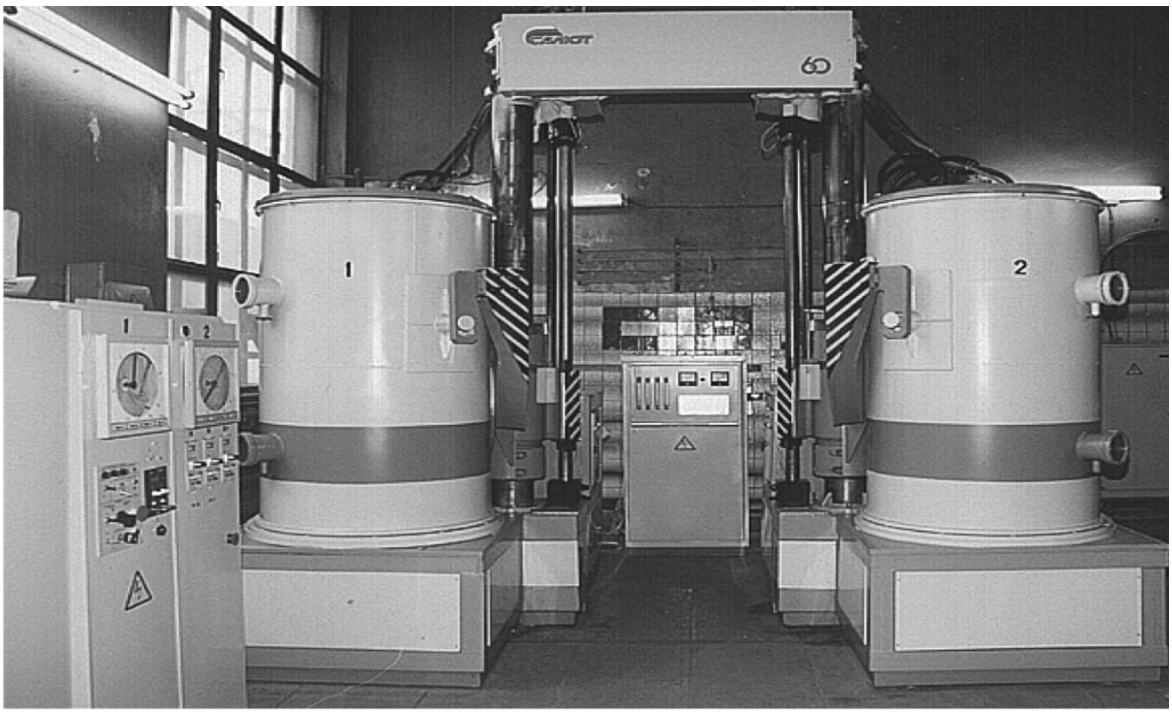


Рис. 6. Промышленная установка для ионного азотирования «Салют-60»:
1,2 – газоразрядные камеры [1]

Рис.7. Внешний вид установки ионного азотирования «Эльтропульс»

Ионное азотирование является одним из основных методов повышения износостойкости деталей ГТД. Технология этого процесса основана на применении высокопрочных сталей мартенситного класса типа ВКС-5, ВКС-7 и др. Важная особенность таких сталей заключается в способности сохранять прочность и твердость сердцевины при нагреве до температур 500 – 530ºС [1,2].

Технологический маршрут упрочнения серийных деталей ГТД из сталей типа ВКС-5 состоит из нескольких этапов [1,2]. На первом этапе штамповка проходит предварительную термическую обработку, затем идет на 1-й и 2-й этапы механической обработки. В термическом цехе готовую деталь подвергают окончательной термообработке, далее выполняют шлифование (3-й и 4-й этап механической обработки), после которого деталь отправляют на участок ионного азотирования. Детали сложной конфигурации перед ионным азотированием подвергают стабилизирующему отпуску. Ионный процесс обеспечивает равномерное распределение диффузионного слоя по профилю зуба (рис.8), высокий уровень твердости вблизи поверхности и плавное снижение по толщине слоя (рис.9). Микроструктура азотированного слоя (рис.10) состоит из тонкого нитридного слоя (1-5мкм – светлая зона на поверхности) и расположенной под ним диффузионной зоны (насыщенный азотом

а-твердый раствор с избыточными выделениями высокодисперсных нитридов легирующих элементов). Азотированный слой обеспечивает более высокую твердость на поверхности (по сравнению с цементацией), обладает высокой теплостойкостью, износостойкостью и высоким сопротивлением заеданию. Благодаря перечисленным достоинствам азотированные зубчатые колеса способны работать в условиях высоких окружных скоростей, но при ограниченных контактных нагрузках из-за малой толщины слоя (не более 0,5мм).

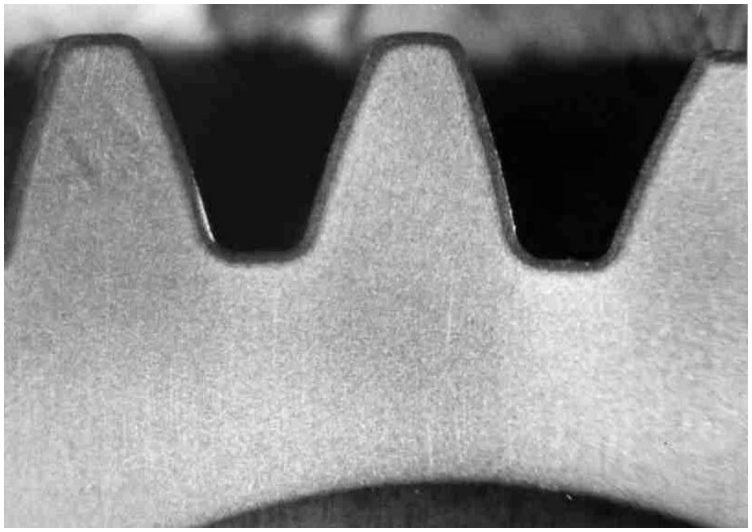


Рис. 8. Распределение азотированного слоя по профилю мелкомодульного конического зубчатого колеса из стали ВКС-5[2]

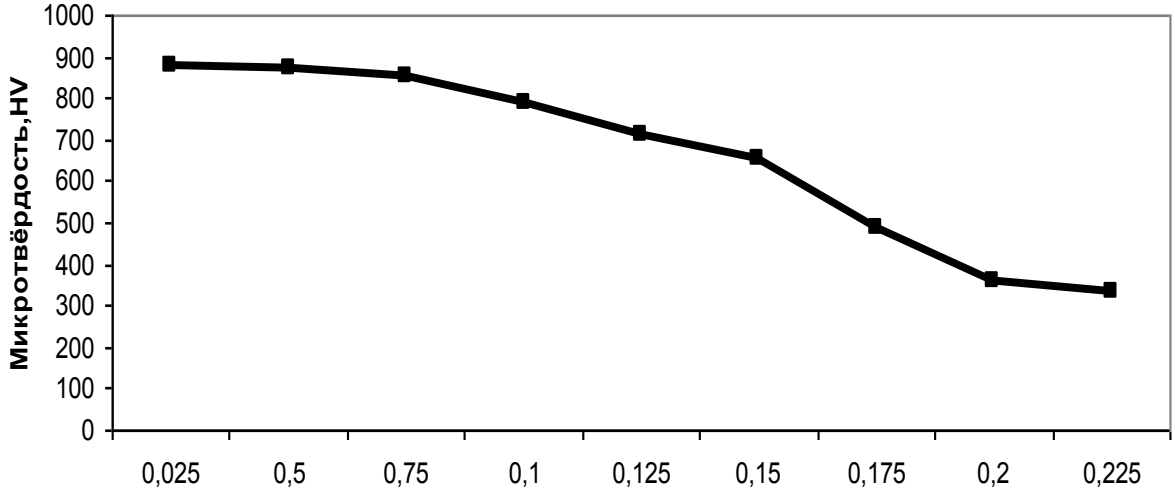


Рис. 9. Распределение твердости по толщине азотированного слоя стали ВКС-5 [2]

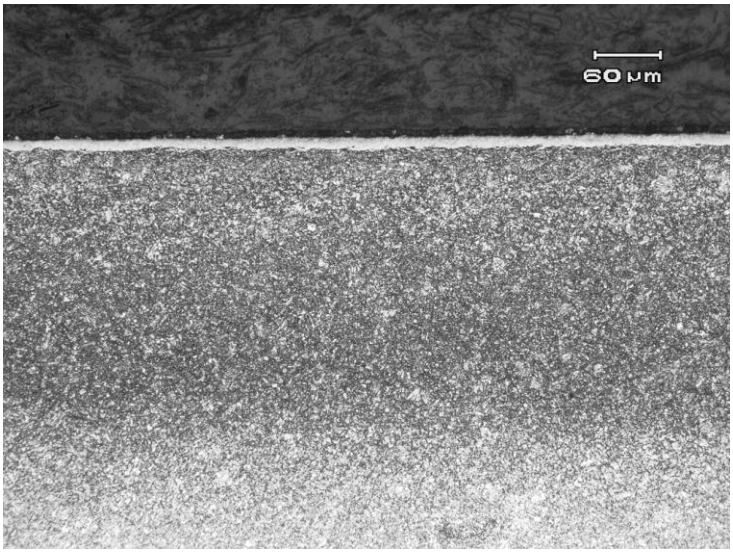


Рис. 10. Микроструктура приповерхностного слоя стали ВКС-5 после ионного азотирования [1]

Перспективной для азотирования зубчатых колес является сталь ВКС-7. Для упрочнения этой стали разработан двухступенчатый режим ионного азотирования [5], формирующий диффузионный слой, структурное состояние и характеристики которого обеспечивают контактную выносливость соизмеримую с цементуемыми сталями типа 18Х2Н4ВА. Высокое сопротивление контактной усталости обусловлено большой толщиной (0,7мм) и высокой твердостью азотированного слоя, высокой прочностью сердцевины (σ=1280МПа), мелким зерном аустенита (номер 13), равномерным распределением нитридных фаз по объему зерна. Благодаря совокупности факторов, таких как состав стали, технология предварительной обработки и температурно-временные режимы ионного азотирования, структурное состояние азотированного слоя, затрудняется развитие контактной усталости.

Номенклатура авиационных деталей редукторов и приводов газотурбинных двигателей, в том числе ТВД-1500 и РД-600, упрочняемых ионным азотированием, насчитывает более двухсот штук. Кроме зубчатых колес и рессор, изготовливаемых из высокопрочных сталей мартенситного класса, также производят ряд деталей: сферы, ролики, оси, валики, клапаны, обоймы и др. из сталей

марок:14Х17Н2-Ш,15Х16К5Н2МВФАБ-Ш (ЭП866-Ш), 20Х3МВФА-Ш, 25Х18Н8В2-Ш, 30Х2Н2ВФМА, 30Х2НВА и др.

С целью повышения качества упрочнения деталей ГТД необходимо разрабатывать новые упрочняющие технологии. Наиболее перспективным процессом, сочетающим достоинства цементации и азотирования, является ионная (вакуумная) нитроцементация [1]. Трехкамерная установка фирмы «Ipsen» обладает необходимыми технологическими возможностями для реализации процесса ионной и вакуумной нитроцементации: регулируемой подачей технологических газов, нужными техническими характеристиками плазменного генератора, возможностью регулирования температуры, времени и давления в камере печи. Отсутствие внутреннего окисления легирующих элементов является решающим фактором, препятствующим образованию в диффузионном слое дефектных структур, что снимает ограничение на толщину диффузионного слоя и допустимую концентрацию азота. Гибкая система охлаждения предоставит возможность обрабатывать детали из сталей различных марок. Процесс ионной нитроцементации представляет собой резерв повышения эксплуатационных свойств зубчатых колес газотурбинных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. и др. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. М.: Высшая школа, 2001. 493с.
2. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 1999. 399с.
3. Смирнов А.Е., Рыжов Н.М., Фахуртдинов Р.С. Особенности вакуумной цементации в ацетилене теплостойкой стали// Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 6. С.10-15.
4. Фомина Л.П. Разработка и анализ технологии ионной и вакуумной цементации зубчатых колес авиационных двигателей: дисс. канд. техн. наук. Москва, 2009. 342с.
5. Герасимов С.А. Научные основы разработки технологических процессов азотирования конструкционных легированных сталей, обеспечивающих повышение работоспособности изнашивающихся сопряжений машин: дисс. д-ра техн. наук. Москва, 1997. 553с.

УДК 621.762

С.А. Перевоин, Е.А. Исаева (ФГУП «НПЦГ «Салют»)

СОЗДАНИЕ КОМПЕНСАТОРОВ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ГТД МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Дальнейшее развитие авиационных ГТД требует применения новых материалов с более высокими эксплуатационными свойствами, а именно: жаростойкостью и износостойкостью [4, 5].

Работоспособность различных материалов в конструкциях узлов авиационных деталей в условиях высоких температур и окислительных сред с необходимым ресурсом показала, что помимо жаропрочных сплавов, могут применяться керамические материалы, которые имеют низкую плотность, высокую стойкость к термической усталости, малую деформацию ползучести и легко выдерживают высокие температуры.

Основными требованиями, предъявляемыми ко всем антифрикционным материалам, являются минимальный коэффициент трения и высокая износостойкость. Эти свойства определяют минимальные потери энергии в узлах трения и максимальный срок их службы.

Керамические материалы, обладающие более высокими эксплуатационными свойствами, наряду с этим имеют и другие свойства, значительно отличающиеся от металлических материалов, используемых в авиационных ГТД, а именно: большая хрупкость, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), значительно отличающийся от металлических материалов, высокая твердость [1-3].

Именно эти свойства создают значительные препятствия на пути применения их в перспективных авиационных ГТД. Связано это с тем, что детали из керамических материалов в авиационных ГТД работают в сопряжении с деталями из металлических материалов.

В процессе эксплуатации авиационных ГТД при изменении температуры деталей в них возникают термические напряжения из-за

разности температурного коэффициента линейного расширения у металлических и конструкционных керамических материалов.

Учитывая тот факт, что температурный интервал, в котором происходит изменение температуры деталей авиационного ГТД, очень широк, то и термические напряжения могут достигать значительных величин, часто превышающих допустимые напряжения.

В связи с этим актуально создание компенсаторов термических напряжений, возникающих в сопряжениях между деталями из металлических материалов и деталями из конструкционного керамического материала при эксплуатации перспективных авиационных ГТД, например, в подшипниках скольжения.

Целью применения подшипника скольжения является увеличение долговечности опоры.

Для подтверждения возможности замены шарикоподшипников на подшипники скольжения в верхнем редукторе перспективного изделия были проведены испытания подшипника скольжения в составе мультипликатора (рис.1). Внешний вид втулки подшипника представлен на рис.2.

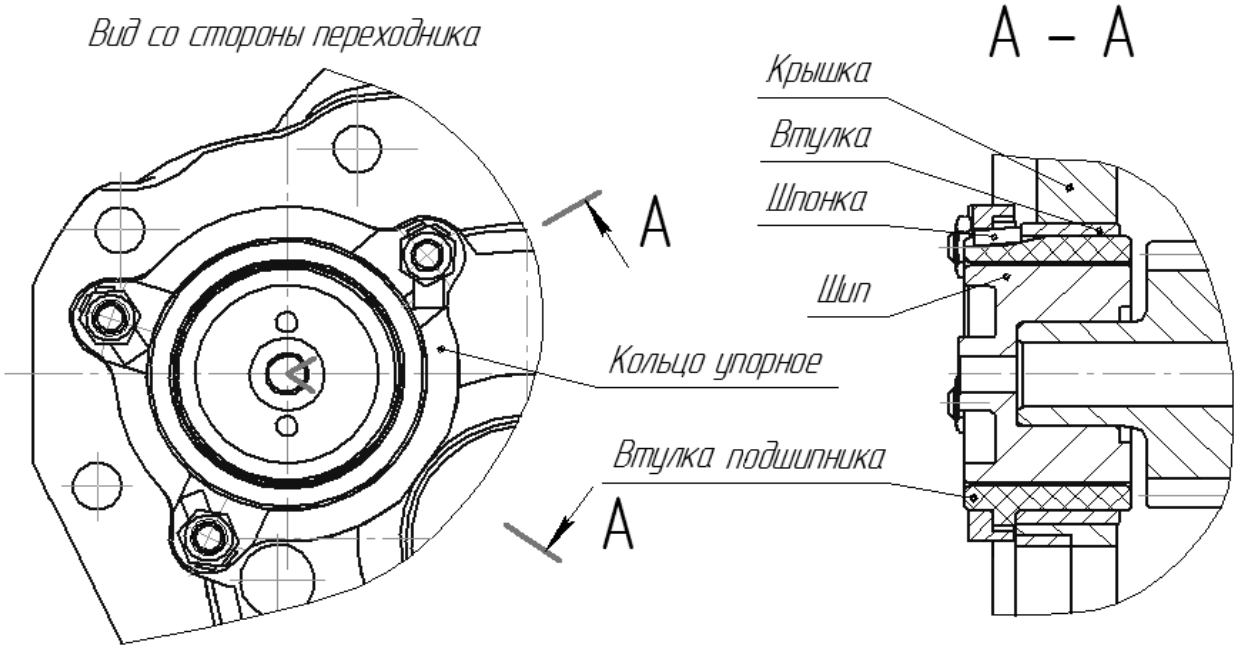


Рис.1. Общий вид подшипника скольжения

Таблица 1

Преимущества и недостатки подшипников

Подшипники качения	Подшипники скольжения
Преимущества	
– небольшие потери на трение; – взаимозаменяемость, облегчающая монтаж и ремонт подшипниковых узлов; – малые пусковые моменты; – нетребовательность к смазке и уходу (за исключением случаев, когда от подшипников, например, роторов авиационных двигателей, необходимо отводить тепло).	– малые габариты в радиальном направлении; – меньшая масса; – возможность работы при высоких скоростях вращения и нагрузках, в жидкостях и в агрессивных средах; – малая чувствительность к ударным и вибрационным нагрузкам; – использование при высоких оборотах.
Недостатки	
– чувствительность к ударам и вибрациям вследствие большой жесткости подшипника; – сравнительно большие радиальные габаритные размеры; – высокий спектр шума при работе с высокой частотой вращения.	– выше, чем у подшипников качения, потери мощности на трение; – более сложная система смазки; – повышенный износ при запуске.

Таблица 2

Свойства композита на основе карбида кремния SiC

Параметр	Значение
Коэффициент линейного расширения, 1/ С	$(2{,}4\text{-}3{,}6)\cdot 10^{-6}$
Коэффициент трения	0,01-0,30
Плотность, кг/м ^{3}	2900-3100
Модуль упругости, ГПа	350-400
Твердость (HRa)	88-94
Прочность, σ, МПа	300
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	140-200
Диапазон рабочих температур, °С	От -50 до +1250

Таблица 3

Условия эксплуатации и параметры подшипника

Параметр	Обозначение	Значение
Нагрузка на подшипник, Н (кгс)	F	1422,45 (145)
Максимальный внутренний диаметр подшипника, м	D_{max}	$43{,}016 \cdot 10^{-3}$
Минимальный внутренний диаметр подшипника, м	D_{min}	$43 \cdot 10^{-3}$
Ширина смазочной канавки, м	b_P	$20 \cdot 10^{-3}$
Максимальный диаметр вала, м	$D_{j,max}$	$42{,}93 \cdot 10^{-3}$
Минимальный диаметр вала, м	$D_{j,min}$	$42{,}919 \cdot 10^{-3}$
Материал вала	-	12Х2Н4А-Ш
Коэффициент линейного теплового расширения вала, K^{-1}	$\alpha_{1,j}$	$11 \cdot 10^{-6}$
Смазочный материал – масло	-	ИПМ-10 ТУ 38.1011299-2006
Температура смазочного материала на входе подшипника, °С	T_{cn}	100
Избыточное давление подачи смазочного материала, Па (кгс/см^2)	p_{cn}	245250 (2,5)

Рис.2.Керамическая втулка подшипника

При снятии экспериментального мультипликатора с технологической коробкой двигательных агрегатов (КДА) были обнаружены осколки подшипника из композиционного материала

размером от десятых долей миллиметра до 15 мм. Впоследствии было обнаружено скручивание шлиц рессоры привода КДА.

При осмотре мультипликатора обнаружено заклинивание шипа в подшипнике и пригар масла на поверхности в двух местах.

При разборке мультипликатора обнаружено:

– на подпятнике незначительные повреждения покрытия,

– на кольце упорном, гайках, шайбах, шпильках – следы нагара масла,

– со стороны упорного кольца на торце подшипника скольжения имеется несколько трещин, капли застывшего алюминия, отсутствуют два небольших фрагмента подшипника,

– шпонка находится в том же положении, как при сборке, подшипник не проворачивался во втулке,

– подшипник со стороны переходника расколот на большие фрагменты,

– имеется значительная деформация втулки, нагар масла и трещина в направлении действия нормальной нагрузки на подшипник,

– один фрагмент подшипника приварен к втулке, по поверхности трещин имеются застывшие подтеки алюминия,

– на втулке имеются отпечатки граней фрагментов подшипника, надиры, сквозная трещина,

– в тонкой перемычке крышки имеется сквозная трещина,

– внутри крышки – надиры от осколков подшипника,

– шип имеет сильный износ – глубокие радиальные риски.

В ходе испытаний подшипник скольжения мультипликатора был разрушен (рис.3).

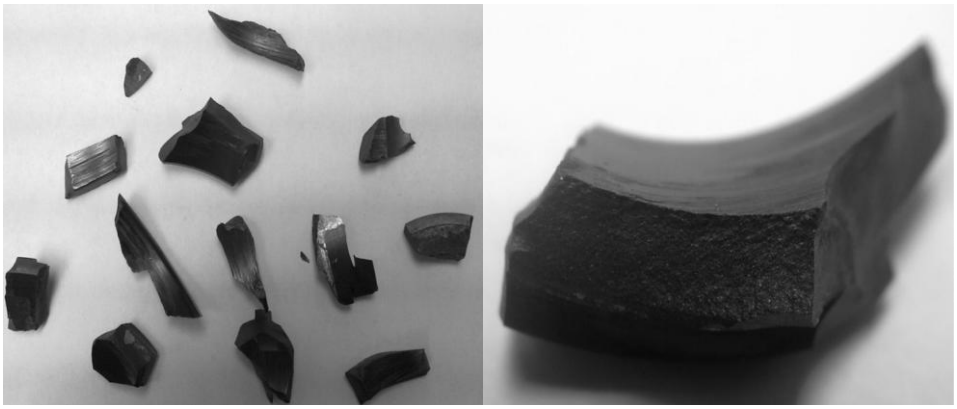


Рис.3.Фрагменты подшипника

Анализ конструкции и результаты испытаний керамического подшипника скольжения выявили следующие замечания:

– из керамической втулки исключить паз под шпонку,

– ответную деталь – шип – выполнить из керамики или стали с покрытием,

– промежуточную втулку изготовить не из материала Д16Т, а из материала с малым температурным коэффициентом линейного расширения, т.е. близким к значению коэффициента для керамики,

– рациональнее выполнить радиальное утолщение керамической втулки,

– рациональнее установить вал с обоих концов на керамические подшипники скольжения,

– целесообразно предусмотреть охлаждение керамического подшипника скольжения маслом.

В связи с этим, было принято решение заменить материал SiC на КНТ16, так как коэффициент линейного расширения КНТ16 близок к металлическому материалу.

Техническое наименование продукта – пара трения из мелкозернистого кермета марки КНТ16. Эмпирическая формула $TiC_{0,5}N_{0,5}$-Ni(Mo).

Таблица 4

Химический состав и основные физико-механические свойства безвольфрамового твердого сплава КНТ16

Марка	КНТ16
Код ОКП	19 6682
Группа применения по ИСО 513-75	Р10-Р20 (К20)
Содержание основных компонентов в смеси исходных порошков (без учета примесей), %, по массе	
Карбо-нитрид титана	74
Никель	19,5
Молибден	6,5
Физико-механические свойства сплавов	
Плотность, $x10^3$ кг/м^3 (г/см^3)	5,5-6,0
Предел прочности при изгибе, Н/мм^2, не менее	1200
Твердость HRA, не менее	89,0

Требования к макроструктуре керметов: на рабочей поверхности не допускаются поры размером более 100 мкм.

Требования к микроструктуре керметов:

– средний размер частиц твёрдой фазы должен составлять 1÷2 мкм (ГОСТ 9391-80),
– степень пористости по ГОСТ 9391-80 не должна превышать 0,2%,
– не допускаются скопления металлосвязки более 20 мкм.

Таблица 5

Требования к рабочим характеристикам изделий

п/п	Наименование показателя	Ед.из-мере-ния	Метод измерения	Номиналь-ное значение	Отклонение
	2	3	4	5	6
	Критическая нагрузка*	кг	ПМ 300404.004	100	не менее
	Коэффициент трения в воде при нагрузке 100 кг*	ед.	ПМ 300404.004	0,2	не более

* - при скорости вращения изделий 2500 об/мин (3,3 м/с).

Внешний вид усовершенствованной втулки подшипника представлен на рис.4.

Рис.4. Металлокерамическая втулка подшипника

Для создания эффективных компенсаторов термических напряжений необходимо в первую очередь выяснить влияние различных факторов (как конструктивных, так и технологических) на

эксплуатационные свойства самих компенсаторов. Содержанием работы является расчетно-аналитическое исследование влияния различных факторов на эксплуатационные свойства компенсаторов. Под этими факторами понимается следующее:

1)влияние химической стойкости металлов на возможность применения их для компенсаторов;

2)влияние электрохимической стойкости металлов в гальванопаре на возможность применения их для компенсаторов;

3)влияние модуля упругости (модуля Юнга) металлов (Е) на эффективность компенсаторов;

4)влияние допустимых напряжений ($[\sigma_{0,2}]$) металлов на эффективность компенсаторов;

5)влияние пластических свойств (δ) металлов на эффективность компенсаторов;

6)влияние величины металлических гранул на эффективность компенсаторов;

7)влияние органического связующего на эффективность компенсаторов;

8)влияние технологии изготовления металлических гранул на величину гранул;

9)влияние вида пористости (закрытая или открытая) на ресурс компенсаторов;

10) влияние величины пористости на эффективность компенсаторов;

11) влияние размера пор на эффективность компенсаторов;

12) влияние различных сочетаний факторов на несущую способность компенсаторов.

В настоящее время в филиале «НИИД» ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» начата работа по созданию компенсаторов термических напряжений для перспективных авиационных ГТД. Сейчас выполняется расчетно–аналитический этап с использованием программного вычислительного комплекса ANSYS и программы QForm.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Либенсон Г. А. Производство порошковых изделий. М.: Металлургия, 1990. 236 с.
2. Фомина О. Н., Суворова С. Н., Турецкий Я. М. Порошковая металлургия. Энциклопедия международных стандартов. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 311 с.
3. Никифорова Э.М. Теоретические основы, технология получения и свойства порошковых материалов. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 301 с.
4. Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысельский И.Д. и др. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения. Киев.: Наукова думка, 1985. 624 с.
5. Бабич И. Д., Вершинина Е. В., Глебов В. А. и др. Металлические порошки и порошковые материалы. М.: ЭКОМЕН, 2005. 520 с.

УДК 66.093.3

В.В.Будилов, К.Н.Рамазанов, И.С.Рамазанов (УГАТУ)

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА

Широкое применение титановых сплавов в авиационной и космической технике связанно с их уникальным сочетанием физических, химических, механических и технологических свойств: высокой температуры плавления, малой плотности (почти в 2 раза меньшей, чем у железа), коррозионной стойкости, немагнитности, низкого модуля упругости, сравнительно высокой прочности, малого коэффициента термического расширения и др. [1-3].

Однако расширению области применения титановых сплавов препятствуют низкое сопротивление абразивному и эрозионному изнашиванию, низкая твердость, склонность к схватыванию при работе в узлах трения и низкая износостойкость. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых методов

поверхностного упрочнения, позволяющих эффективно повышать твердость и трибологические свойства поверхности [1-4].

В настоящее время эффективным способом модификации поверхности титановых сплавов является химико-термическая обработка (ХТО), а именно процесс газового азотирования. Недостатком процесса является длительное время обработки (более 30ч), и, кроме того, температура достигает 950...1470°С, вследствие чего снижается конструкционная прочность из-за укрупнения структурных составляющих [1,3].

Одним из путей интенсификации процесса азотирования является использование разрядов в газе, что позволяет наряду с большой скоростью насыщения сплавов азотом получать целенаправленно контролируемую структуру поверхностного слоя при сохранении механических свойств материала с учетом конкретных условий эксплуатации изделий [1, 5-7].

В работах [5-7] для интенсификации процесса ионного азотирования применяют эффект полого катода (ЭПК), использование которого позволяет повышать производительность и проводить локальную обработку.

Целью работы является исследование влияния азотирования в тлеющем разряде с ЭПК на структуру, фазовый состав, микротвердость поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 и разработка нового технологического процесса поверхностной ионной ХТО титановых сплавов.

Эксперименты проводили на модернизированной установке ЭЛУ-5 (рис.1.). Исследовали образцы размерами 20х10х2 мм из сплава ВТ6 ГОСТ 22178-76. Образцы предварительно подвергались химической очистке, которая представляет собой процесс удаления с поверхности видимых слоев органических загрязнений: остатков масел, смазочных материалов, отпечатков пальцев и жировых пятен. Процесс ХТО проводили при температуре 670 – 750°С в смеси Ar-85% N_2 – 15%. Время изотермической выдержки составляло 4часа.

Замеры микротвердости поверхности обрабатываемых образцов осуществлялись на микротвердомере Buehler Omnimet Micromet – 5101 по 10 замеров в каждой области при нагрузке 0,5Н.

Для исследования структуры сплава применялся растровый электронный микроскоп *GSM 6390 (JEOL).*

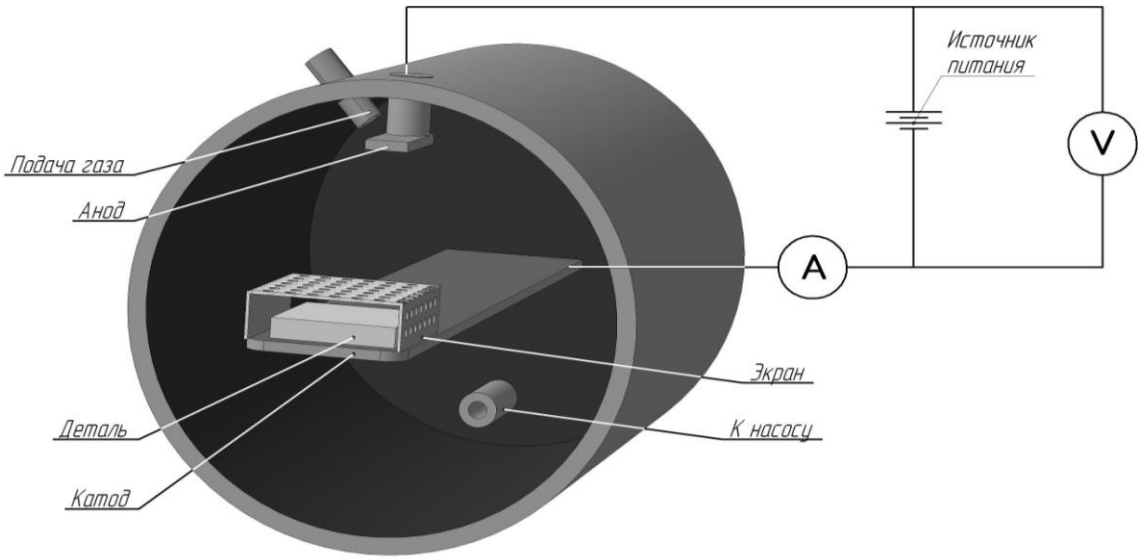


Рис. 1. Устройство для реализации способа азотирования в тлеющем разряде с эффектом полого катода (ЭПК)

Определение фазового состава исследуемой поверхности осуществлялось при помощи дифрактометра общего назначения ДРОН-4-07 с фокусировкой гониометра по Бреггу-Брентано с неподвижной рентгеновской трубкой и вращающимся образцом и счетчиком, а также на рентгеновском дифрактометре общего назначения с вертикальным гониометром фирмы *Shimadzu XRD-6000*.

Результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) показали, что в условиях проявления ЭПК ток разряда в несколько раз выше, чем без проявления ЭПК при одинаковом напряжении горения разряда (рис.2).

Увеличение тока разряда при проявлении ЭПК объясняется тем, что в катодной полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастают число ионов бомбардирующих поверхность, и число электронов, эмитируемых катодом.

Результаты измерения микротвердости поверхности исследуемых образцов показали, что после азотирования в тлеющем разряде с ЭПК микротвердость на поверхности увеличилась в 2,5 – 3 раза, а без ЭПК в 1,5 – 2 раза (табл.1).

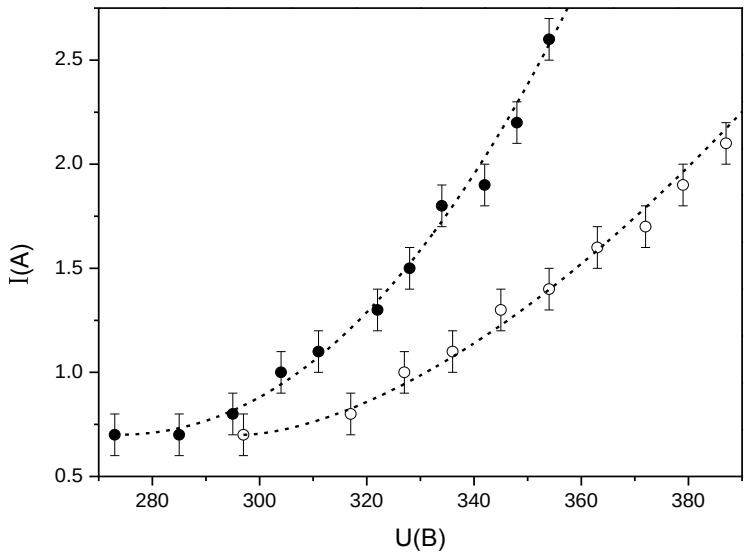


Рис.2. ВАХ характеристики тлеющего разряда при давлении 133 Па:
● – с проявлением ЭПК, ○ – без ЭПК

Таблица 1

Микротвердости поверхности азотированных образцов

Способ азотирования	Исходная микротвердость H_v МПа	После азотирования H_v МПа	Время насыщения τ, ч	Режимы ионного азотирования			
				Давление P, Па	T, °С	I, A	U, B
С ЭПК	5480	13560	4	90	750	1,5	600
Без ЭПК		10300		550	750	2	650

Повышение микротвердости обусловлено образованием нитридов титана и легирующих компонентов на поверхности образцов. При этом установлено, что микротвердость образца после азотирования в условиях проявления ЭПК по сравнению с азотированием без ЭПК в 1,5 раза выше, что связано с интенсификацией процесса насыщения вследствие увеличения концентрации ионов азота в катодной полости под действием осциллирующих электронов.

На рис.3, 4 показаны микроструктуры образцов, подвергнутых азотированию в тлеющем разряде различными способами. На поверхности образцов после азотирования, как в условиях проявления ЭПК, так и без ЭПК, образуется плотный, хорошо

сцепленный с матрицей нитридный слой, который придает азотируемому материалу золотистый цвет.

Анализ микроструктуры образца из титанового сплава ВТ6 после азотирования без ЭПК (рис.3) показал наличие нитридного слоя (рис.3 А) и диффузионной зоны (рис.3 Б).

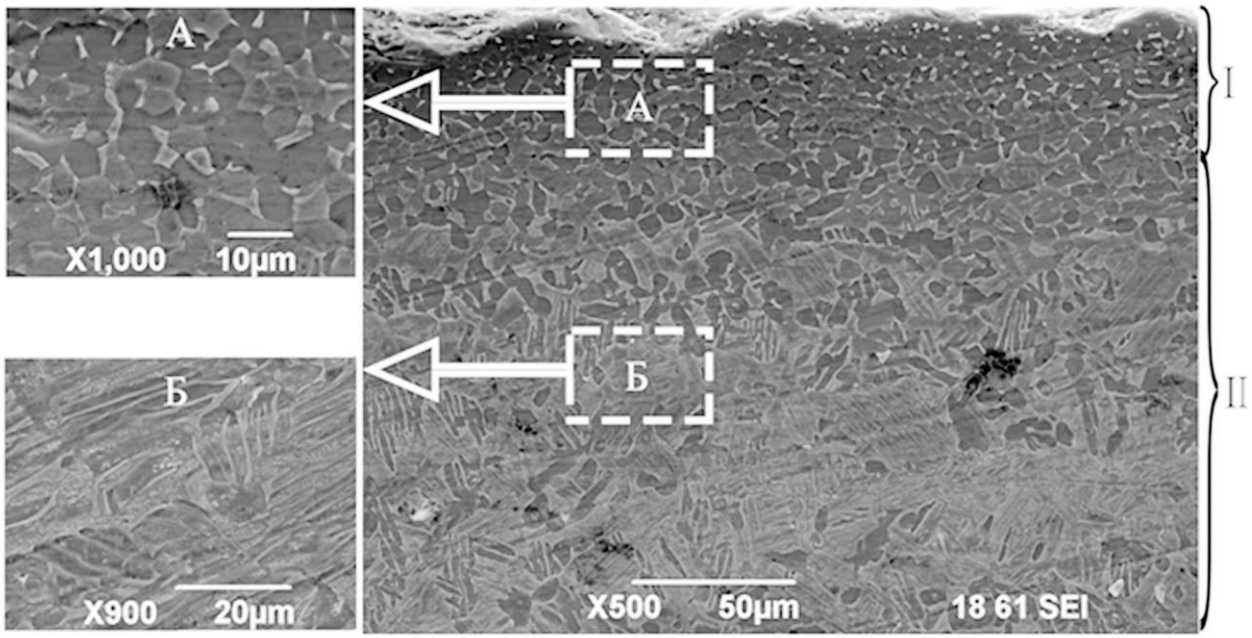


Рис.3. Микроструктура титанового сплава ВТ6 после азотирования без ЭПК: *I- нитридный слой, II- диффузионная зона, А – нитридный слой Х1000, Б – диффузионная зона Х900*

Установлено, что толщина нитридного слоя составила 17 мкм (рис.3), слой имеет мелкозернистую и равноосную структуру (рис.3А) и представляет собой равномерно распределенную смесь α-фазы и α+β-фазы с нитридами. Известно [2], что равноосная структура обеспечивает высокие пластические свойства.

Диффузионная зона, толщина которой составила 19 мкм (рис.3), представляет собой мелкозернистую структуру корзиночного плетения (рис.3 Б). Участки, вытянутые в виде пластин, являются α-фазой, между которыми располагаются смеси α- и β-фаз и твердый раствор на основе азота.

На общем виде микроструктуры (рис.3) отчетливо видно разделение зон, отсутствие крупнозернистой структуры, что положительно сказывается на твердости сплава. Переход от

азотированного слоя к нижележащим слоям плавный, что является одним из основных требований к азотированному слою.

Анализ микроструктуры титанового сплава ВТ6 после азотирования в условиях проявления ЭПК показал наличие по толщине неоднородного нитридного слоя и неоднородной диффузионной зоны (рис. 4) вследствие применения специального экрана для образования эффекта полого катода [7].

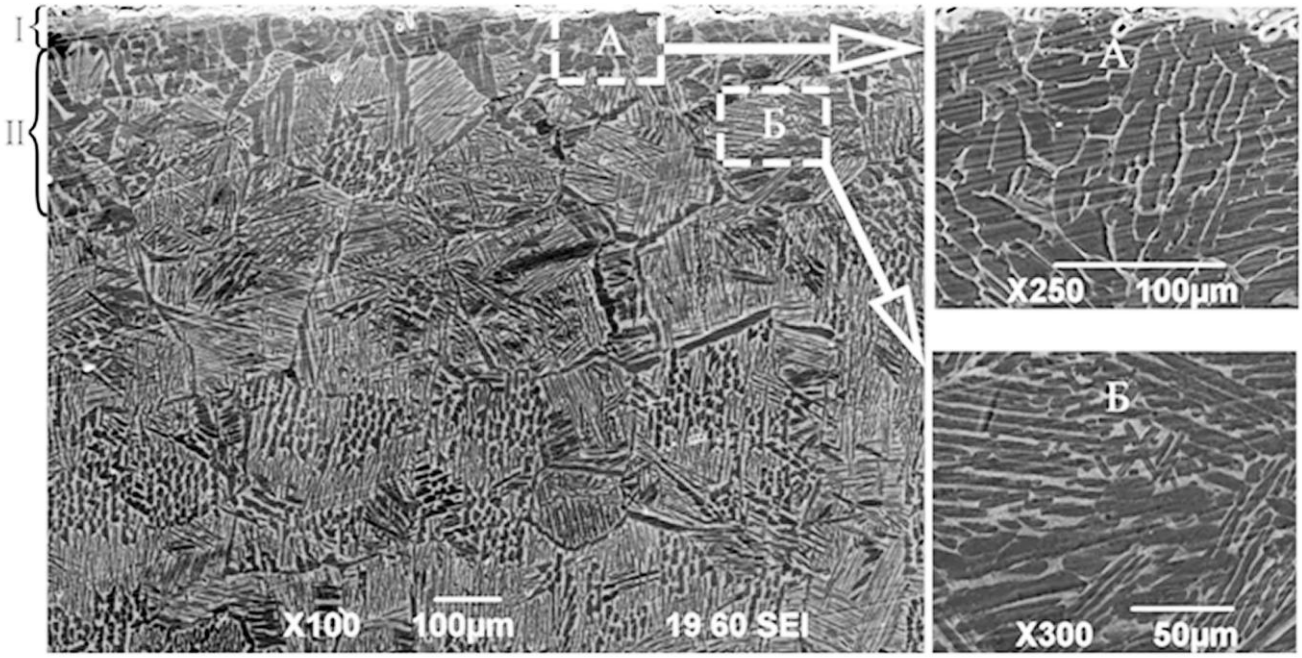


Рис.4. Микроструктура титанового сплава ВТ6 после азотирования в тлеющем разряде с проявлением ЭПК: *I-нитридный слой, II- диффузионная зона, А – нитридный слой Х250, Б – диффузионная зона Х300*

Установлено, что нитридный слой, толщина которого изменяется в диапазоне от 20 до 25мкм, имеет мелкозернистую, равноосную структуру (рис.4А).

При переходе к нижележащей диффузионной зоне наблюдаются выделения по границам фаз (рис.4). Известно [2], что α-фаза начинает выделяться на дефектах структуры границы β-зерен и β-субзерен.

В диффузионной зоне наблюдаются структуры корзиночного плетения, равноосная и игольчатая (рис. 4Б). Отчетливо видны зерна образованных фаз. И при этом возможность «увидеть» структуру связана с образованием α-фазы в виде оторочки по границам новых зерен [2]. Толщина зоны изменяется от 60 до 80мкм.

Как и в случае азотирования без ЭПК, отсутствует крупнозернистая структура, и переход от слоя к слою плавный (рис.4).

На рис. 5 – 7 приведены дифрактограммы образцов из сплава ВТ6 в исходном состоянии и после азотирования в тлеющем разряде различными способами.

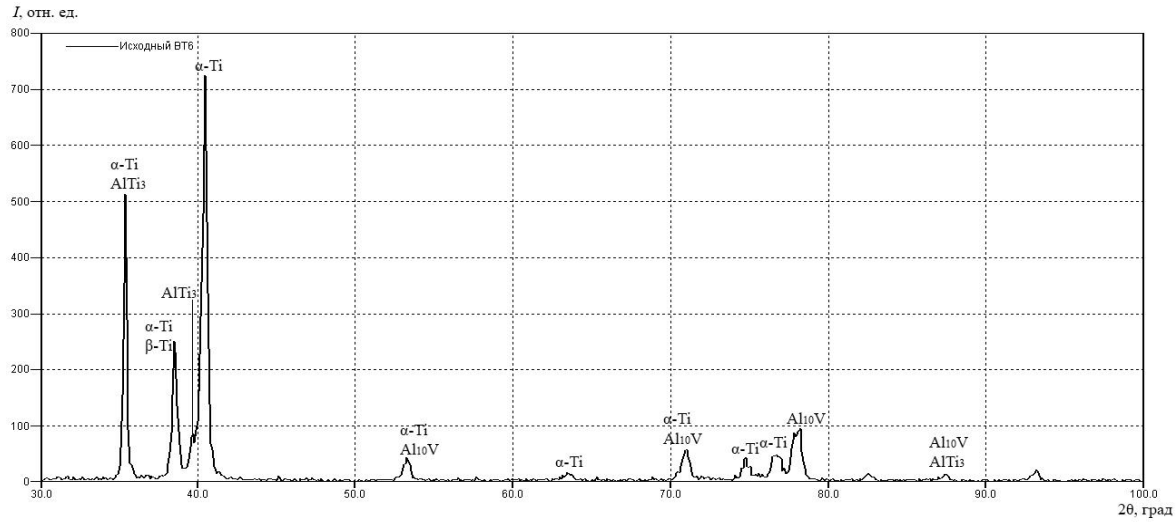


Рис. 5. Дифрактограмма сплава ВТ6 в исходном состоянии

Анализ дифрактограммы образца из сплава ВТ6 в исходном состоянии (рис.5) показал наличие интерференционных пиков α-Ti, рефлексы средней интенсивности β-фазы и несколько пиков интерметаллидного соединения $AlTi_3$, $Al_{10}V$. При этом α-Ti имеет ГПУ – решетку с параметрами a=0,29 нм, c=0,467 нм, β-Ti – ОЦК – решетку с параметрами a=0,331 нм.

Анализ дифрактограммы образца после азотирования без ЭПК показал (рис.6), что, по сравнению с исходным состоянием, произошло уменьшение количества α-фазы и увеличение β-фазы в связи с приближением к температуре полиморфного превращения α→β-фазы (рис.6).

Установлено, что азотирование привело к синтезу нитридов титана различного стехиометрического состава (*TiN*, Ti_2N, $TiN_{0,90}$), также обнаружены рефлексы нитридов и интерметаллидов основных легирующих элементов ($Ti_3Al_2N_2$, Ti_2AlN, *AlN*, $AlTi_3N$, $Al_{10}V$, $Al_{23}V_4$). Это связано с дисперсностью структуры и температурой азотирования, при которой протекают различные диффузионные процессы и химические реакции.

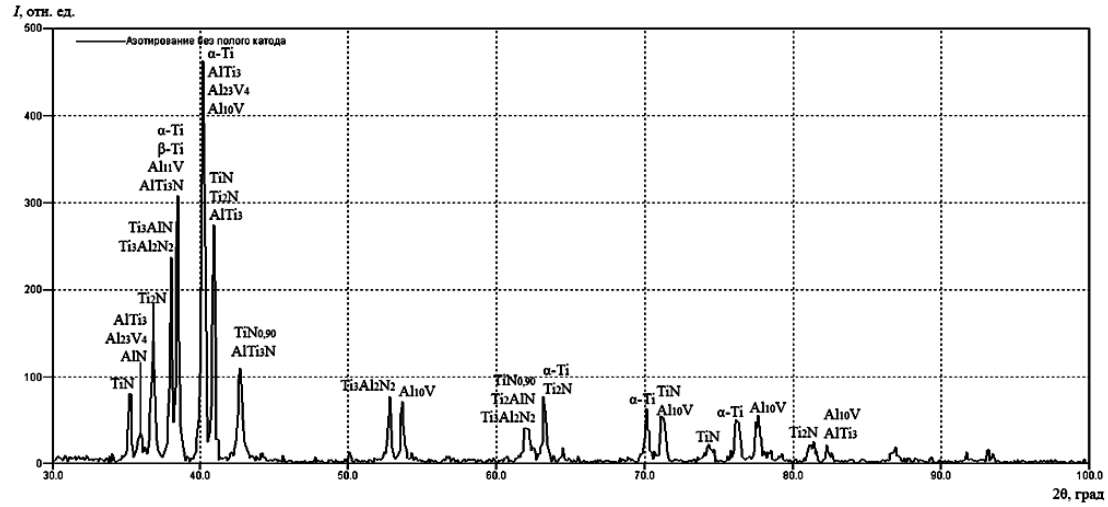


Рис. 6. Дифрактограмма сплава ВТ6 после азотирования в плазме тлеющего разряда без ЭПК

Анализ дифрактограммы образца из сплава ВТ6 после азотирования в тлеющем разряде с ЭПК (рис.7) показал, что по сравнению с азотированием без ЭПК, произошло увеличение количества β-фазы и нитридов титана (Ti_4N_3), что связано с интенсификацией химических реакций и диффузионных процессов, вследствие многократного увеличения концентрации заряженных частиц в зоне обработки.

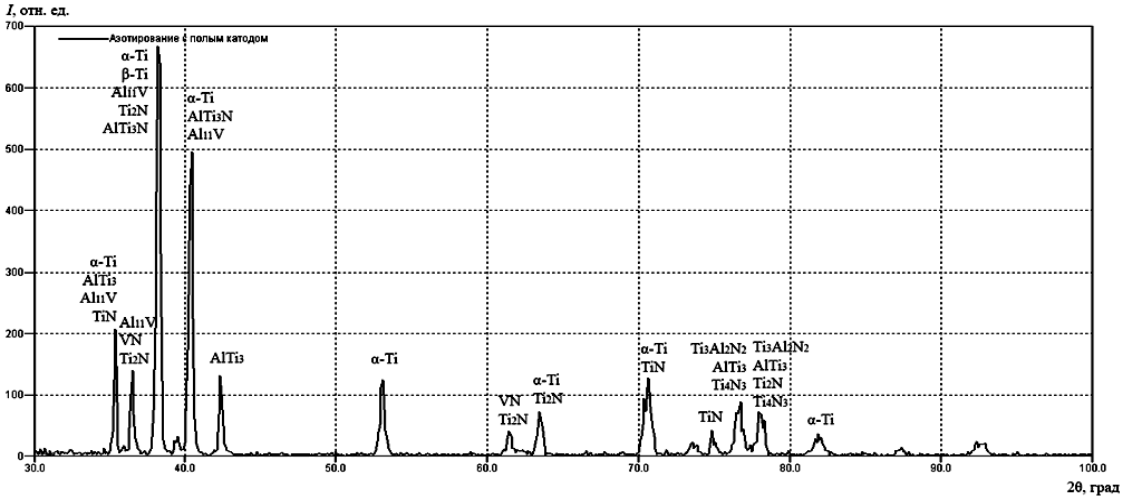


Рис. 7. Дифрактограмма сплава ВТ6 после азотирования в плазме тлеющего разряда с ЭПК

При насыщении титановых сплавов азотом происходит перераспределение легирующих элементов между азотированным слоем и основой сплава, интенсивность такого перераспределения

определяется растворимостью и диффузионной подвижностью легирующих элементов.

На основе проделанных экспериментов был разработан технологический процесс ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом, который включает в себя (рис.8):

- предварительную подготовку обрабатываемых деталей;
- загрузку обрабатываемых деталей в камеру и откачку из камеры воздуха;
- чистку деталей и последующее высокотемпературное азотирование в плазме тлеющего разряда с ЭПК;
- охлаждение обработанных деталей в вакууме.

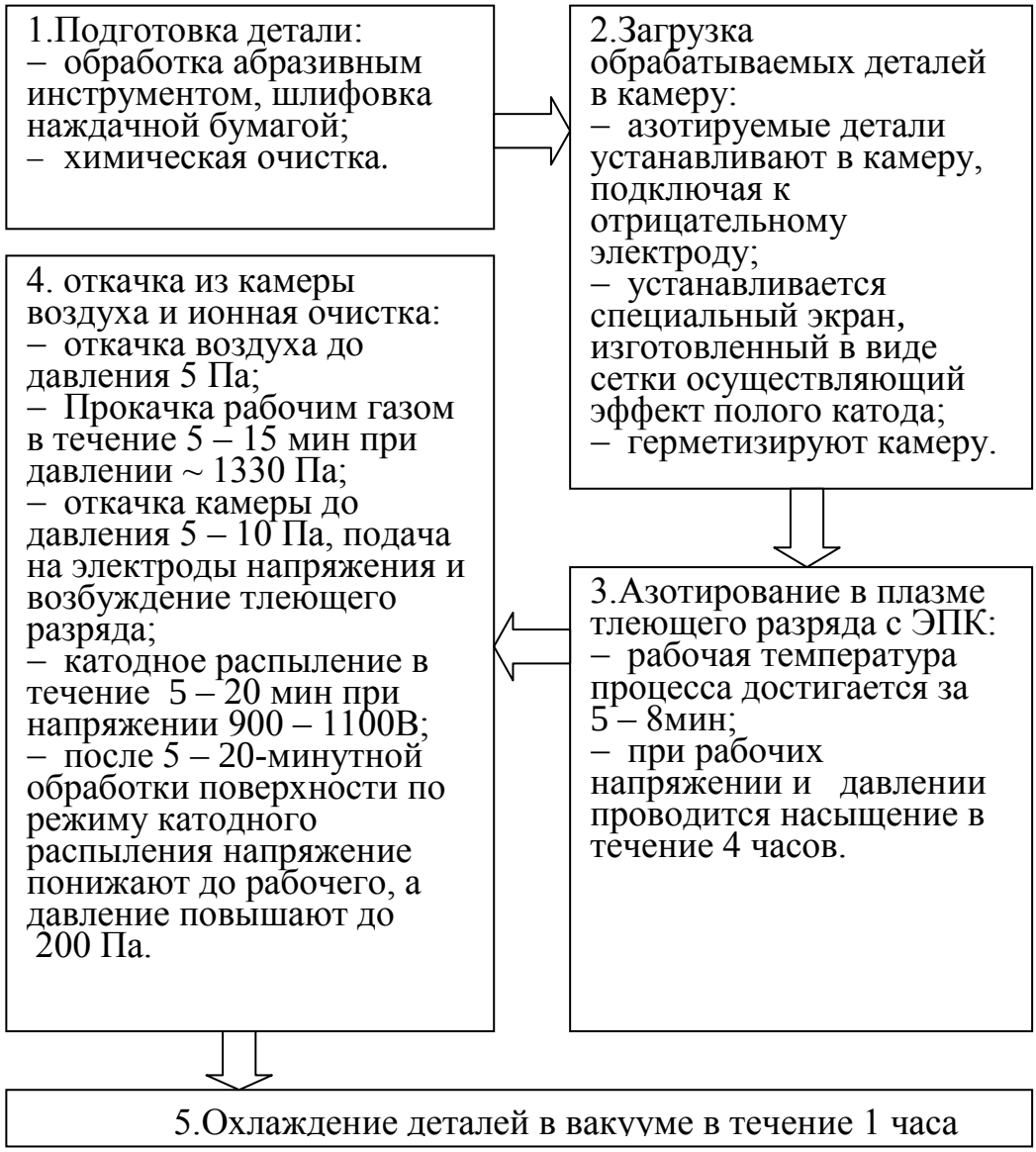


Рис.8. Блок-схема технологического процесса

Предварительная подготовка поверхности (химическая очистка) представляет собой удаление с поверхности видимых слоев органических загрязнений: остатков масел, смазочных материалов, отпечатков пальцев и жировых пятен. Для этого возможно использование органических растворителей: этилового спирта, ацетона.

Азотируемые детали устанавливают в камеру, подключают к отрицательному электроду, герметизируют камеру и откачивают воздух до давления 10Па. После этого камеру прокачивают рабочим газом в течение 5–15мин при давлении ~1330Па, затем откачивают газ до давления 20–30Па, подают на электроды напряжение и возбуждают тлеющий разряд. Перед началом процесса азотирования осуществляется чистка в режиме катодного распыления, после 5–20-минутной обработки поверхности в данной стадии устанавливают рабочее напряжение, а давление повышают до 200Па. Катодное распыление можно проводить и в среде инертных газов, применение которой особенно целесообразно при азотировании титановых сплавов.

Рабочая температура процесса достигается за 3-5мин, скорость нагрева определяется соотношением поверхности и массы деталей. После изотермической выдержки детали охлаждаются до комнатной температуры в вакууме. При этом скорость охлаждения по сравнению с печным нагревом выше, так как при ионной обработке нагреваются изделия, а нагрев стенок контейнера (рабочей камеры) за счет теплоизлучения и конвекции в условиях разряжения незначителен.

Температурный режим регулируется с помощью термопары и оптического пирометра, давление – прибором, работающим на принципе теплопроводности отработанных газов. На этом же принципе основано управление составом рабочего газа. Получаемые таким образом показания, а также электрические параметры процесса позволяют автоматически регулировать температурный режим, электрический разряд, подвод газа.

Разработанная технология обеспечивает эффективное структурно-фазовое модифицирование титановых сплавов и, как следствие, повышение микротвердости и износостойкости. ЭПК является эффективным инструментом повышения механических свойств деталей пар трения.

Результатом проделанной работы явились следующие выводы.

В условиях проявления ЭПК ток разряда в 2 раза выше, чем без проявления ЭПК при одинаковом напряжении горения разряда, вследствие того, что в катодной полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастают число ионов, бомбардирующих поверхность, и число электронов, эмитируемых катодом.

Установлено, что микротвердость образцов из исследуемого сплава ВТ6 после азотирования в тлеющем разряде с проявлением ЭПК увеличилась в 2,5–3 раза, а без ЭПК в 1,5–2 раза.

Установлено, что толщина азотированного слоя в условиях проявления ЭПК по сравнению с азотированием без ЭПК в 4 раза выше. Анализ микроструктуры показал отсутствие крупнозернистой структуры, что положительно сказывается на твердости сплава.

Анализ дифрактограмм образцов из сплава ВТ6 показал, что азотирование приводит к синтезу нитридов титана различного стехиометрического состава, а также к рефлексам нитридов и интерметаллидов основных легирующих элементов.

Разработан технологический процесс ионного азотирования, основанный на фазовом модифицировании поверхностного слоя в тлеющем разряде с проявлением ЭПК, который позволяет повышать микротвердость и, как следствие, износостойкость деталей пар трения из титановых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МВТУ им Баумана, 1999. 400 с.

2. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: «Машиностроение», 1977. 247с.

3. Малинов Л.С., Зечева А., Ша В. Связь микроструктуры и свойств промышленных титановых сплавов с параметрами процесса азотирования из газовой фазы // МиТОМ. 2004, №7. С. 21-28

4. Погрелюк И.Н. Азотирование титановых сплавов // ОТТОМ-4: сб. докладов международной конференции. Харьков, 2003. С. 182 – 198.

5. Будилов В.В., Агзамов Р.Д., Рамазанов К.Н. Технология ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007, №7. С. 25 – 29.
6. Мухин В.С., Рамазанов К.Н., Ишмухаметов Д.З. Упрочнение поверхности сталей и титановых сплавов путем создания макронеоднородной структуры при азотировании в тлеющем разряде//Упрочняющие технологии и покрытия: технический журнал. М.: "Издательство Машиностроение", 2010. №10. С. 32
7. Ахмадеев Ю.Х., Гончаренко И.М., Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Азотирование технически чистого титана в тлеющем разряде с полым катодом// Письма в ЖТФ, 2005. Том 31, вып. 13. С. 24-30

УДК 621.923.5

В. А. Огородов (УГАТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ХОНИНГОВАЛЬНОГО БРУСКА

Разработка методов предотвращения образования заусенцев на кромках пересечений радиальных отверстий и обрабатываемой поверхности при алмазном хонинговании [1, 2] требует определения параметров алмазных зерен на режущей поверхности хонинговального бруска.

К настоящему времени вопросам моделирования режущей поверхности алмазного абразивного инструмента посвящено большое число исследований [3, 4, 5 и др.].

В исследованиях [3] при моделировании режущей поверхности алмазного инструмента используются высота выступания зерен над уровнем связки, средне вероятностное расстояние между алмазными зернами, число режущих граней на единицу длины зерна, количество абразивных зерен, участвующих в резании.

В работе [4] описание характеристики рабочей поверхности алмазного круга проведено на основе теории случайных функций. Для определения средней высоты рабочего профиля бруска использована характеристика случайной функции – математическое

ожидание числа режущих кромок на единицу рабочей поверхности бруска, а периодичность расположения зерен по высоте и шагу определялась по уравнению корреляционной функции.

Однако указанные исследования [3, 4] относятся к процессу шлифования.

Применительно к процессу хонингования моделирование режущей поверхности алмазного хонинговального бруска рассмотрено в работе [5] и заключается в представлении алмазных зерен в виде сфер размером D, зависящим от зернистости, с последующим их распределением по режущей поверхности с разной высотой выступания над металлической связкой. Зернистость алмазного порошка определяется по размеру зерен его основной фракции. Для любой зернистости распределение размеров зерен алмазного порошка принято подчиняющимся закону нормального распределения: средний диаметр зерна $D_{ср}$=0,85x; среднеквадратическое отклонение σ=0,137; где x – наибольший размер зерен данной зернистости.

Для математического моделирования распределения алмазных зерен по режущей поверхности бруска в рассматриваемой работе [5] использована квазиравномерная распределенная ЛП-тау двоичная последовательность. В результате получена зависимость, позволяющая рассчитать число алмазных зерен на единицу площади режущей поверхности бруска

$$z = \frac{12K}{\pi x^2}, \qquad (1)$$

где K–коэффициент концентрации алмазов, отражающий процентное соотношение в алмазном слое абразивного порошка и связки.

Однако рассчитанное по приведенной зависимости (1) число алмазных зерен на режущей поверхности хонинговального бруска плохо согласуется с данными экспериментальных исследований фактической площади контакта алмазного инструмента с деталью [6] по числу контактирующих зерен.

Вместе с тем целью всех рассмотренных выше моделей режущей поверхности алмазного инструмента является

прогнозирование параметров шероховатости обработанной поверхности при хонинговании. Поэтому они не пригодны для моделирования обработки кромки пресечения радиальных отверстий и обрабатываемой поверхности.

В известном способе хонингования (а.с. №1685692, Б.И. №39, 23.10.91), предложенного автором, для предотвращения образования заусенца алмазные зерна должны двигаться вдоль кромки пересечения, срезая своими боковыми режущими кромками (ребрами) частицы металла, выдавливаемые другими зернами за кромку пересечения.

Для оценки эффективности этого способа хонингования требуется знание размеров зерен на поверхности связки бруска и координат их расположения на этой поверхности.

Очевидно, что расположение алмазных зерен на режущей поверхности хонинговального бруска должно отвечать равномерному распределению, но при выполнении следующих ограничений:

– расстояние между центрами ближайших зерен на поверхности бруска должно превышать наибольший размер зерен основной фракции, чтобы поверхности рядом расположенных зерен не пересекались

– поскольку поверхность зерна не может выступать за пределы бруска, расстояние центра зерна от боковых кромок бруска должно быть более половины наибольшего размера зерен основной фракции.

В качестве основы для определения параметров алмазных зерен на режущей поверхности хонинговального бруска были использованы данные экспериментальных исследований [6], в которых контактное взаимодействие алмазных брусков с обрабатываемой поверхностью в том числе оценивается следующими показателями (подсчитанными в пределах заданной номинальной площади контакта 1см^2):

– фактической площадью контакта алмазных зерен с деталью, A_{ra} мм^2;

– максимальной площадью контакта алмазов с деталью, $S_{\max}$ мкм^2;

– числом контактирующих зерен, N_k шт.

По данным исследований [6] количество контактирующих алмазных зерен с обрабатываемой поверхностью при номинальной площади контакта 1см^2 и номинальном давлении брусков на

обрабатываемую поверхность 400кПа для алмазных брусков характеристики АСВ 80/63 М1–100% и обрабатываемого материала – стали 40Х (HRC 48…52) составляет 452 шт.

Однако в результате проведенных расчетов установлено, что получить координаты зерен сразу на всей поверхности алмазного бруска АСВ 80/63 М1–100% длиной 51мм и шириной 6мм с помощью генератора псевдослучайных чисел при указанных ограничениях не возможно. При этом уменьшение размера поверхности с пропорциональным уменьшением числа зерен на поверхности позволило получить равномерное распределение, удовлетворяющее ограничениям.

Поэтому для указанных исходных данных были определены наибольшие размеры элементарного участка поверхности, кратные размерам сторон бруска и позволяющие получить равномерное распределение зерен при выполнении сформулированных ограничениях. Размер элементарного участка составил 3х5,1мм.

Таким образом, режущая поверхность бруска представляется набором элементарных участков, в пределах которых реализовано равномерное распределение алмазных зерен.

Для определения размеров зерен на поверхности связки бруска необходимо знать геометрическую форму зерен и закон распределения размеров внутри основной фракции алмазного порошка.

Однако в экспериментальных исследованиях [6] отсутствуют сведения о форме зерен и распределении их размеров на поверхности связки.

Поэтому, на основании результатов работы [5], согласно которым распределение размеров зерен в алмазоносном слое бруска подчиняется закону нормального распределения, можно принять, что размеры зерен на поверхности связки также отвечают нормальному закону распределения.

Тогда, зная закон распределения зерен, по экспериментально полученной в работе [6] суммарной площади контакта алмазного бруска с деталью можно рассчитать размеры зерен на поверхности связки.

Для зерен алмазного бруска АСВ 80/63 М1–100%, имитируемых сферами, и стали 40Х для расчета радиуса сечения зерна по

поверхности связки, исходя из требования обеспечения фактической суммарной площади контакта (табл.1), в результате статистических испытаний получена следующая зависимость:

$$R = 0.011675 + \sqrt{0{,}000005} \times randn(1{,}452), \qquad (2)$$

где R – массив радиусов зерен в сечении по поверхности связки бруска; 0,011675 – величина математического ожидания; 0,000005 – величина дисперсии; $randn(1{,}452)$ – функция генерации массива из 452 случайных чисел с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной 1.

Таблица 1

Данные экспериментальных исследований [6] фактической площади контакта алмазного бруска с деталью на номинальной площади 1 см^2

Характеристика алмазного бруска	Обрабатываемый материал	Фактическая площадь контакта, A_{ra} мм^2	Число контакти-рующих зерен, шт.	Максимальная площадь контакта алмаза с деталью, S_{max} мм^2
АСВ 80/63 М1-100%	Сталь 40Х (HRC = 48…52)	0,19	452	0,0034

На рис. 1 приведено множество кривых распределения радиусов зерен, рассчитанных по зависимости (2), для которого суммарная площадь контакта всех зерен находится в пределах от 0,188мм^2 до 0,210мм^2 с математическим ожиданием 0,20мм^2. Максимальный радиус зерна для этого множества равен 0,0219мм, а максимальная площадь контакта составляет 0,0015мм^2, что более чем в половину меньше фактической максимальной площади S_{max} (табл. 1).

При этом увеличить размер наибольшего зерна не представляется возможным. Это объясняется тем, что при одном и том же размере среди геометрических фигур наибольшей площадью обладает только круг, поэтому при увеличении математического ожидания или дисперсии в зависимости (1) увеличится суммарная площадь контакта всех зерен или наименьший размер зерна будет отрицательным, что недопустимо в обоих случаях.

Следовательно, моделирование алмазных зерен сферами плохо согласуется с результатами экспериментальных исследований [6].

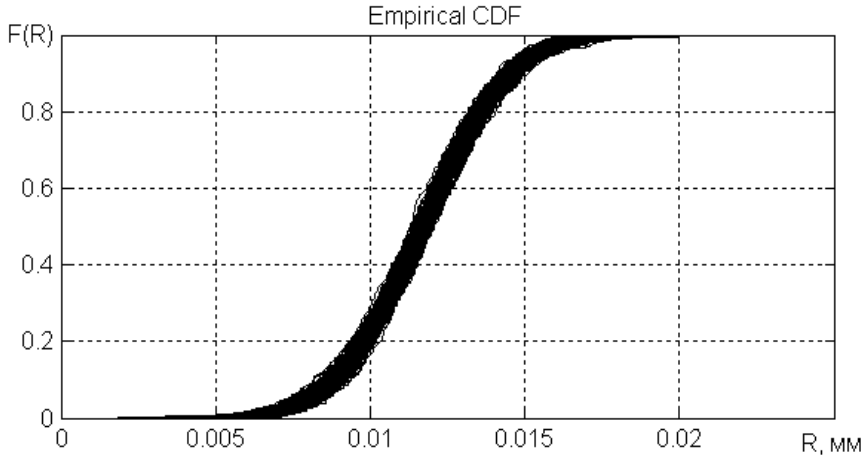


Рис. 1. Интегральные кривые нормального распределения размеров зерен, смоделированных сферами

Другим геометрическим телом, которое может быть использовано для имитации алмазного зерна, является октаэдр (правильный многогранник с 8 гранями , 12 ребрами и 6 вершинами), поперечное сечение которого и, соответственно, отпечаток на обрабатываемой поверхности детали, представляет собой квадрат.

В результате выполненных статистических испытаний для исходных данных, приведенных в табл.1, получена следующая зависимость для расчета половины диагонали поперечного сечения октаэдра, принятого в качестве основного размера зерна для обработки кромки пересечения

$$R = 0,014275 + \sqrt{0,0000075} \times randn(1,452) \qquad (3)$$

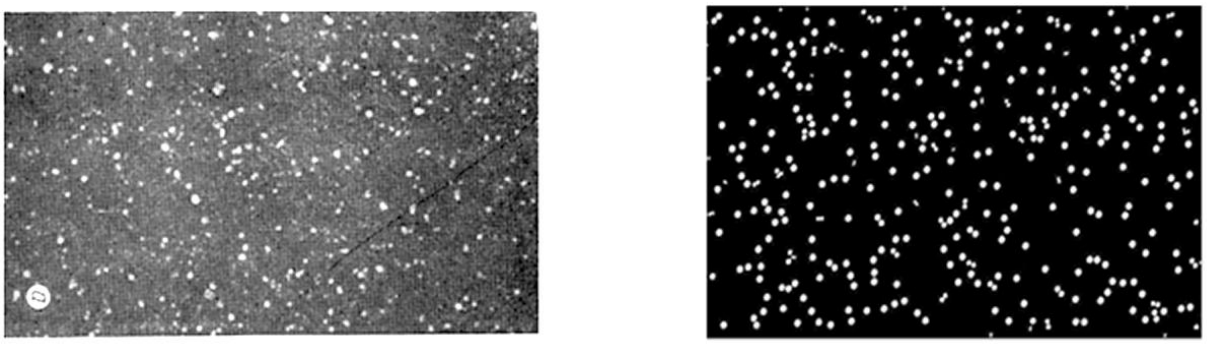
По результатам 5000 расчетов распределений размера R по зависимости (3) было установлено, что суммарная площадь контакта всех зерен находится в пределах от 0,179мм^2 до 0,203мм^2 с математическим ожиданием 0,19мм^2.

Максимальный радиус зерна среди этого множества равен 0.0296мм, соответственно, максимальная площадь контакта составляет 0.0018мм^2, что ближе к значению фактической максимальной площади S_{max} (табл.1), чем для имитации зерна сферой. Однако при имитации алмазного зерна октаэдром расчетная величина максимальной площади поперечного сечения зерна значительно

отличается от фактической. Вместе с тем, если принять зерно с максимальным размером как сферу, максимальная площадь отпечатка составит 0,0028 мм^2, что хорошо согласуется с данными табл. 1.

Поэтому при имитации зерен алмазного бруска их следует рассматривать как комбинацию сфер и, например, октаэдров.

В качестве иллюстрации на рис.2 приведено расположение зерен на поверхности бруска при натурном эксперименте и по результатам расчетов по зависимости (3) для исходных данных (табл.1) и равномерного распределения зерен по режущей поверхности бруска с учетом указанных выше ограничений.



а) *б*)

Рис.3. Расположение зерен на поверхности бруска при натурном эксперименте (*а*) и по результатам расчетов (*б*)

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что получение равномерного распределения алмазных зерен на режущей поверхности хонинговального бруска с помощью генератора случайных чисел должно производиться с учетом размера зерен и расстояний зерен до границ бруска.

Также выявлено, что имитация алмазных зерен октаэдрами дает лучший результат при определении распределения их размеров, исходя из фактической площади контакта алмазного бруска с деталью, чем сферами.

Выполненные статистические исследования показали, что при имитации зерен алмазного бруска следует применять комбинацию геометрических тел, например, сферами и октаэдрами, размеры которых могут быть рассчитаны по полученным зависимостям (2) и (3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородов В.А. Предотвращение образования заусенцев при хонинговании // Управление качеством финишных методов обработки: сб. научн. тр. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т,1996. С. 95–98.
2. Муратов К.Р. Повышение эффективности финишной абразивной обработки внутренних цилиндрических поверхностей методом растрового хонингования: автореферат дисс. … канд. техн. наук. Пермь, 2010. 21 с.
3. Попов С. А., Наерман М. С. Рельеф режущей поверхности абразивных и алмазных брусков //Абразивная и алмазная обработка: сб. науч. тр. М., 1968. С. 78-89.
4. Иванкин В. Ю. и др. Применение теории стационарных случайных функций к описанию характеристики рабочей поверхности алмазных кругов // Управление качеством финишных методов обработки: сб. науч. тр. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т,1996. С.74–81.
5. Иванов В.А., Иванов А.В., Долинин А.А. , Халтурин О. А. Математическое моделирование формирования шероховатости поверхности при алмазном хонинговании брусками на металлических связках // Вестник УГАТУ, 2012. Т. 15, № 2 (42). С. 82–87.
6. Чеповецкий И. Х. Основы финишной алмазной обработки. Киев: Наукова думка, 1980. 468 с.

УДК 621.923.5

В. А. Огородов (УГАТУ)

К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ ПРИ АЛМАЗНОМ ХОНИНГОВАНИИ

Метод хонингования является одним из основных методов размерной обработки прецизионных отверстий в деталях топливной, гидравлической и контрольно-измерительной аппаратуры.

Однако применение хонингования на операциях окончательной обработки подобных деталей ограничено по причине образования заусенцев на кромках пересечений обрабатываемой поверхности и радиальных отверстий, что по техническим условиям не допускается

[1]. Поэтому поиск новых методов хонингования, позволяющих предотвращать образование заусенцев на кромках пересечений, является актуальной проблемой из всех методов механической обработки, включая хонингование.

Очевидно, что появление заусенцев обусловлено многократным выдавливанием частиц металла при выходе с обрабатываемой поверхности за кромку пересечения множества царапающих её алмазных зерен, имеющих в среднем большие отрицательные передние углы и значительные радиусы округления режущих кромок. При этом также очевидно, что размер заусенцев в каждой точке кромки пересечения определяется количеством выходов алмазных зерен с обрабатываемой поверхности в этой точке.

Вследствие совмещения вращательного и возвратно-поступательного движений инструмента и периодической смены направления его движения, алмазные зерна, расположенные случайным образом на режущей поверхности брусков, перемещаются по обрабатываемой поверхности по винтовой линии, создавая характерную для хонингования сетку следов. Поэтому число зерен, проходящих через кромку пересечения, постоянно меняется в процессе хонингования. В свою очередь, для каждого алмазного зерна изменяется точка кромки пересечения выхода с обрабатываемой поверхности. Поэтому можно предположить, что на кромке пересечения есть участки, наиболее подверженные образованию заусенца.

Для проверки этой гипотезы была разработана имитационная модель хонингования, позволяющая рассчитать количество выходов алмазных зерен с обрабатываемой поверхности через кромку пересечения за заданное время хонингования.

В модели движение брусков по обрабатываемой поверхности принято слева – направо при их начальном осевом перемещении сверху – вниз.

При разработке модели было принято допущение, заключающееся в том, что число алмазных зерен и их расположение на режущей поверхности хонинговального бруска не изменяется за время обработки, что вполне соответствует стойкости алмазных брусков на металлической связке.

Второе принятое допущение – распределение алмазных зерен по режущей поверхности брусков равномерное при ряде ограничений, которые заключаются в следующем. Расстояние между ближайшими зернами на поверхности бруска должно превышать наименьший размер зерен основной фракции, а расстояние от боковых поверхностей бруска – более половины наименьшего размера алмазных зерен основной фракции.

Число зерен на режущей поверхности бруска определяется по результатам исследований фактической площади контакта алмазного инструмента с деталью [2].

С помощью разработанной модели был проведен численный эксперимент по определению участков кромки пересечения, наиболее подверженных образованию заусенца при следующих исходных данных.

Обрабатываемое отверстие с кромкой пересечения диаметром 4мм, расположенной по середине образующей отверстия, имеет диаметр 18мм и длину 50мм в детали, изготовленной из стали 40Х (HRC 48…52). Обработка осуществляется хонинговальной головкой с двумя алмазными брусками длиной 50мм и шириной 6мм. Характеристика брусков АСВ 80/63 М1 – 100%. Количество контактирующих алмазных зерен с обрабатываемой поверхностью при номинальной площади контакта 1см^2 и номинальном давлении брусков на обрабатываемую поверхность 400 кПа составляет 452 шт. Окружная и осевая скорости хонинговальной головки равны 32 м/мин и 8м/мин соответственно. Задержка брусков у краев отверстия при реверсе их осевого движения отсутствует. Время хонингования принято 90с.

Указанные режимы хонингования выбраны по данным работ [2,3] из условия обеспечения максимальной исправляющей способности хонингования.

Результаты численного эксперимента приведены на рис. 1. Распределение числа выходов зерен с обрабатываемой поверхности через кромку пересечения представлено в полярных координатах в виде угловой гистограммы, построенной для наглядности по 72 интервалам (рис.1*а*). Её анализ показывает, что образование заусенцев следует ожидать на левой стороне кромки пересечения на дуге размером 130° в пределах от 295° (-65°) до 65°.

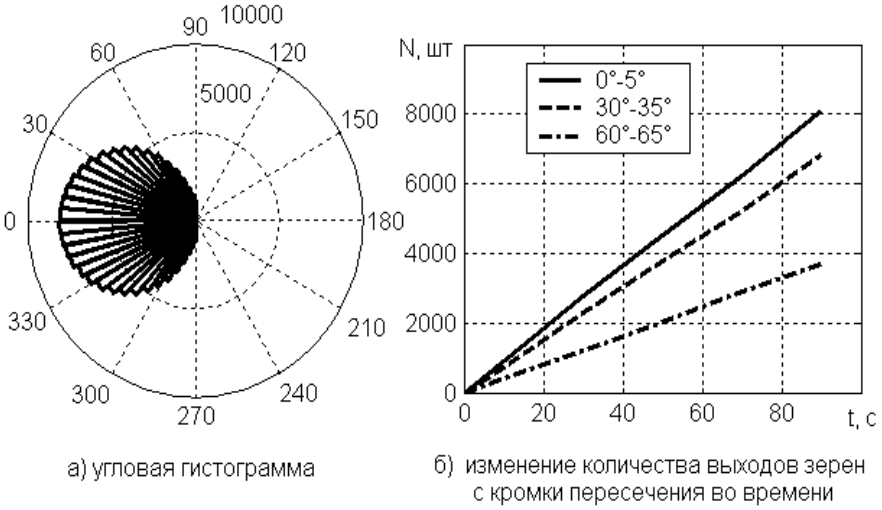


Рис. 1. Результаты расчетов числа выходов зерен с кромки пересечения

При этом в наибольшей степени подвержен образованию заусенца участок кромки с угловыми координатами от – 5° по 5°, где наблюдается двойное увеличение числа выходов зерен за кромку пересечения по сравнению с участком кромки 60° – 65°.

Такое увеличение объясняется тем, что через этот участок кромки пересечения зерна проходят при осевом движении брусков как вниз, так и вверх.

Поскольку точность процесса хонингования зависит от продолжительности обработки, было изучено влияние времени хонингования на количество сходов для разных участков кромки пересечения, которое показало (рис. 1*б*), что нарастание количества сходов во всех сечениях кромки происходит равномерно в течение процесса обработки.

Следовательно, для предотвращения образования заусенца достаточно обеспечивать периодическое движение зерен вдоль кромки.

Как было уже указано выше, хонингование в основном применяется для устранения исходных отклонений формы обрабатываемого отверстия, при этом эффективность процесса исправления зависит от множества факторов, которые оказывают при этом влияние и на образование заусенцев. К их числу следует отнести: время задержки брусков у краев отверстия, угол пересечения

следов обработки α (который определяется отношением осевой скорости брусков к окружной), зернистость алмазных брусков, размер кромки пересечения и её расположение по длине отверстия.

При изучении влияния продолжительности задержки брусков на количество выходов зерен с обрабатываемой поверхности за кромку пересечения установлено (рис.2), что увеличение длительности задержки может привести к существенному увеличению заусенца. Однако при этом протяженность дуги кромки, подверженной образованию заусенца, не меняется.

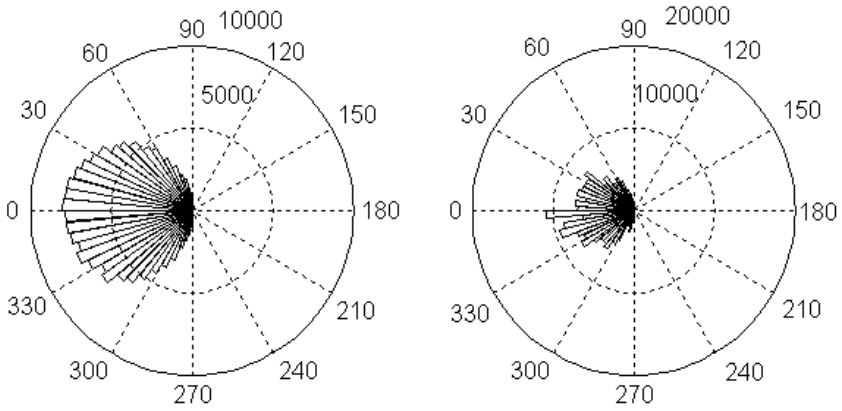


Рис. 2. Влияние времени задержки брусков на число выходов зерен с кромки пересечения

Для выявления зависимости количества выходов зерен за кромку пересечения от угла пересечения следов обработки α была рассчитана угловая гистограмма для обработки отверстия с увеличенной (до значения окружной скорости) осевой скоростью движения брусков и соответственно при значении α, равном 90° (рис.3*а*).

Анализ представленной на рис.3*а* гистограммы показывает, что увеличение этого угла α привело к значительному (до 240°) увеличению протяженности дуги кромки, на которой может образоваться заусенец. При этом можно отметить общее возрастание количества выходов зерен с кромки пересечения, но оно объясняется увеличением скорости резания, в результате чего за то же время хонингования совершается большее количество проходов брусков через кромку пересечения.

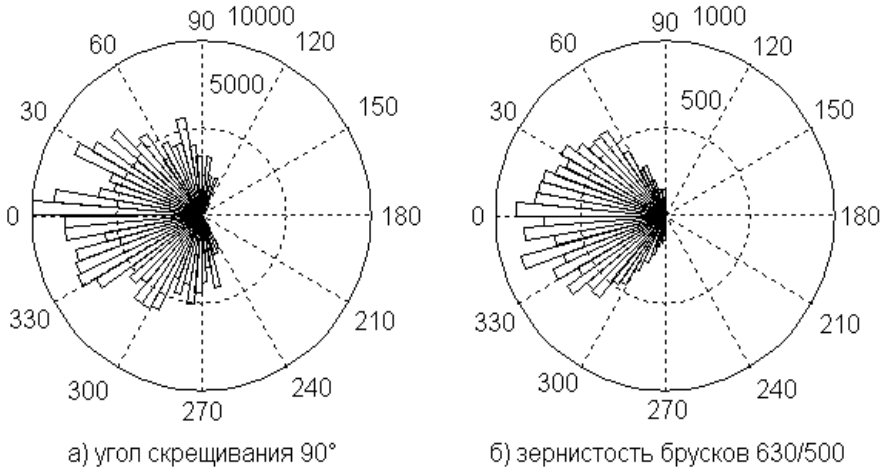


Рис. 3. Влияние угла скрещивания и зернистости брусков на число выходов зерен с кромки пересечения

Для изучения влияния зернистости алмазных брусков на количество выходов зерен с обрабатываемой поверхности за кромку пересечения была рассчитана угловая гистограмма (рис.3*б*) для обработки с использованием крупнозернистых брусков АСК 630/500-МП4-50%, для которых количество контактирующих алмазных зерен с обрабатываемой поверхностью при номинальной площади контакта 1см^2 и номинальном давлении брусков на обрабатываемую поверхность 400 кПа по данным исследований [2] равно 43.

Приведенная на рис.3*б* гистограмма показывает, что применение крупнозернистых брусков для ускорения съема материала с обрабатываемой поверхности вследствие меньшего количества зерен на режущей поверхности бруска приводит, как ожидалось, к уменьшению количества выходов зерен с обрабатываемой поверхности за кромку пересечения.

Для установления влияния расположения кромки пересечения и её размера на распределение количества выходов зерен через неё были произведены расчеты для кромки, расположенной ближе к краю отверстия – на расстоянии ¼ длины образующей, а также для кромки диаметром 6 мм, что соответствует реальным конструкциям деталей топливной, гидравлической и контрольно-измерительной аппаратуры. Угловые гистограммы, построенные по результатам этих расчетов, приведены на рис.4.

Как видно на гистограмме (рис.4*а*) приближение кромки к краю обрабатываемого отверстия приводит к некоторому уменьшению

числа выходов зерен через кромку, что объясняется особенностями кинематики процесса хонингования, вследствие которых области отверстия у его краев обрабатываются меньшим числом зерен, чем по середине отверстия [2,4]. Увеличение размера кромки, как показывает гистограмма на рис. 4*б*, вызывает увеличение количества выходов. Но при этом следует учесть, что угловая гистограмма не отражает линейных размеров кромки. При одном угловом размере дуги кромки увеличение её радиуса приводит к увеличению длины дуги. Поэтому через дугу большего радиуса проходит пропорционально большее число зерен.

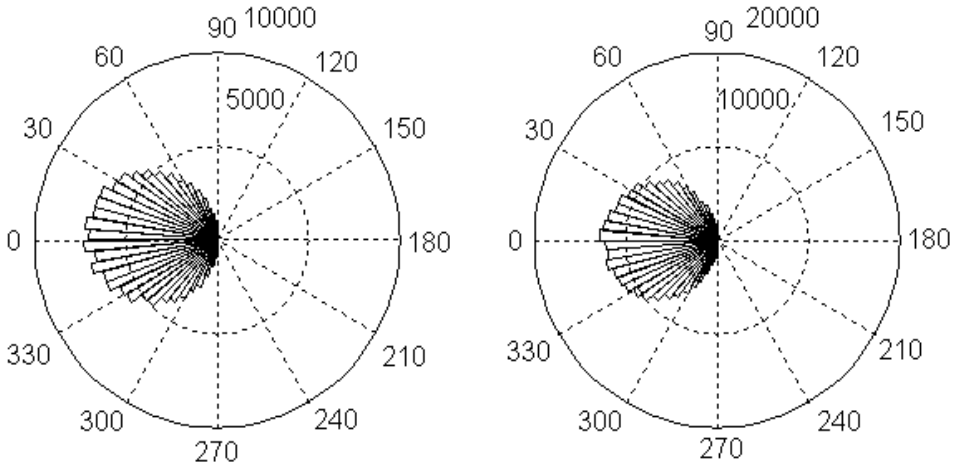


Рис. 4. Влияние конструктивных параметров кромки пересечения на число выходов зерен

Таким образом, в результате выполненных исследований доказано, что при алмазном хонинговании образование заусенца на кромке пересечения обрабатываемой поверхности и радиального отверстия происходит на левой стороне кромки пересечения (по направлению движения брусков слева – направо).

При этом наибольшую величину заусенца следует ожидать в крайней левой точке кромки пересечения, а протяженность заусенца в наибольшей степени зависит от величины угла пересечения следов обработки, определяемого соотношением осевой и угловой скоростей брусков.

Для предотвращения образования заусенца достаточно обеспечивать периодическое движение зерен вдоль кромки пересечения. Это требование выполняется разработанным автором способом хонингования (а.с. №1685692, Б.И. №39, 23.10.91), при котором траектория движения режущих зерен отвечает следующему закону:

$$\begin{cases} x = V_{\text{ок}} t - A_{\text{ок}} \sin(2\pi f_{\text{ок}} t) \\ y = A_{\text{ос}} \sin(2\pi f_{\text{ос}} t), \end{cases} \quad (1)$$

где x и y – координаты режущего зерна в текущий момент времени t; $V_{\text{ок}}$ – скорость вращательного движения хонинговальной головки; $A_{\text{ок}}$ – амплитуда окружных синусоидальных колебаний $A_{\text{ок}} = r/\pi$; $f_{\text{ок}}$ – частота окружных синусоидальных колебаний $f_{\text{ок}} = V_{\text{ок}}/(2r)$; r – радиус кромки пересечения; $A_{\text{ос}}$ – амплитуда осевых синусоидальных колебаний $A_{\text{ос}} = r$; $f_{\text{ос}}$ – частота осевых синусоидальных колебаний $f_{\text{ос}} = f_{\text{ок}}/2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муратов К.Р. Повышение эффективности финишной абразивной обработки внутренних цилиндрических поверхностей методом растрового хонингованя: автореф. дисс. канд. техн. наук. Пермь, 2010. 21 с.
2. Чеповецкий И. Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. Киев: Наукова думка, 1978. 228 с.
3. Огородов В. А. Имитационное моделирование процесса хонингования // Станки и инструмент. 2010, №12. С. 28–33.
4. Огородов В. А. Управление процессом алмазного хонингования// Вестник УГАТУ, 2008. Т10, №1(26). С. 122–126.

УДК 621.9.048.7

Р.Д.Агзамов (УГАТУ)

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ КОМПОЗИЦИИ Ti-TiN НА СТАЛИ 08КП

Для устранения или торможения коррозионных процессов на границе среда – металл, негативно воздействующих на эксплуатационные свойства материалов, целесообразно использовать вакуумно-плазменные покрытия на основе карбидов и нитридов металлов. Достижение положительного эффекта при применении вакуумно-плазменных покрытий во многом обуславливается физико-химическими свойствами покрытий: составом, структурой, толщиной, шероховатостью, остаточными напряжениями и др.

Защитные свойства вакуумных покрытий на основе TiN достаточно хорошо изучены.

Установлено, что коррозионная стойкость зависит:

от толщины покрытия TiN [1–4]. С увеличением толщины покрытия коррозионная стойкость увеличивается вследствие уменьшения пористости покрытия;

от вида подготовки поверхности перед осаждением [5]. Чем меньше шероховатость поверхности, тем выше коррозионная стойкость. Деформационное упрочнение поверхностного слоя способствует снижению коррозионной стойкости;

наличия капельной фазы [6,7]. После сепарации плазменного потока от капельной фазы коррозионная стойкость покрытий возрастает.

Однако во всех работах рассматривались коррозионные свойства комплекса подложка-покрытие без учёта деформационного воздействия. В то же время большинство деталей эксплуатируются при воздействии различных напряжений (растяжения, сжатия, переменных, температурных и т.д.), что существенно влияет на защитные свойства покрытий. Практически не изучены защитные свойства многослойных покрытий типа Ti-TiN, полученных методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий (ПАНП) [8].

Целью работы является изучение коррозионного поведения многослойных плазменно-ассистированных покрытий Ti-TiN после их деформации со степенью порядка 20%.

Для плазменно-ассистированного нанесения покрытий, состоящих из микро- и нанослоёв Ti – TiN, использовалась модернизированная установка ННВ – 6.6 – И1. На пластины размером 20х20х1,5мм из стали 08кп наносились покрытия, состоящие из 2…20 слоёв с толщиной одного слоя от 3 мкм до 300нм. Общая толщина покрытия составляет 5 – 7 мкм. Ионная очистка производилась с помощью плазменного источника с накальным катодом «ПИНК» в среде инертного газа аргона.

Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре общего назначения ДРОН-4-07. Физические профили рентгеновских пиков получали путём выделения из экспериментальных профилей соответствующих инструментальных профилей с помощью гармонического анализа.

Коррозионное поведение стали 08кп с покрытиями Ti-TiN оценивалось по величине потенциалов без тока в 3% растворе NaCl.

Скорость коррозии образцов с покрытиями определялась изменением массы образцов. Образцы помещались в 3% раствор NaCl и выдерживались в течение 7 суток.

Качественный фазовый анализ проводился рентгеноструктурным методом сравнения относительной интегральной интенсивности дифракционных линий и экспериментальных значений межплоскостных расстояний с эталонными межплоскостными расстояниями.

Характерные рентгенограммы покрытий Ti-TiN, нанесенных методами катодной ионной бомбардировки (КИБ) и ПАНП, представлены на рис. 1.

Анализ рентгенограмм показал, что однослойные покрытия, нанесённые как методом катодной ионной бомбардировки, так и методом плазменно-ассистированного нанесения, преимущественно состоят из фазы TiN с ярко выраженной текстурой. Таким образом, можно сделать вывод, что дополнительная бомбардировка ионами газа не приводит к существенному изменению фазового состава покрытия TiN.

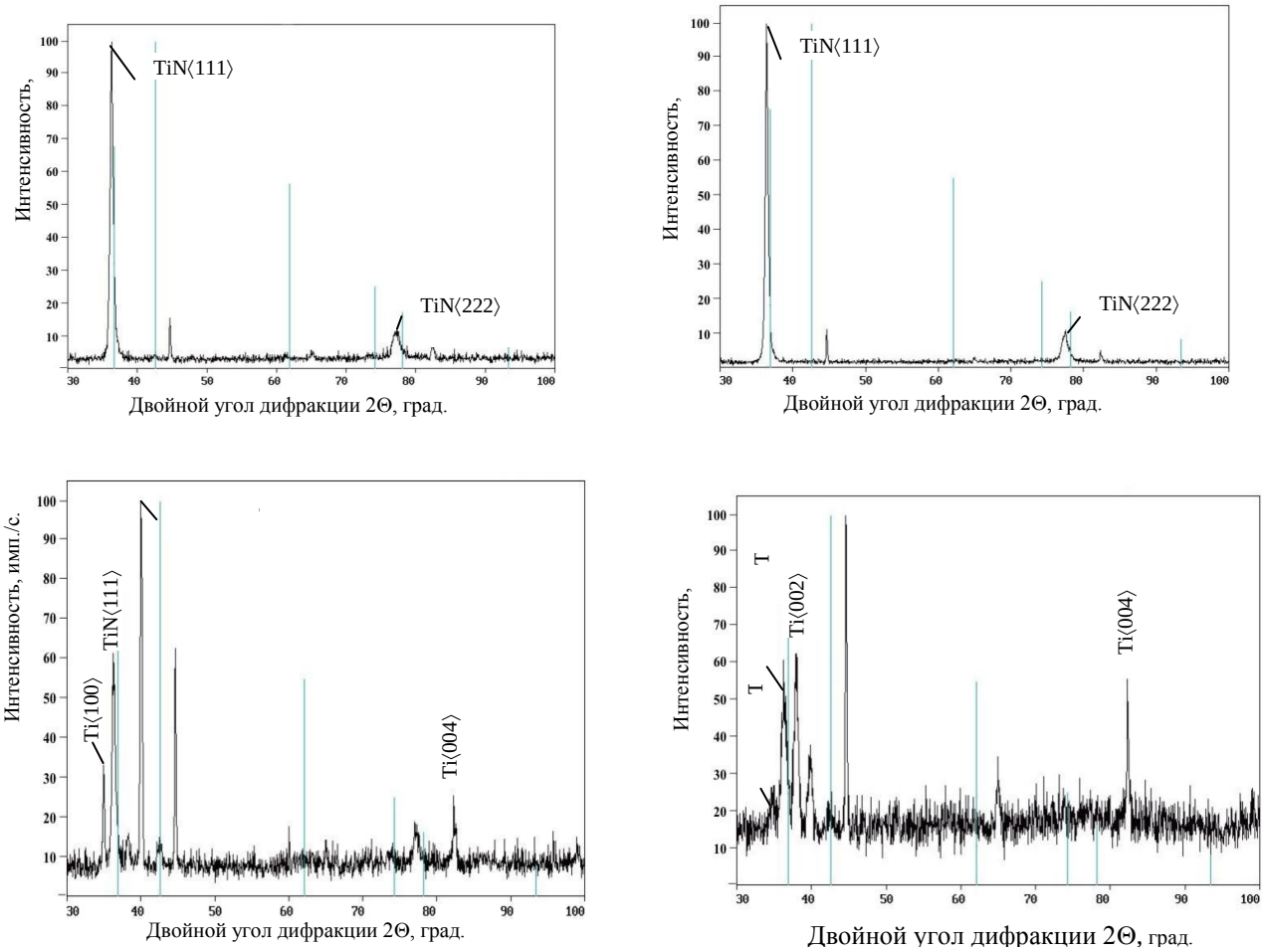


Рис. 1. Рентгенограммы покрытий: *а–1 слой TiN (КИБ), б– 1 слой TiN (ПАНП), в–2 слоя Ti-TiN (ПАНП), г–20 слоев Ti-TiN (ПАНП))*

Анализ рентгенограмм образцов с многослойными покрытиями показал наличие фазы α-Ti и фазы TiN с текстурами различных направлений, причем с увеличением числа слоев увеличивается разориентация кристаллов указанных выше фаз. Данные явления проявляются в образовании равновесной мелкозернистой структуры.

Анализ физического уширения рентгеновских пиков показал, что с увеличением числа слоев также уменьшается уровень микроискажений кристаллической решётки, что свидетельствует о снижении внутренних напряжений в покрытии. Указанные особенности многослойных покрытий, полученных методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий, возможно, способствуют увеличению их защитных свойств от коррозии.

Исследования коррозионной стойкости образцов с покрытиями гравиметрическим методом приведены на рис. 2.

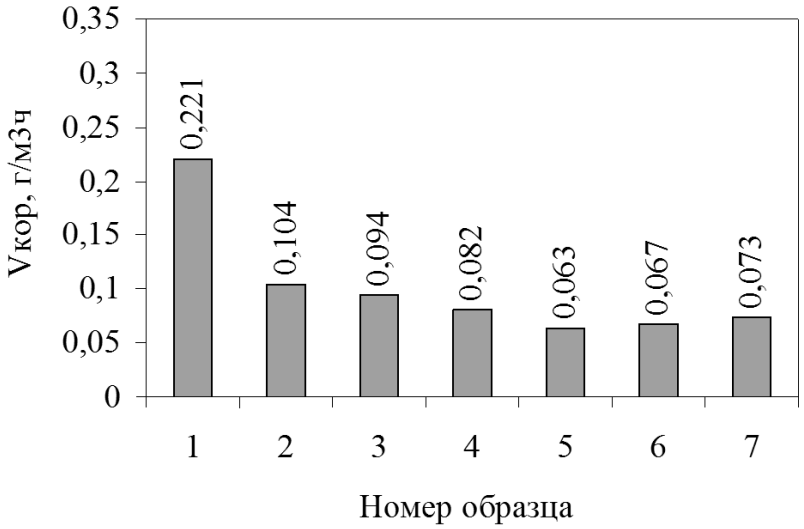


Рис. 2. Скорость коррозии образцов с покрытиями, определенная гравиметрическим методом

По результатам, приведённым на рис. 2, можно сделать вывод, что наибольшую защиту от коррозии обеспечивает четырехслойное покрытие, нанесенное методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий.

Также следует отметить более высокую коррозионную стойкость образцов с однослойным покрытием с плазменно-ассистированным нанесением покрытия по сравнению с однослойным покрытием, нанесенным методом КИБ.

Для исследования коррозионного поведения многослойных покрытий Ti-TiN под воздействием напряжений сжатия и растяжения образцы с покрытиями, предварительно нагретые в муфельной печи до температуры 500°С, были деформированы со степенью деформации порядка 20%.

В табл. 2 приведены установившиеся значения потенциалов без тока для образцов с покрытиями.

Как видно из табл. 2, по мере увеличения числа слоев с 2 до 8, $\varphi_{кор}$ сдвигается в область более положительных значений. Однако у образца с 20-слойным покрытием $\varphi_{кор}$ смещается в область более отрицательных значений.

Таблица 2

Установившиеся значения потенциалов без тока

Покрытия	Без покрытия	TiN без ПИНК	TiN	Ti-TiN 2 слоя	Ti-TiN 4 слоя	Ti-TiN 8 слоев	Ti-TiN 20слоев
$\varphi_{кор.}$, мВ	- 348,2	- 334,9	- 254,6	- 292,9	-269,7	- 234,8	- 295,1

В табл. 3 приведены установившиеся значения потенциалов без тока образцов с покрытиями, подвергнутых деформационному воздействию.

Анализ значений потенциалов без токов образцов с однослойными покрытиями TiN позволяет сделать вывод, что полученные плазменно-ассистированным методом покрытия обладают более высокими защитными свойствами по сравнению с покрытиями, полученными методом КИБ, что объясняется увеличением плотности покрытия, меньшим содержанием капельной фракции и снижением внутренних напряжений в покрытии, напыленных методом плазменно-ассистированного нанесения покрытий.

Таблица 3

Значения потенциала образцов без тока с покрытиями подвергнутых деформационному воздействию

Покрытия	TiN (КИБ)	TiN (ПАНП)	Ti-TiN 2 слоя (ПАНП)	Ti-TiN 4 слоя (ПАНП)	Ti-TiN 20 слоев (ПАНП)
с растягивающими напряжениями	-282,0	-284,0	-259,1	-257,0	- 221,5
с сжимающими напряжениями	-272,0	-272,7	-246,3	-233,8	-226,6

На рис. 3 приведены поляризационные кривые образцов с покрытиями после деформации с напряжениями растяжения и сжатия.

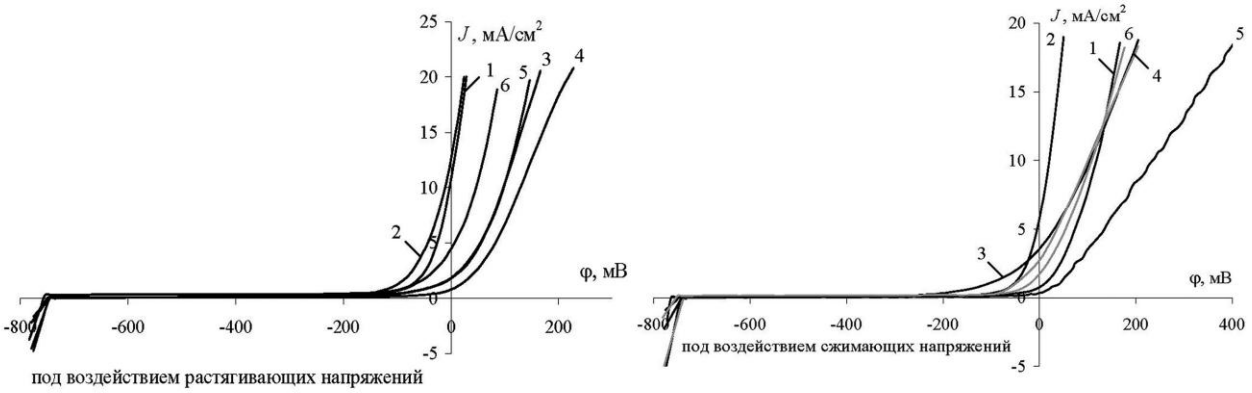


Рис.3. Поляризационные кривые образцов с покрытиями после деформации:
1 – однослойное TiN (КИБ); 2 – однослойное TiN (ПАНП);.
3 – двухслойное Ti-TiN (ПАНП); 4 – четырехслойное Ti-TiN (ПАНП);
5 – восьмислойное Ti-TiN (ПАНП); 6 – двадцатислойное Ti-TiN (ПАНП)

Из табл. 2 и 3 видно, что потенциалы без тока образцов с покрытием после деформации приобрели более положительное значение, чем без деформации.

Результаты, приведённые в табл.3, позволяют сделать вывод, что в условиях деформационного воздействия наилучшую защиту от коррозии обеспечивают многослойные покрытия.

Анализ поляризационных кривых после деформации показал, что скорость коррозии увеличивается у всех образцов с покрытиями. Однако у образцов с 2, 4 и 8 слойными покрытиями скорость коррозии намного меньше, чем у образцов с 1 слойными покрытиями.

Результатом выполненных работ является следующее:

− показано положительное влияние плазменного ассистирования на структуру формируемого многослойного покрытия.

− установлена взаимосвязь состава и строения многослойных покрытий Ti-TiN на их коррозионные свойства.

− для повышения коррозионной стойкости стали 08кп, подвергающейся деформации, рекомендуется нанесение многослойного Ti-TiN-покрытия с количеством слов порядка 4–8, наносимого в условиях ассистирования плазмой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев Л.Л., Кушнаренко В.М., Письменюк С.П. и др. Защитные свойства покрытия из нитрида титана в сероводородосодержащих средах// Защита металлов, 1986. Т.13, № 5. С.811-813.
2. Костржицкий А.И., Карпов В.Ф., Паскал В.В. Электрохимическое поведение вакуумных покрытий из нитрида титана на стали // Физико-химическая механика материалов. 1988, Т. 2. С.115-117.
3. Вершина А.К., Бельчин И.А., Пителько А.А. Защитно-декоративные свойства электродуговых вакуумных Ti и TiN- покрытий, осажденных в потоках плазмы// Физика и химия обработки материалов. 1990. Т5. С.93-96.
4. Милашевская И.Г., Станкевич Е.В. Коррозионные характеристики многослойных вакуумно-дуговых Ti–C покрытий // Защита металлов, 2003. Т.39, № 5. С.529–532.
5. Будилов В.В. Коррозионные свойства вакуумно-плазменных покрытий на конструкционных сталях// Оптимизация технологических процессов по критериям прочности: межвуз. науч. сб. Уфа: УАИ, 1990. С.48-54.
6. Пятыхин Л.И., Падалка В.Г., Купченко В.В. и др. Исследование коррозионных свойств вакуумно-плазменных нитридо-титановых покрытий на сплаве ВТ-8// Защита металлов, 1988. Т.24, №6. С.996-998.
7. Вершина А.К., Изотова С.Д., Пителько А.А. Влияние технологических параметров процесса осаждения из сепарированного плазменного потока TiN-покрытий и их защитные свойства// Физика и химия обработки материалов, 1991. Т3. С.65-68.
8. Коваль Н.Н. Источники низкотемпературной плазмы и электронных пучков на основе дуговых разрядов низкого давления с полым анодом: диссертация доктора технических наук в форме науч. докл. Томск, 2000. 74с.

УДК 621.9

И.Г.Каримов, В.Л.Юрьев (ОАО НИИТ),
В.В.Постнов (УГАТУ)

К ВОПРОСУ ОБ УСТАНОВЛЕНИИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПО РЕЖУЩИМ СВОЙСТВАМ ИНСТРУМЕНТА

В процессе резания вследствие превращения механической энергии в тепловую со стороны детали на инструмент действует мощный тепловой поток, в результате чего на передней поверхности инструмента устанавливается весьма высокая температура $\theta = 800 \div 1100^{o}\mathrm{C}$. Из-за интенсивного разогревания контактные поверхности инструмента теряют свою исходную твердость, размягчаются и быстро изнашиваются.

Одним из основных требований, предъявляемых к инструментальному материалу, является его высокая теплостойкость. Под теплостойкостью инструментального материала понимают способность материала сохранять при нагреве твердость, достаточную для осуществления процесса резания. Теплостойкость является важнейшим показателем качества инструментального материала, так как для инструмента важна не только исходная твердость, но и то, как эта твердость сохраняется при нагревании инструмента в процессе резания. Теплостойкость инструментального материала при резании можно характеризовать так называемой критической температурой, означающей температуру, устанавливающуюся в процессе резания, при которой инструментальный материал еще не теряет своих режущих свойств [1].

В работе Лоладзе Т.Н. описывается метод определения предельного состояния инструмента в процессе резания [2], в котором состояние инструмента оценивают по коэффициенту запаса формоустойчивости режущего клина

$$n_T \approx \frac{HV_И}{9\sqrt{\tau_Ф^2 + \tau_K^2}} \approx \frac{HV_И}{\sqrt{HV_{стр}^2 + HV_K^2}},$$

где $HV_И$ - твердость инструментального материала в контактных слоях при температуре резания;

$HV_{стр}$ - твердость стружки;

HV_K - твердость пластически деформируемых контактных слоев обрабатываемого материала вдоль задней поверхности;

$\tau_ф$ - касательное напряжение по условной плоскости сдвига;

$\tau_к$ - средняя величина напряжений сдвига.

В процессах обработки с повышением режимов, особенно скорости, возрастает температура резания и понижается твердость контактных слоев инструментального и обрабатываемого материалов, тогда как $\tau_Ф$ изменяется незначительно. Поэтому из выражения следует, что пластическая прочность инструментального материала определяется, главным образом, температурной зависимостью твердости инструментального материала и твердостью обрабатываемого материала в зоне стружкообразования.

Для определения критического значения $\theta_{кр}$ температуры строят зависимости $n_T(\theta)$, по которым $\theta_{кр}$ определяется при $n \geq 1 \div 1.4$ [2].

Однако применение данного метода имеет некоторые ограничения, связанные с невысокой точностью определения температуры резания и ограниченными функциональными возможностями метода, обусловленные тем, что формоустойчивость режущей кромки является необходимым, но недостаточным условием нормальной эксплуатации инструмента, так как инструмент должен обладать еще и достаточной износостойкостью.

Предлагаемая методика дает возможность расширить функциональные возможности, позволяющие определять критическую скорость резания, при превышении которой начинается интенсивный износ режущего инструмента.

Характерная кривая износа задней поверхности инструмента h_3 в зависимости от пути l, пройденной резцом по заготовке, состоит из трех более или менее отчетливо выраженных участков (рис. 1):

ОА – периода приработки,
АВ – периода нормального изнашивания инструмента,
ВС – периода катастрофического изнашивания инструмента.

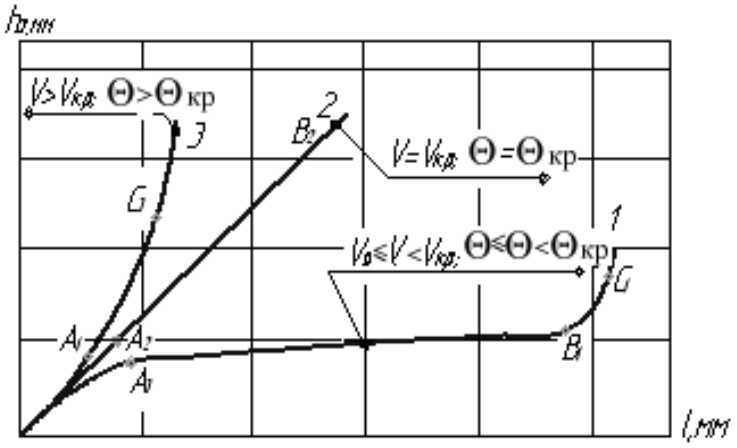


Рис.1. Определение критической скорости и температуры резания (схема)

При средних скоростях резания (рис.1кривая1) период нормального изнашивания может составлять до 85÷90% периода стойкости. По мере увеличения скорости резания период нормального изнашивания сокращается и при очень высоких скоростях становится настолько малым, что после периода приработки наступает период катастрофического изнашивания (рис.1 кривая 2).

Анализ экспериментальных кривых износа $h_3 = f(l)$, полученных при различных скоростях резания, показывает, что эти кривые могут иметь как различные величины приработочного износа, так и различные направления кривизны (выпуклость или вогнутость) по отношению к осям h_3 и l. Причем, при определенных скоростях (температурах) резания, кривая $h_3 = f(l)$ вырождается в прямую линию с постоянным углом наклона (равным интенсивности изнашивания) к осям h_3 и l на всей длине пути резания до принятого критерия затупления h_3, включая зону приработочного износа (рис.1, кривая 2). Температура, соответствующая появлению прямолинейной зависимости 2, может быть принята в качестве критической температуры резания. При дальнейшем повышении скорости (температуры) резания, период приработки отсутствует, инструмент

начинает катастрофически изнашиваться с самого начала резания (рис.1 кривая 3).

На рис.2 показано изменение влияния пути резания на износ резца ВК60М с ростом скорости резания при точении сплава ХН73МБТЮ-ВД при различных сочетаниях подачи и глубины резания.

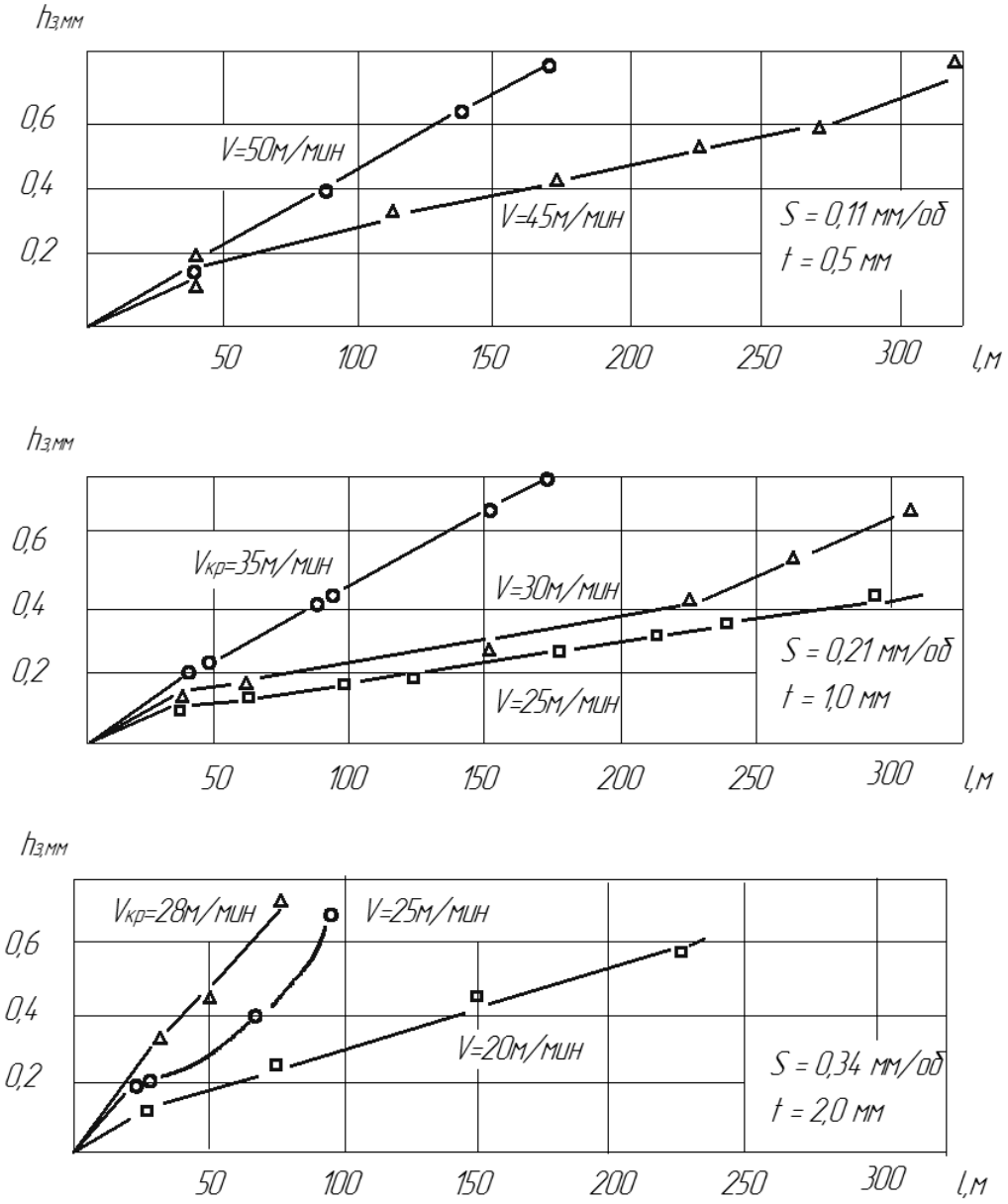


Рис.2. Изменение влияния длины пути резания на износ резца ВК6ОМ с ростом скорости резания при точении сплава ХН73МБТЮ-ВД

Анализ кривых износа $h_з = f(l)$, полученных при различных скоростях резания для различных сочетаний элементов срезаемого слоя, показывает, что при определенных скоростях резания:

V = 50 м/мин, S = 0,11 мм/об, t = 0,5 мм;

V = 35 м/мин, S = 0,21 мм/об, t = 1,0 мм;

V = 28 м/мин, S = 0,34 мм/об, t = 2,0 мм,

кривые $h_з = f(l)$ вырождаются в прямую линию с постоянным углом наклона к осям $h_з$ и l на всей длине пути резания до принятого критерия затупления $h_з$, включая зону приработочного износа.

Эти скорости и соответствующие им температуры резания принимаем в качестве верхней границы износостойкости инструмента, считая это предельным случаем резания, так как работа на скоростях выше указанных делает процесс износа резца «нестационарным» с самого начала.

Известно, что температура резания оказывает существенное влияние на износостойкость инструмента, то есть износ является термически активированным процессом, и, следовательно, обладает определенной энергией активации.

Появление критических скоростей и температуры резания связано с динамическими коэффициентами запасаемой в поверхностных слоях инструмента скрытой (поглощенной) энергии, снижающей контактную или поверхностную прочность инструментального материала. При усталостном характере изнашивания поверхностей режущей части инструмента сказывается изменение соотношения нормальных и касательных напряжений в контакте, возникновение различных механизмов зарождения трещин, и, следовательно, не пропорциональное изменение времени до разрушения образцов при повышении температуры испытания. Вполне очевидно, что температурный диапазон $\theta_0 - \theta_{кр}$ полностью определяет область рационального использования какой-либо марки твердого сплава при обработке резанием данного обрабатываемого материала и может служить одним из критериев обрабатываемости этого материала.

В соответствии с предложенной методикой можно определять критическую температуру резания как верхнюю границу возможного использования инструмента. О критической температуре в этом

случае можно судить по наибольшей температуре, при которой интенсивность износа еще остается постоянной на всей длине пути резания, включая период приработки, а зависимость $h_з = f(l)$ вырождается в прямую линию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975.12с.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. С.112,114-115.

УДК 621.793

С.Р. Шехтман (УГАТУ)

ЗАЩИТА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРЯДА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПОЛОГО КАТОДА

Использование новых ионно-плазменных технологий, в первую очередь, целесообразно для создания специальных поверхностей на лопатках современных ГТД. В процессе эксплуатации поверхностный слой материала лопаток турбины претерпевает настолько сильные изменения в составе, структуре и свойствах, что становится невозможным реализовать резервы жаропрочности.

В общем случае поверхность лопаток турбины может включать в себя следующие слои:

теплоизоляционный керамический слой толщиной 100-150 мкм;

металлический слой толщиной 5-10 мкм;

диффузионный жаростойкий слой толщиной 50-100 мкм;

барьерный слой, препятствующий диффузионному обмену между основой и покрытием.

Лопатки при работе подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок. При этом общее число циклов нагружения достигает нескольких сот миллионов, в связи с чем разрушения имеют, как правило, усталостный или термоусталостный характер.

Одним из перспективных способов обеспечения эксплуатационных свойств является создание на защищаемых поверхностях лопаток многослойных многофункциональных поверхностей. Для реализации данного направления широко используются метод вакуумного ионно-плазменного осаждения поверхностных слоев, основанный на конденсации из потока вакуумно-дуговой плазмы материала покрытия при энергиях выше 50эВ [1,2,3]. Поверхностные слои металла оказывают большое влияние на прочность тонкостенных деталей и на механические свойства, поэтому одним из немногих радикальных средств повышения эксплуатационных свойств деталей ГТД, а также надежной защитой от интенсивной газовой коррозии является нанесение жаростойкого покрытия.

Выбор материала и способа нанесения покрытия производится с учетом следующих основных положений:

условия эксплуатации покрываемой детали или узла (температура, условия контакта, среда и др.);

химическая и металлургическая совместимость материалов покрытия и подложки, которая предполагает образование прочных связей между ними и отсутствие электрохимического взаимодействия. При этом следует учитывать возможность уменьшения прочности сцепления покрытия с подложкой в процессе эксплуатации в связи с возможным выделением на их границе фаз, образованием хрупких соединений, коррозионными процессами и прочие;

возможность нанесения покрытия на данный материал выбранным способом;

физико-механическая совместимость, которая подразумевает близость физических и механических свойств материалов

покрытия и подложки, в частности модулей упругости, твердости, коэффициента термического расширения;

возможность получения структуры покрытия с заданным комплексом свойств;

возможность нанесения покрытия на деталь данной формы с обеспечением равномерности толщины и свойств.

Защитное покрытие должно отвечать ряду требований:

покрытие должно обладать высоким сопротивлением сульфидной коррозии, окислению и эрозии в газовом потоке с параметрами, соответствующими параметрам газа в турбине;

покрытие не должно разрушаться от статических и переменных напряжений, действующих на поверхность лопаток, для чего оно должно обладать определенным сочетанием прочности и пластичности;

покрытие должно быть стабильным на поверхности лопаток и не разрушаться в результате взаимодействия с защищаемым сплавом;

покрытие не должно понижать механических свойств материала лопаток.

Для повышения эксплуатационных свойств синтезированных покрытий был предложен метод осаждения покрытий через технологический экран, позволяющий реализовать процесс дополнительной ионной бомбардировки.

Использование дополнительной ионной бомбардировки позволяет осуществлять предварительную очистку обрабатываемой поверхности, активацию поверхности, предварительный нагрев и проведение процесса в условиях плазменного ассистирования.

Дополнительная ионная бомбардировка может быть реализована двумя способами. Во-первых, проведением процесса в несамостоятельном сильноточном разряде с накальным катодом, используя плазмогенератор ПИНК, позволяющим придать значительное дополнительное ускорение ионам плазмообразующего газа, что также способствует ускорению диффузионных процессов в приповерхностных слоях подложки.

Во-вторых, использованием разработанного способа реализации дополнительной ионной бомбардировки поверхности с помощью плазмы повышенной плотности, создаваемой между экраном (в виде

сетки) и обрабатываемой поверхностью, позволяющего осуществлять процесс ассистирования при осаждении покрытий.

Сущность способа [4,5,6] заключается в том, что с помощью специального экрана (в виде сетки) между обрабатываемой поверхностью и экраном формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц. Поверхность детали непосредственно становится поверхностью полого катода, что приводит к образованию вблизи обрабатываемой поверхности структуры из плазмы и слоя пространственного заряда между обрабатываемой поверхностью и границей плазмы. В катодной полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, и скорость распыления обрабатываемой поверхности. При размере ячейки сетки $a<a_{кр}$ прикатодные области перекрывают расстояние между ячейками и отражают быстрые осциллирующие электроны, что увеличивает концентрацию заряженных частиц.

Бомбардировка поверхности подложки с использованием разряда на основе ЭПК удаляет поверхностный слой, осуществляет эффективную очистку и поддерживает ее чистой до момента осаждения покрытий. Ионная бомбардировка активирует подложку, способствуя активному зародышеобразованию на первом этапе формирования покрытия. Обработка ионами поверхности растущего покрытия нарушает направленность столбчатых кристаллов. Эти явления проявляются в образовании мелкоблочной структуры.

Рентгеноструктурные исследования, проведенные на модельных покрытиях (в качестве модельного покрытия использовалась технически чистая медь), показали возможность получения покрытий с мелкоблочной структурой. Исследования проводились на дифрактометре общего назначения ДРОН-4-07 с неподвижной рентгеновской трубкой CuK_{α} излучением К-а дублета на К-а1 ($\lambda_{К\text{-}а1}$ =1,54051) и К-а2 ($\lambda_{К\text{-}а2}$= 1,54433) с графитовым монохроматором на выходном пучке, пиновая мощность трубки 2 кВт**.** Исследовались образцы из материала ЖС6У и 12Х18Н9Т с модельными покрытиями. Результаты исследования подтвердили, что при напылении покрытий при использовании разряда на основе эффекта полого катода (ЭПК), величина структурных составляющих (блоков)

меньше, чем при традиционном методе обработки (величина структурных составляющих 20мкм), но больше кристаллитов в нанокристаллической меди (55 ÷ 3нм) и равна 270 ÷ 30нм.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение микроструктуры образцов из материала ЖС6У с покрытием ВСДП-11, напыленных с использованием экрана и без него (рис.1, 2).

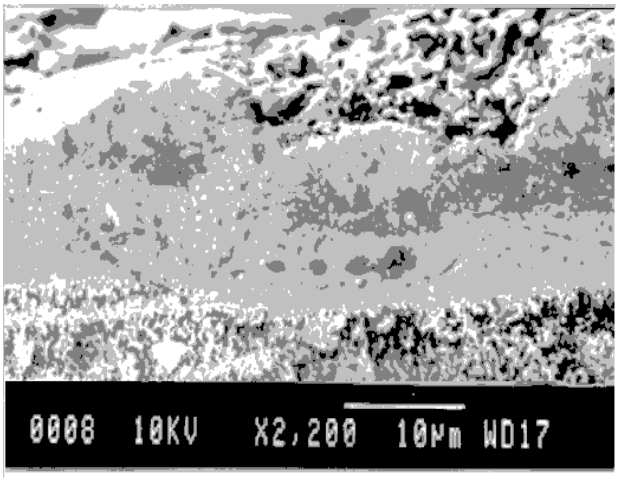


Рис.1. Микроструктура образца из материала ЖС6У с покрытием ВСДП- 11, напыленного по технологии ВИАМа

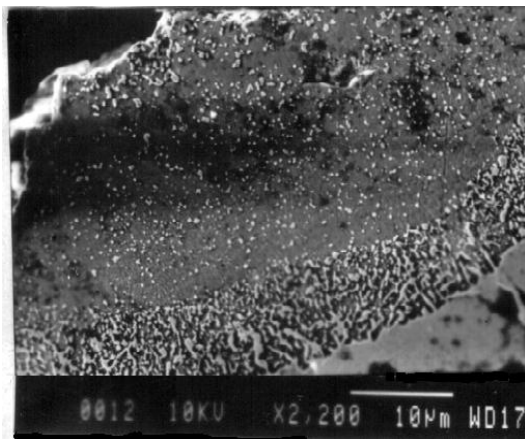


Рис.2. Микроструктура образца из материала ЖС6У с покрытием ВСДП-11, напыленного с использованием экрана

Верхняя зона покрытия, осажденного с использованием разряда на основе ЭПК (рис.2), характеризуется относительно высокой степенью дисперсности распределения основных составляющих покрытия. Наружный слой состоит из мелких гомогенно распределенных интерметаллидных фаз NiAl, внутренняя зона – из более крупных интерметаллидов Ni_3Al, имеющих одинаковую направленность, которые обеспечивают более прочное соединение, как бы “сшивание” материала покрытия и подложки. Диффузионный слой, полученный по базовой технологии (рис.1), отличается более неравномерным распределением крупных интерметаллидных фаз и большим разбросом в их размерах 0,85 – 2,97 ($\cdot 10^{-6}$ м).

Одними из основных эксплуатационных характеристик лопаток турбины ГТД с защитными покрытиями являются долговечность и жаростойкость.

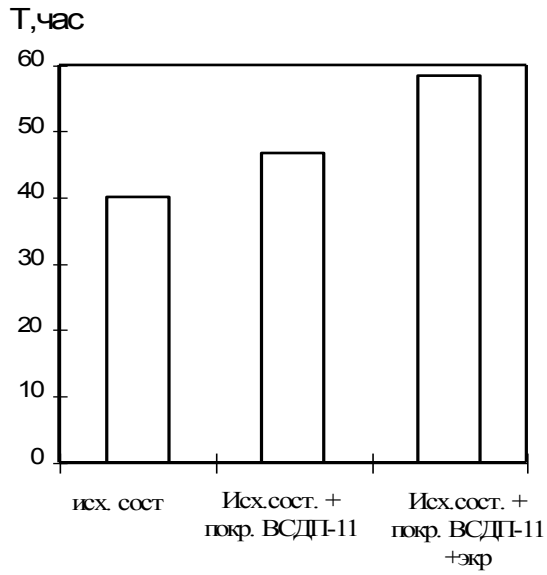


Рис.3. Гистограмма долговечности сплава ЖС6У при различных видах обработки: *1 – исх. сост.; 2 – исх.сост+покр.; 3 – исх. сост+покр+ экр.*

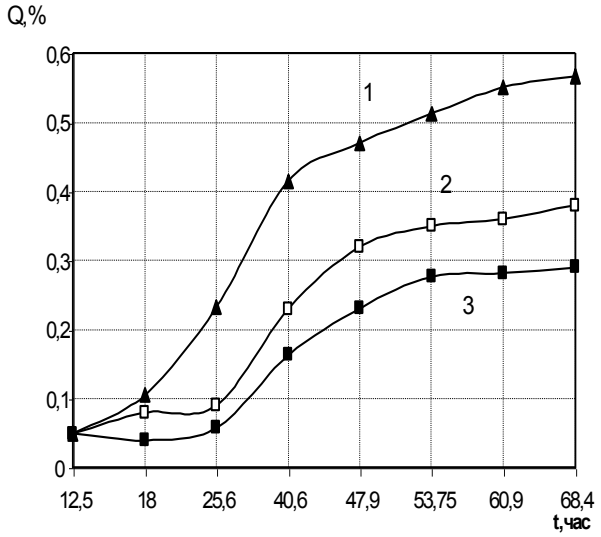


Рис.4. Жаростойкость ЖС6У при различных видах обработки: *1 – исх. сост.; 2 – исх.сост+покр.; 3 – исх.сост+покр.+ экр.*

Проведенные исследования ионно-плазменных покрытий ВСДП-11, осажденных на сплав ЖС6У с использованием разряда на основе ЭПК, показали увеличение его долговечности на 21 % (рис.3) и жаростойкости на 30 % (рис.4), обуславливаемое формированием в поверхностном слое стабильной β-NiAl фазы, равномерно распределенной по материалу, а также образованием в поверхности повышенной концентрации оксидов Al_2O_3 и SiO_2, (что подтверждается исследованиями на электронном микроскопе с приставкой для микроанализа “LINK”), обеспечивающих снижение скорости проникновения ионов кислорода и торможение диффузии атомов основы.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие основные выводы:

предложен и практически реализован метод ионной очистки и осаждения покрытий на поверхность конструкционных материалов с использованием разряда на основе ЭПК;

разработан метод осаждения жаростойкого покрытия ВСДП–11 на сплав ЖС6У с использованием разряда на основе ЭПК,

позволяющий увеличить на 21% долговечность и на 30 % его жаростойкость;

установлено, что при осаждении покрытия ВСДП-11 по методу с применением разряда на основе ЭПК в поверхностном слое образуется повышенная концентрация оксидов Al_2O_3 и SiO_2, обеспечивающих повышение жаростойкости за счет снижения скорости проникновения ионов кислорода и торможения диффузии атомов основы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Сулима А.М., Ягодкин Ю.Д. и др. Перспективы применения ионной обработки в авиадвигателестроении// Авиационная промышленность. 1992, № 9. С. 9-12.
2. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей/ под ред. А.Г. Братухина, Г.К. Язова. М.:Машиностроение,1997. 416 с.
3. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / под. ред. Паута Дж.М. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
4. Способ обработки поверхности: пат. 2096493 Рос. Федерация. № 94038640/02; заявл. 17.10.1994; опубл. 20.11.1997, Бюл. №32.
5. Устройство для нанесения вакуумно-плазменных покрытий: пат. 2075538 Рос. Федерация. № 93052969/02; заявл. 22.11.1993; опубл. 20.03.1997, Бюл. №8.
6. Способ катодного распыления: пат. 2101383 Рос.Федерация. № 95102546/02; заявл. 21.02.1995; опубл. 10.01.1998, Бюл. №1.

УДК 621.7.06

А.С. Семенов (ОАО НИИТ)

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАМЕНЫ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПАРКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Тяжелая экономическая ситуация в стране после распада СССР привела к тому, что многие отрасли производства, в частности авиационная, на сегодняшний момент имеют много изношенного оборудования. На некоторых предприятиях по производству авиационных двигателей замена оборудования не производилась с 1991 по 2002 год.

Анализ среднего возрастного состава имеющегося оборудования для механической обработки на ряде предприятий по производству авиационных двигателей представлен на рис.1

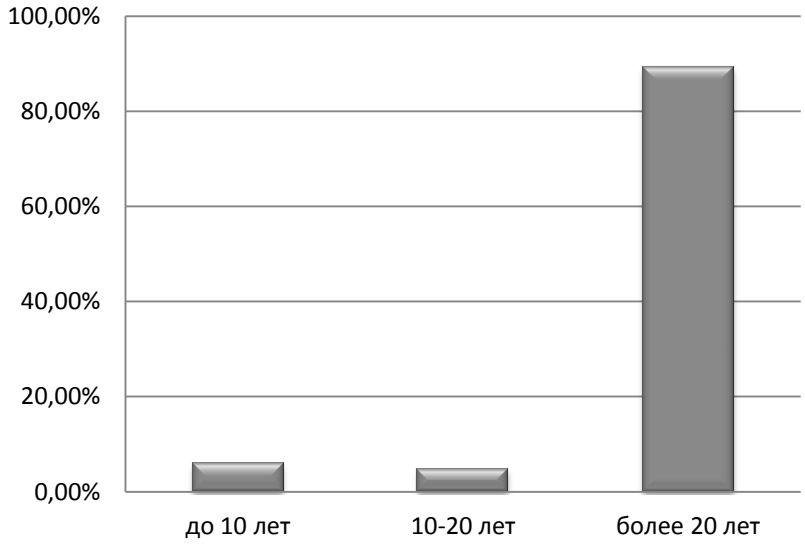


Рис.1. Средний возрастной состав имеющегося оборудования для механической обработки на предприятиях по производству авиационных двигателей

Коэффициент износа оборудования (без учета оборудования поступившего и внедренного в производство после 2004 года) составляет 88%, в том числе по группам оборудования:

металлорежущее – 75-95%;
кузнечно-прессовое – 82%;
металлургическое – 70%;
грузоподъемное – 70%;
сварочное – 90-95%.

Для большинства станков ресурс капитальных ремонтов исчерпан, а запасные части и комплектующие не выпускаются. Ритмичная работа предприятий и устойчивый рост программы выпуска изделий при эксплуатации существующего парка оборудования невозможна. При этом имеющееся оборудование моложе 20 лет по производительности и точностным характеристикам является недостаточным для обеспечения оптимальной трудоемкости и заданной точности изготовления современных деталей.

Средний удельный вес прогрессивного оборудования (станки с ЧПУ, обрабатывающие центра) в общем парке имеющегося оборудования для механической обработки на ряде предприятий по производству авиационных двигателей представлен на рис.2

Рис.2. Удельный вес прогрессивного оборудования в общем парке имеющегося оборудования для механической обработки на предприятиях по производству авиационных двигателей

В связи с этим в настоящее время актуален вопрос внедрения прогрессивного оборудования для комплексной обработки (точение, фрезерование, сверление, нарезание шлиц и др.) дисков ТВД и валов, изготовления сложного пространственно ориентированного профиля пера лопаток компрессора, электронно-лучевой сварки, термообработки в вакууме, балансировки роторов, протягивания и контроля пазов дисков турбин, глубинного шлифования замков турбинных лопаток.

Однако остаются «узкие» места в производственных циклах изготовления таких ответственных деталей, как диски компрессоров и ТНД, жаровых труб, лопаток вентилятора и компрессора, лопаток турбин с монокристальной структурой, корпусных деталей. Использование существующего малопроизводительного, требующего постоянного ремонта, морально и физически устаревшего технологического оборудования определяет неэффективность производственного процесса:

− большое количество станков и занимаемая ими производственная площадь;

− необходимость в большом количестве высококвалифицированных рабочих;

− низкая стабильность качества продукции, обусловленная низкой стабильностью технологического процесса и влиянием человеческого фактора;

− оснащение каждого рабочего места специальной оснасткой;

− низкая производительность и длительный цикл производства.

Но приобретение оборудования – это решение лишь части проблемы. Для установки современного крупногабаритного оборудования требуются современные корпуса с высокими перекрытиями и соответствующей сеткой колонн. Корпуса цехов многих предприятий в основе своей крайне изношены и не отвечают этим требованиям. Свободных площадей на территории предприятий нет, поэтому потребуется поэтапная реконструкция существующих корпусов, в результате которой будут организованы производственные центры по изготовлению групп ДСЕ (например, центр по изготовлению роторов турбин и компрессоров, камер сгорания, корпусов компрессора и турбины и др.).

Приобретение прогрессивного технологического оборудования, а это, как правило, обрабатывающие центры, позволит решить несколько проблем. Во-первых, это высвобождение производственных площадей, так как один обрабатывающий центр позволяет заменить до трех единиц существующего старого оборудования. Во-вторых, сокращение сроков подготовки производства и объемов изготавливаемой специальной оснастки за счет выполнения нескольких операций при обработке детали с одной установки, что требует одного базового приспособления вместо приспособлений на каждую операцию. В-третьих, сокращение основных рабочих, что способствует решению кадровой проблемы, а также отсутствие необходимости иметь рабочих высочайшей квалификации. Кроме того, возможность применения прогрессивного инструмента на повышенных режимах резания способствует снижению трудоемкости и цикла обработки деталей, повышению стабильности качества обрабатываемых деталей.

В соответствии с вышесказанным, очевидно, что имеющееся производственное оборудование предприятий не позволяет обеспечить планируемый объем выпуска узлов и ДСЕ перспективных двигателей.

В этой связи ситуацию можно изменить, двигаясь по двум направлениям:

− первое - сотрудничество с создаваемыми в рамках ОДК Центрами технологических компетенций, имеющих более прогрессивное оборудование и технологии;

− второе - модернизация собственных производственных мощностей, позволяющих повысить производительность и точность изготавливаемых деталей.

Исходя из выше изложенного, можно заключить, что необходимо как можно скорее провести модернизацию производственных мощностей предприятий по производству авиационных двигателей с целью уменьшения продолжительности производственного цикла и повышения качества изготавливаемой продукции.

Раздел III

ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 621.74.045

Д.У.Асфандияров, Д.Е.Тук, А.Ю.Чечулин, П.В.Сверчков, Ю.А.Шабельник (ОАО «УАП «Гидравлика»), А.А Ганеев (УГАТУ)

ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ МИКРОТУРБИННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В России распределенная энергетика [1] имеет большой потенциал для роста, существенно превышающий среднемировые показатели. Это объясняется совокупностью объективных факторов и особенностей текущего этапа развития экономики страны. Огромные размеры страны при низкой плотности населения приводят к недоступным затратам в современных условиях на транспортировку электроэнергии и тепла по централизованным системам. В то же время доступность к топливным ресурсам таких, как природный газ и дизельное топливо на большей части территории страны облегчает построение локальных генерирующих мощностей. В связи с этим объем рынка систем распределенной генерации в России оценивается экспертами в 20-40 тысяч МВт на ближайшие 10 лет.

Микротурбинные энергоустановки давно завоевали зарубежный рынок малой энергетики. Главная их отличительная особенность – рекордные показатели по экономичности, экологии, удобству обслуживания, доказанная на практике исключительная надежность. Это достигается за счет интеграции современного высокоскоростного электрического генератора и газотурбинного привода в конструктивно единый узел, а для обеспечения приемлемых

эксплуатационных характеристик генерация переменного тока промышленной частоты осуществляется под управлением силовой электроники, представляющей собой комбинацию выпрямитель – инвертор – фильтр, а также применение теплообменника-регенератора для увеличения КПД. Однако в России аналогов таких установок не имеется [2].

Малоразмерные энергетические установки обладают качествами, дающими им очень серьезные преимущества по сравнению с уже традиционными поршневыми газовыми энергоустановками, а именно:

– уникальные экологические показатели (по выбросам, шуму, вибрации на порядок меньшие, чем у поршневых энергоустановок);
– удобство обслуживания и эксплуатации (в т.ч. отсутствие серьезных строительно-монтажных работ при пуске в эксплуатацию);
– дистанционное управление;
– объединение установок в кластеры с автоматическим включением и отключением отдельных машин в зависимости от нагрузки;
– программа регулирования, основанная на изменении частоты вращения ротора в зависимости от нагрузки и атмосферных условий;
– переключение с автономного режима на работу в сети и обратно;
– полное отсутствие механических передач в силовой части конструкции и электропривод агрегатов;
– регенерация тепла выхлопных газов.

Схема микротурбинной установки для выработки тепла и электрической энергии приведена на рис.1.

Предприятие ОАО УАП «Гидравлика» с начала 2013 года приступило к разработке микротурбинной энергетической установки МВГ-100 для выработки 100 кВт электрической и 170 кВт тепловой энергии. Основные характеристики установки МВГ-100 приведены в табл.1.

Для обеспечения конкурентоспособности энергоустановки необходимо обеспечить минимальную себестоимость ее изготовления за счет высокого уровня эффективности рабочего процесса [3], разработки и внедрения передовых технологий изготовления.

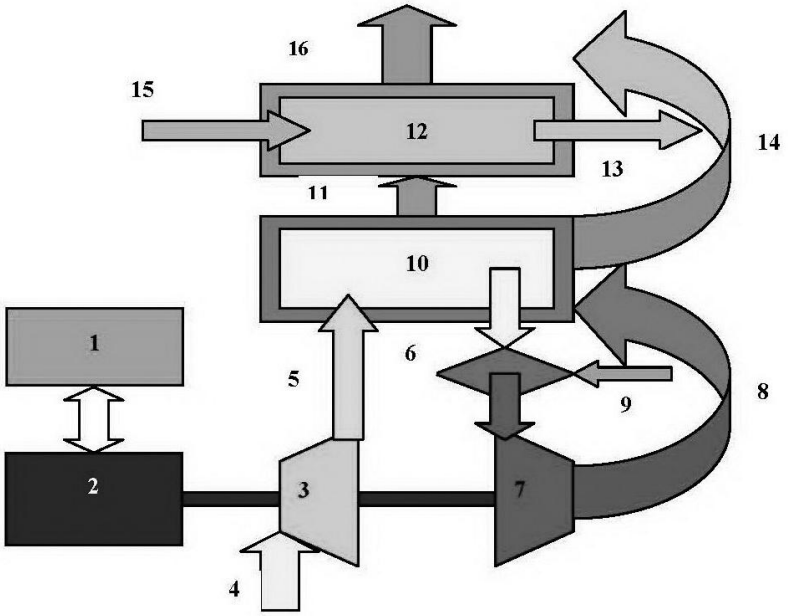


Рис.1. Принципиальная схема микротурбинной установки: *1- блок силовой электроники; 2- высокоскоростной генератор; 3- компрессор; 4-воздухозаборник; 5- воздуховод между компрессором и рекуператором; 6- камера сгорания; 7- турбина; 8- газовод между турбиной и рекуператором; 9- подвод топлива; 10- рекуператор; 11- газовод между рекуператором и котлом-утилизатором; 12- котел-утилизатор; 13- выход горячей воды; 14- байпасный газовод; 15- вход холодной воды; 16- выхлопной тракт*

Таблица 1

Основные характеристики МВГ-100

Наименование		Размерность	Величина
Номинальная мощность при tн= +15°С, Рн= 0,10132 МПа	электрическая	кВт	100
	тепловая	кВт	170
КПД	электрический	%	30
	полный		80
Напряжение на выходе, трехфазное		В	400
Частота тока		Гц	50
Частота вращения ротора		Об/мин	70000

Продолжение табл.1

Наименование		Размерность	Величина
Ресурс, при работе в базовом классе эксплуатации	межремонтный	час	30 000
	назначенный		90 000
Выбросы вредных веществ при 15% O_2 в выхлопе, не более	NOX	ppm	20
	CO		30
Шум на расстоянии 10 м, не более	стандартная комплектация	дБА	70
	в шумозащитном корпусе		55
Топливо		Газ/дизельное	
Давление газа на входе: с дожимным компрессором		бар	0,02 - 1,00
Давление газа на входе: без дожимного компрессора, более		бар	6
Давление дизельного топлива на входе		бар	0,2- 2,5
Габариты (без котла-утилизатора)		мм	1020×1910×2900
Масса, не более (без котла-утилизатора)		кг	3000

При исследовании изделий аналогов были выявлены следующие технологические проблемы:

− изготовление самых сложных деталей компрессора (рабочего колеса и радиального диффузора) необходимо выполнять по «безлюдной» технологии за счет применения высокоточного пятикоординатного оборудования с ЧПУ, режущего инструмента из твердых сплавов (детали изготавливаются за одну установку без применения ручного труда);

− изготовление турбины (сопловой аппарат и рабочее колесо) методом литья по выплавляемым моделям с применением 3d принтера;

− внедрение информационно-измерительной системы в процесс стендовых испытаний при доводке отдельных узлов и энергоустановки в целом;
− крепление на роторе высокоскоростного генератора высококоэрцитивных магнитов из редкоземельных материалов (использование технологии намотки высокопрочной бандажной нити);
− укладка тонкостенных железных пластин статора генератора, когда их толщина может составлять от 20 до 80 мкм;
− разработка технологии балансировки быстровращающегося ротора и составляющих его деталей (балансировка должна соответствовать классу G0.4);
− разработка многотопливной низкоэмиссионной камеры сгорания;
− технология изготовления рекуператора (нарезка и автоматическая сварка тонкостенных пластин нержавеющей стали рекуператора).

На предприятии для реализации изготовления рабочего колеса турбины методом литья по выплавляемым моделям совместно с кафедрой литейных машин ФГБОУ ВПО УГАТУ было осуществлено изготовление выжигаемых моделей турбины из полимера Accura-60 по чертежам и 3D моделям ОАО УАП «Гидравлика» на матричном 3D принтере.

Первые отливки, полученные таким образом, показали неудовлетворительное качество (наличие сквозных литейных раковин на поверхности лопаток), что, на наш взгляд, объясняется изготовлением модели из труднoплавкого материала Accura-60, который не успевает полностью удалиться при заливке в форму жидкого металла.

Для получения отливки удовлетворительного качества было проведено моделирование процесса заливки и последующей кристаллизации типового рабочего колеса с применением программы ProCAST. Результаты моделирования процесса кристаллизации после остывания отливки приведены на рис.2. Литая заготовка, полученная после моделирования и совершенствования технологии ее изготовления, приведена на рис.3.

Рис.2. Результаты моделирования с применением ProCAST

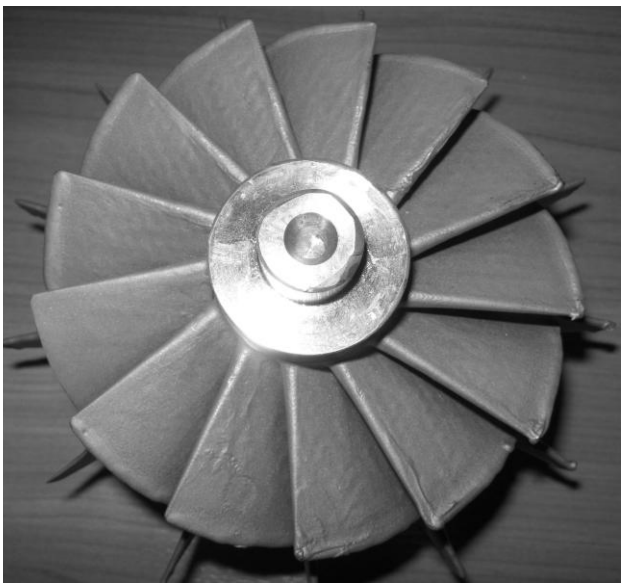


Рис.3.Отливка колеса турбины, полученная методом выплавляемых моделей, удовлетворительного качества

Полученные данные анализа позволяют повысить выход годного литья до 90% за счет оптимизации формы модели, литниковой системы и режимов заливки и остывания. Проведенные исследования позволяют перейти к использованию таких материалов, как ЖС6К-ВИ, ЖС6У.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Чечулин А.Ю. и др. Перспективы использования газотурбинных технологий в энергетике России// Вестник УГАТУ, 2009. Т. 13, №1 (34). С. 26-31.

2. Обзор и состояние развития современных газотурбинных установок малоймощности.2008.URL: http://stc-mtt.ru/wp-content/uploads/2011.

3. Чечулин А.Ю., Кривошеев И.А., Хохлова Ю.А. Выбор модели турбулентности при расчете потерь давления в проточной части ГТД с использованием программного комплекса ANSYS CFX// Вестник УГАТУ, 2011. Т.15, №2. С. 68–73.

УДК 66.067.11

А.Ф.Камалетдинов (УГАТУ)

ФИЛЬТР ДЛЯ ОЧИСТКИ ШФЛУ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

Фильтр для очистки широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) является частью комплекса газоперерабатывающего завода. Такие фильтра предназначены для снижения коррозии металла приборов и оборудования, непосредственно соприкасающихся с рабочим телом. Использование данных фильтров увеличивает срок эксплуатации насосов, а также предотвращает сужение сечения трубопроводов.

Значение фильтрации возрастает с увеличением добычи нефти, следовательно, и попутного нефтяного газа, частью которого является ШФЛУ. В связи с этим возникает необходимость в увеличении производительности фильтров.

Для очистки ШФЛУ от механических примесей используют фильтры периодического действия емкостного типа.

В общем случае такие фильтры представляют собой вертикальный цилиндрический сосуд с коническим или эллиптическим днищем с крышкой, работающий под давлением. Внутри корпуса установлена решетка либо коллектор с секциями, на которых закреплены полые вертикальные фильтровальные элементы – патроны, либо картридж.

К этому типу относятся патронные (картриджные) фильтры, предназначенные для осветительного фильтрования суспензий с содержанием 5% твердой фазы.

Фильтры этого типа по форме и расположению фильтровальной перегородки, а также зон для размещения суспензии, осадка и фильтрата, способа удаления осадка, а также по принципу их действия полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к фильтрам для очистки ШФЛУ.

На рис.1 представлены конструкции фильтров для очистки ШФЛУ от механических примесей, в которых существует ряд недостатков, а именно:

– высокие местные гидравлические потери при входе неочищенной ШФЛУ в фильтр через патрубок неочищенной жидкости, из-за резкого расширения площади потока;

– отсутствует эффект самоочистки, вследствие чего возникает необходимость в частой очистке фильтрующего элемента, что сокращает время работы фильтра в год.

На рис.2 представлена конструкция часто применяемого фильтра для очистки ШФЛУ от механических примесей. При эксплуатации данного фильтра возникают те же самые недостатки.

Проанализировав недостатки часто применяемого фильтра, были приняты конструктивные решения, устраняющие недостатки данного фильтра.

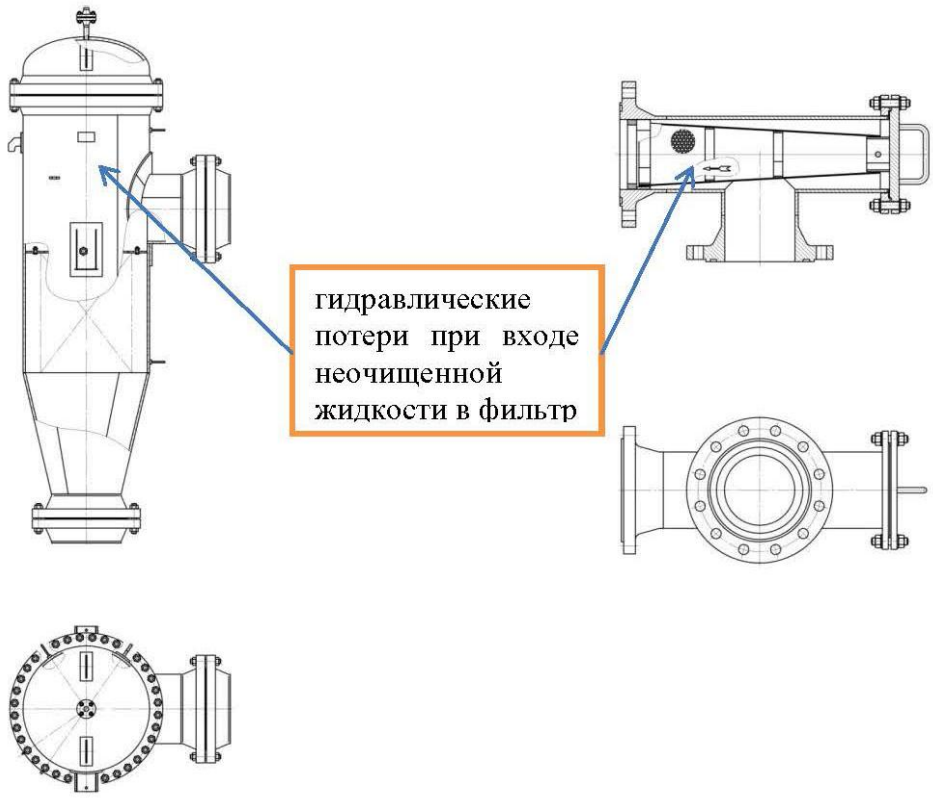


Рис.1.Конструкция фильтров

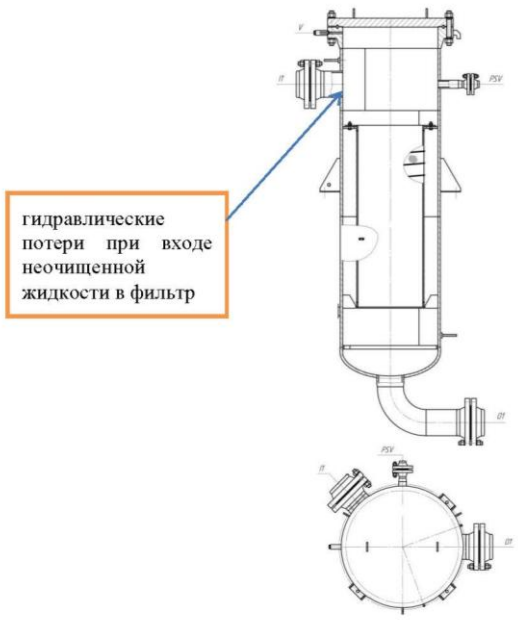


Рис.2. Конструкция часто применяемого фильтра

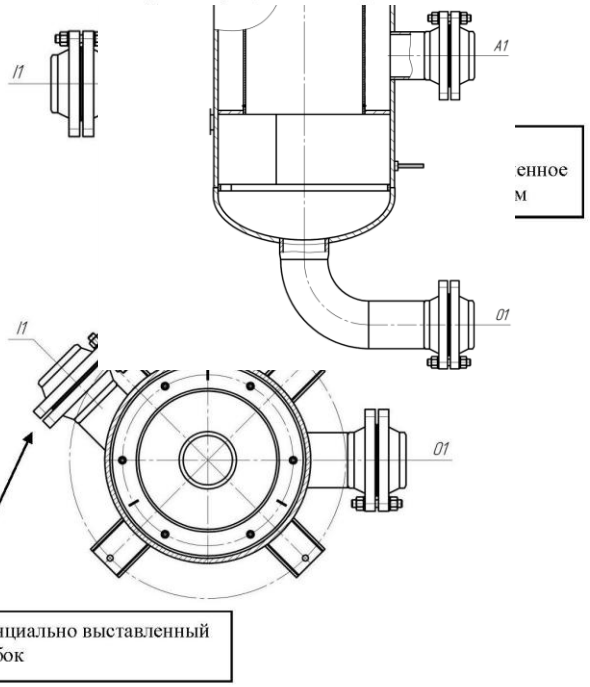


Рис.3. Повышение производительности фильтра

Высокие гидравлические потери устранены за счет тангенциально выставленного патрубка входа I1 неочищенной жидкости, показанной на рис.3, который создает вращательное движение жидкости, увеличивая проходную способность фильтра. Кольцо, которое установлено под углом, усиливает данный эффект.

Эффект самоочистки реализуется за счет устранения донышка на фильтрующем элементе (рис.2), что позволяет жидкости ШФЛУ проходить через весь фильтрующий элемент, тем самым смывая механические примеси со стенок фильтрующего элемента на дно фильтра. Это так же решает проблему частой очистки фильтрующего элемента.

Для того чтобы механические примеси не сливались с очищенной ШФЛУ, установлено кольцо в нижней камере, разделяющее камеру на две части. Добавлен патрубок А1 (рис.4), служащий для выхода очищенной жидкости ШФЛУ, а штуцер 01 на днище теперь выполняет роль дренажа.

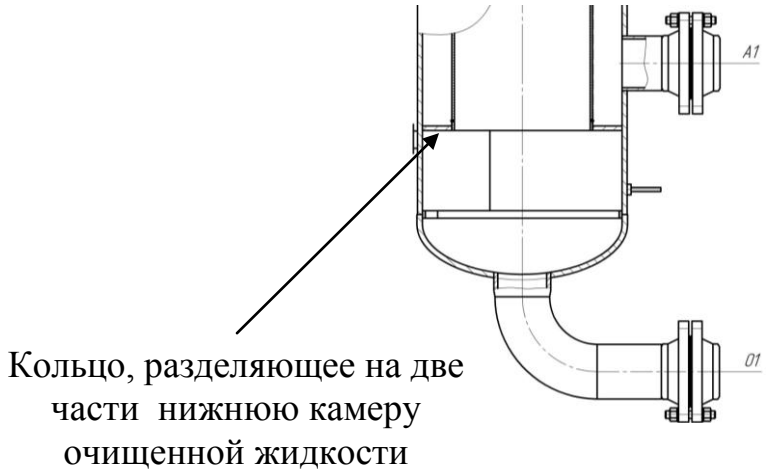


Рис.4. Повышение производительности фильтра

Предложенная конструкция фильтра повышает производительность очистки ШФЛУ от механических примесей, увеличивает период регламентных работ по обслуживанию самого фильтра и увеличивает конкурентную способность, что отвечает всем современным требованиям, предъявляемым к фильтрам.

УДК 620.9

Ю.М.Ахметов, М.В.Мухаметов (УГАТУ)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В УСТРОЙСТВЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Исследования устройства электрогидродинамического преобразования (ЭГДП) энергии носят преимущественно экспериментальный [1,2] или теоретико-аналитический [3,4] характер и не рассматривают параметры рабочей жидкости до ионизированного состоянии. Численное моделирование в сравнении с

теоретическим анализом и лабораторным экспериментом имеет некоторые преимущества и недостатки и не дает единственное теоретическое решение, является единичным численным экспериментом, выполняемым с определенным набором геометрических, физических, начальных и граничных условий.

Алгоритм методики моделирования фазового перехода рабочей жидкости в устройстве электрогидродинамического преобразования энергии представлен на рис. 1.

Методика моделирования предполагает предварительное изучение устройства, выделение основных частей и их назначения, принцип действия устройства. После выделения основных элементов и характера их взаимодействия возможно составить функциональную схему устройства. Далее следует составление функциональной схемы и описания физических процессов, возможно составление структурной схемы.

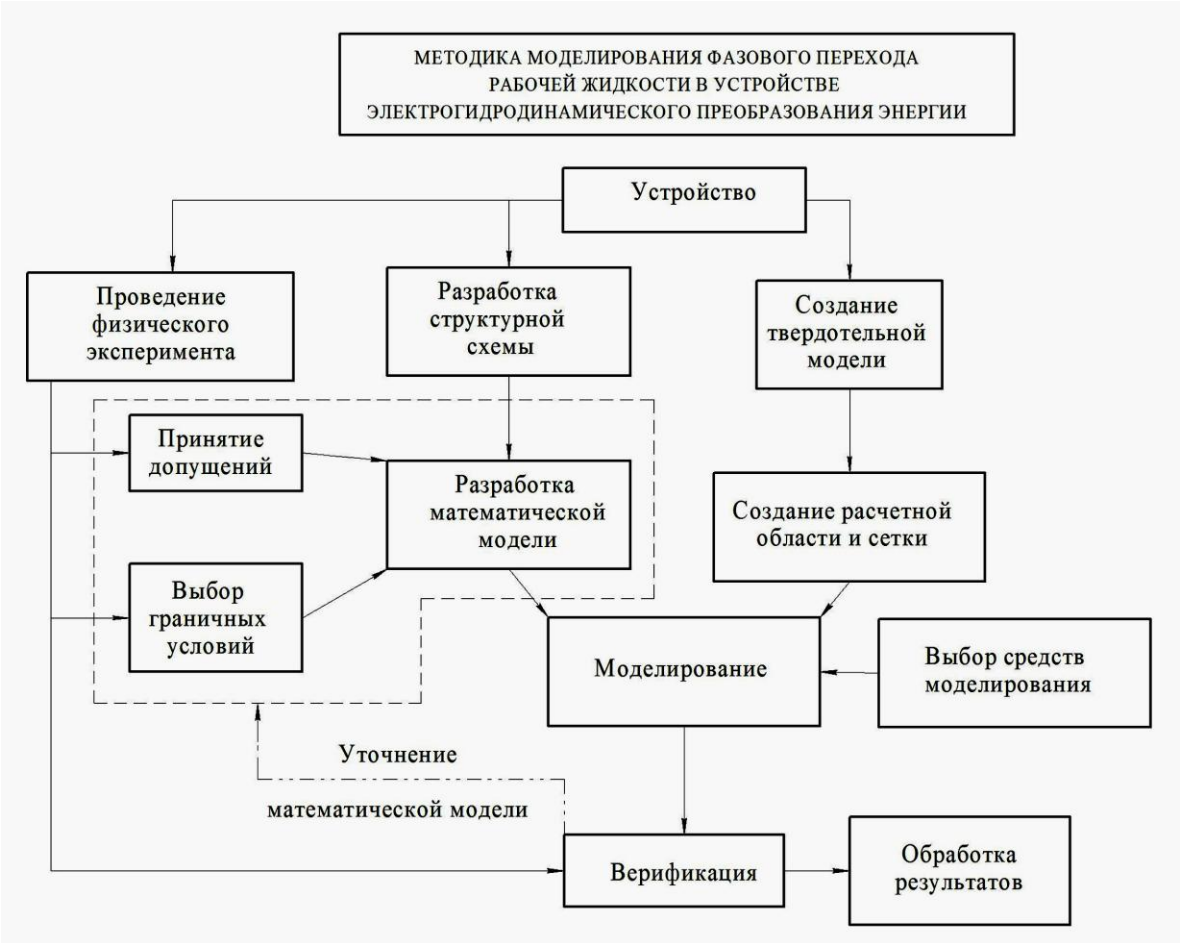


Рис.1. Схема методики численного моделирования фазового перехода рабочей жидкости в устройстве электрогидродинамического преобразования энергии

Следующим этапов моделирования является принятие допущений и граничных условий. Допущения позволяют не учитывать не существенные элементы устройства, процессы, которые невозможно или сложно учесть в математической модели. Граничные условия описывают параметры границ, ограничивающих расчетную область.

Существуют рекомендации и ограничения на тип этих условий, например, при моделировании гидродинамических процессов границу входа в область рекомендуют устанавливать с типом "скорость" или "расход", а выхода – "давление".

Математическая модель включает в себя аналитическое описание процессов. Уравнения выбираются с учетом особенностей конструкции и физических процессов, а также принятых допущений и граничных условий.

Средства (пакеты) моделирования должны иметь возможность учитывать процессы, записанные в математической модели. Моделирование течения предполагает задание проточной части, которую невозможно создать без твердотельной модели устройства.

Экспериментальное исследование позволяет получить некоторые граничные условия и провести верификацию результатов моделирования путем сравнения с экспериментом.

Коррекция заключается во внесении поправок в математическую модель. Это может быть как изменение уравнений, так и введение поправочных коэффициентов, полученных эмпирическим путем.

Моделирование фазового перехода проводится для проточного канала ЭГДП в пакете *Star-CCM+*. Область ограничена корпусом, границей бака и срезом выходного сопла. Для создания проточного канала устройства предварительно была построена твердотельная модель устройства в программном комплексе *SolidWorks*, предназначенном для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства.

Проточная часть была получена с помощью операции *Create Fluid Body*. Для учета влияния геометрии внешней части сопла – катода расчетная область была дополнена цилиндрической областью.

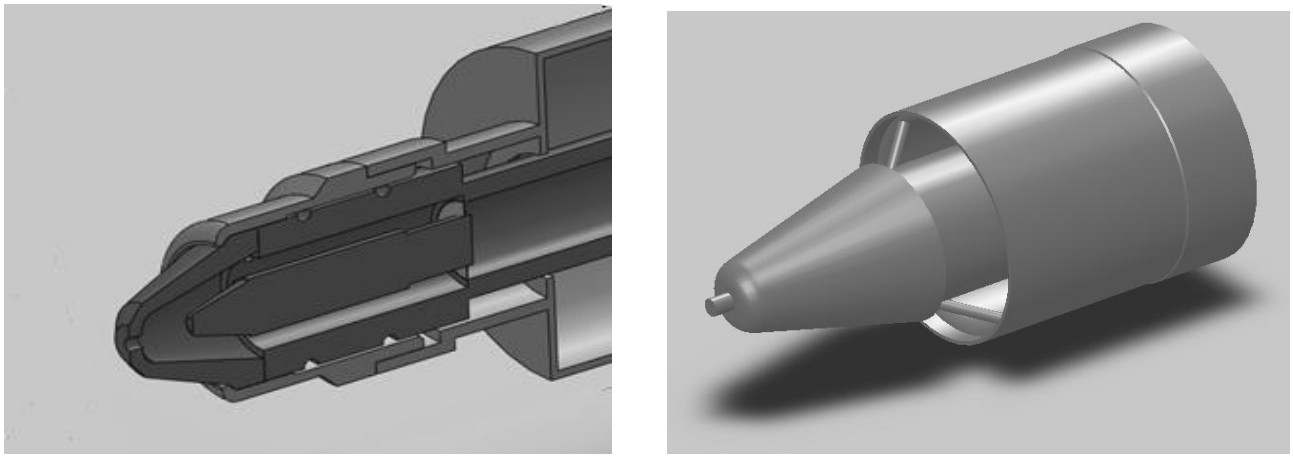


Рис.2. Твердотельная модель ЭГДП в разрезе и проточная часть устройства

При моделировании процесса течения жидкости в проточной части ЭГДП принимаются следующие условия:

− в моделируемую область поступает жидкость (вода);
− массовый расход через границу входа постоянный;
− из сопла рабочая жидкость истекает в парообразном состоянии;
− стенки канала не имеют шероховатостей;
− через стенки деталей устройства передается тепловая мощность;
− отсутствует теплообмен с внешней средой через стенки корпуса;
− жидкость имеет постоянную плотность;
− пар истекает в область с давлением 101325 Па;
− массовая доля жидкость/пар на входе -1/0, на выходе - 0/1.

Граничные условия входа в область:

− тип границы – "поток массы на входе";
− массовая доля жидкой фазы – 1.0;
− массовая доля паровой фазы – 0.0;
− температура втекающей среды – 300°К;
− массовый расход – 0.0000686 кг/с.

Граничные условия выхода из области:

− тип границы – "Давление на выходе";
− массовая доля жидкой фазы – 0.0;
− массовая доля паровой фазы – 1.0;
− статическое давление – 101325 Па.

Результаты численного моделирования в пакете *Star-CCM+* могут быть представлены в виде цветовых полей распределения параметров и в форме векторных полей.

На рис.3 представлено распределение давления потока в продольном сечении. Малый перепад давлений обусловлен малым массовым расходом. По причине учета силы тяжести наблюдается градиент давления вдоль вертикальной оси.

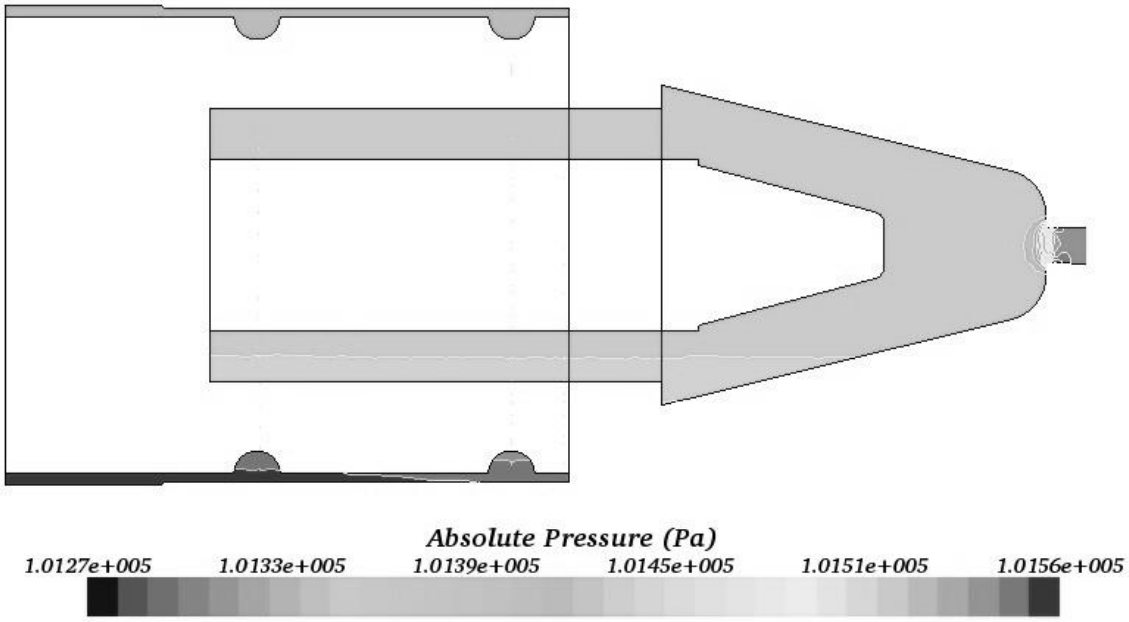


Рис.3. Распределение давления в продольном сечении электрогидродинамического преобразователя

Температуры рабочей жидкости изменяется от 300°К до 423°К (максимальное значение по температурной шкале в 450°К установлено вручную) (рис.4). Наибольшую температуру имеет область между коническим участком анода и соплом-катодом. Температура пара, истекающего через отверстие сопла, 395°К.

Распределение плотности пара показывает наличие жидкой фазы в области между внутренней поверхностью испарителя и центральным электродом, следовательно, при дополнительной подаче рабочей жидкости через штуцер необходимо увеличить количество энергии, передаваемой от испарителя путем, увеличения площади теплообмена (рис.5).

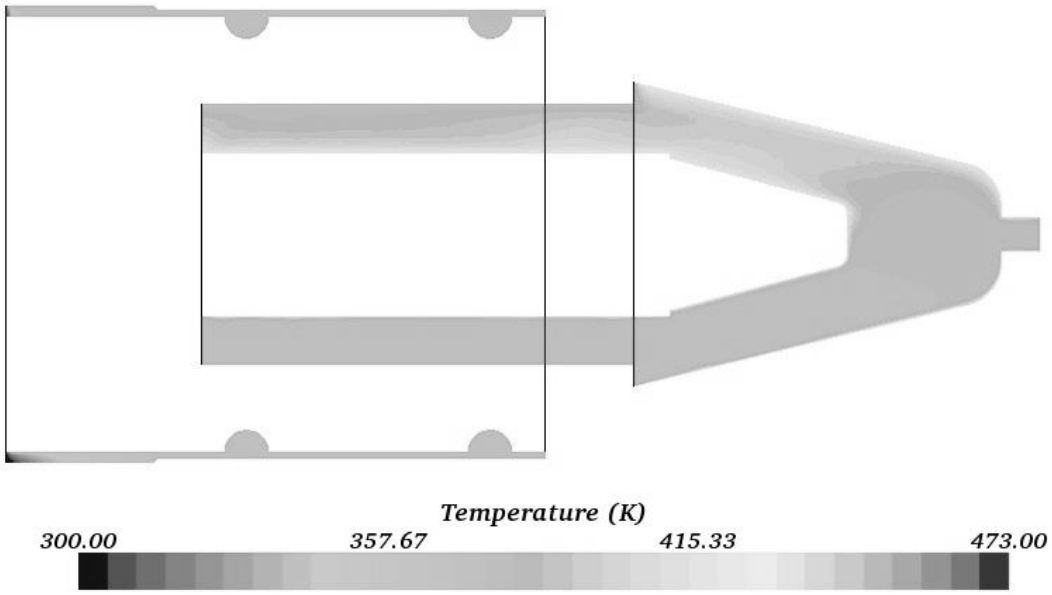


Рис.4. Распределение температуры в продольном сечении электрогидродинамического преобразователя

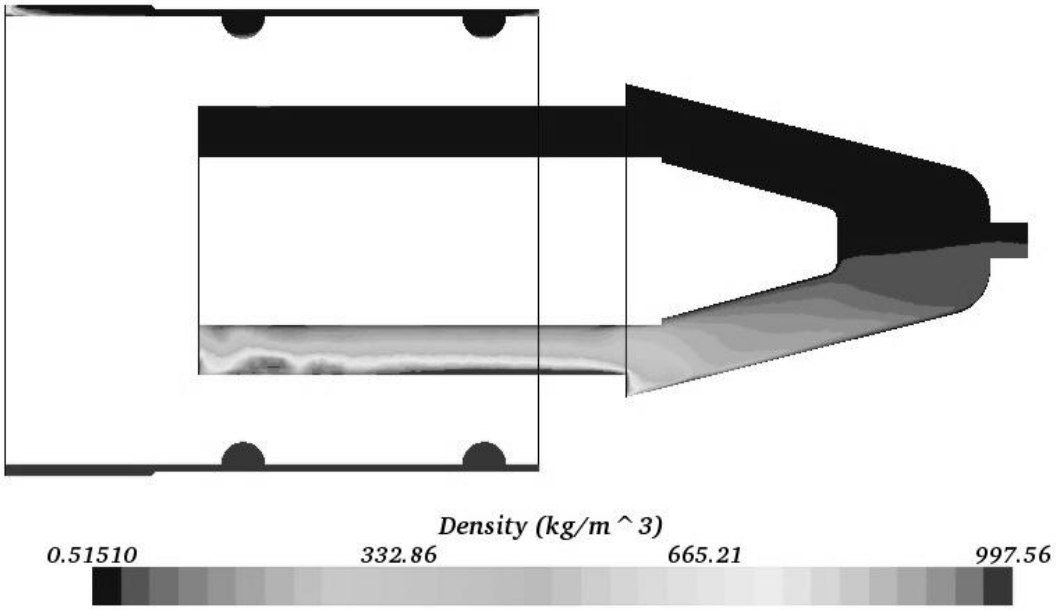


Рис.5. Плотность рабочей жидкости

Проведенное численное моделирование многофазного течения с фазовым переходом с учетом непрерывного нагрева жидкости и пара по всему тракту устройства позволяет определить параметры течения рабочей жидкости в проточной части устройства до взаимодействия с электрической дугой (рис.6). Обнаружены вихревые спиральные образования в области сужения потока в конфузорной.

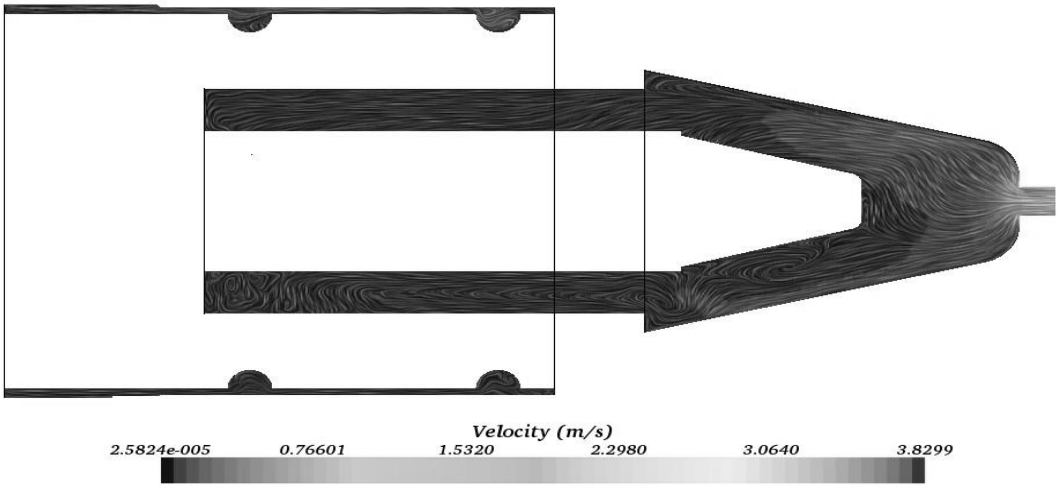


Рис.6. Скорость течения рабочей жидкости

По результатам численного моделирования получены цветовые поля распределения параметров рабочей жидкости и установлено наличие жидкой фазы в области между испарителем и анодом. При увеличении расхода рабочей жидкости рекомендуется внести изменения в конструкцию: доработать внутреннюю поверхность испарителя, увеличив площадь теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухаметов М.В., Свистунов А.В. Методика определения температурного поля электрогидравлического активатора жидкости// Мавлютовские чтения: сборник трудов Российской молодежной научной конференции. Уфа: УГАТУ, 2011. Том 1. С. 114-115.
2. Мухаметов М.В., Новиков М.В. Определение температурного поля истекающих газов и электрических характеристик электрогидродинамического преобразователя жидкости// Актуальные проблемы науки и техники: сборник научных трудов Седьмой Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2012. Т. 2. С. 87-190.
3. Ахметов Ю.М., Глухов Е.А., Калимуллин Р.Р., Зангиров Э.И., Мухаметов М.В. Преобразование водородосодержащей рабочей жидкости по замкнутому циклу// Наука-производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып. 7. Уфа: Издательство «Вагант»,2012. С. 191.
4. Ахметов Ю.М., Глухов Е.А., Зангиров Э.И., Мухаметов М.В., Хакимов Р.Ф. Передача энергии и изменение параметров рабочей жидкости в

электрогидродинамическом преобразователе// Наука-производству: ежегодный научно-технический сборник. Вып. 7. Уфа: Издательство «Вагант», 2012. С. 161.

УДК 620.9

Ю.М.Ахметов, М.Ф.Теницкий, А.В.Свистунов,
Д.И.Юнусбаев, Э.И.Зангиров (УГАТУ)

РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВИХРЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

При транспортировке и доставке природного газа потребителям возникает необходимость снижать его давление с 6,0–7,0 МПа до 0,1–0,3МПа. Эту задачу решают при помощи различных регуляторов давления [1,2]. Принцип действия этих регуляторов основан на эффекте Джоуля – Томсона.

Дроссель – эффект (эффект Джоуля – Томсона) характеризуется снижением температуры, что вызывает обмерзание трубопроводной и распределительной аппаратуры, и, как следствие, снижает надежность работы и может привести к аварийным ситуациям. Для предотвращения этого на газораспределительных станциях осуществляют предварительный подогрев за счет сжигания части транспортируемого газа, что является экономически и экологически неэффективным, поэтому рационально использовать процесс изотермического дросселирования, что реализовано в вихревом регуляторе давления, в рабочем процессе которого не подразумевается подвода внешней энергии [3,4].

Для определения характеристик квазиизотермического регулятора давления газа разработан испытательный стенд и система измерений термодинамических параметров.

Разработанный контур является элементом системы газодинамического стенда в лаборатории «Газодинамика высоких давлений» УГАТУ и состоит из кранов К1, К2, К3, К4, К16, К30, К31, К32, К33, К34, К35, К36, К37, К38, термометров Т1, Т2, манометров М1, М2, системы автоматического управления (САУ ГДС), горелки, резервного газового баллона (РЕЗЕРВ), предохранительного клапана ПК1(рис.1).

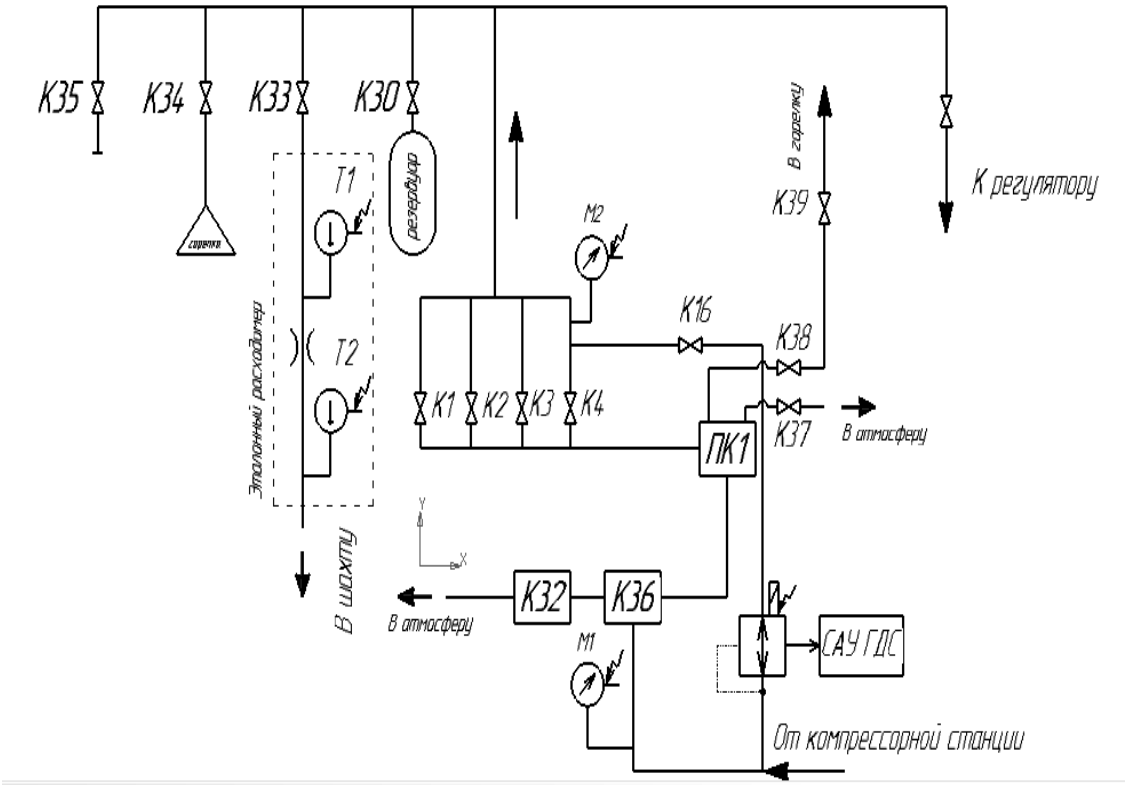


Рис. 1. Пневматическая схема газодинамического стенда

Закрытием крана К31 (рис.1) отсекается стенд испытаний регулятора от газодинамического стенда высокого давления.

Испытательный стенд КВРД (рис. 2) состоит из крана К34, через который осуществляется подача воздуха на вход регулятора, системы измерений вихревого теплоэнергетического комплекса (СИ ВТЭК 2Ч), позволяющей получать данные по давлению, температуре и расходу. Датчики давления ЛХ – 415 с диапазоном от 0 атм. до 30 атм. установлены перед расходомером – Р5, на входе в шиберную камеру – Р6, на входе в вихревую камеру – Р7, на выходе из регулятора – Р8 (рис.2).

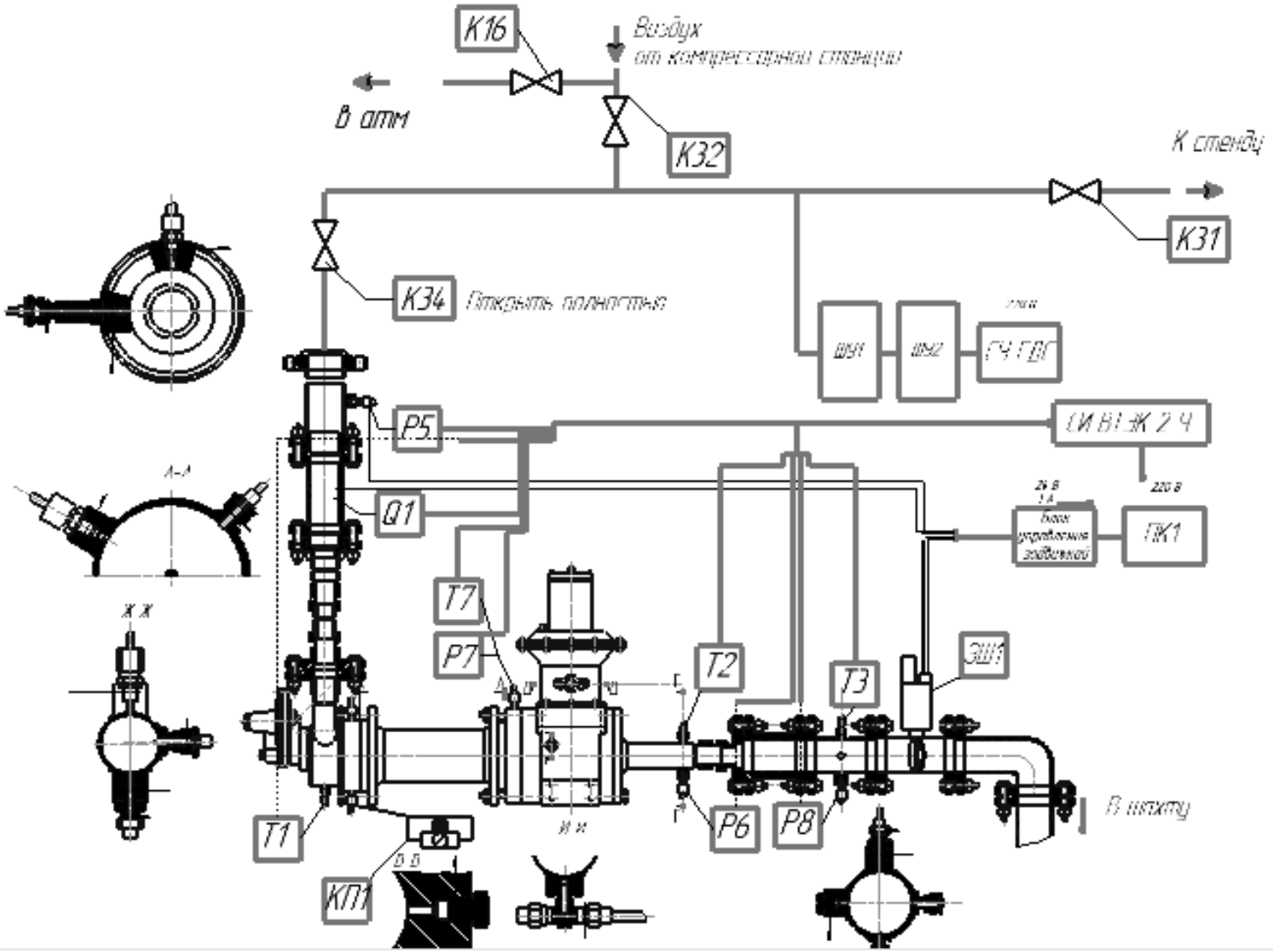


Рис. 2. Схема газодинамического стенда испытаний образца КВРД

Средства измерения температуры воздуха (термопары хромель – копель с закрытым спаем ТХК – 001 – 008с диапазоном измеряемых температур от -40°С до +600°С) устанавливаются на входе в вихревую камеру – Т1, на выходе из вихревой камеры – Т2, перед задвижкой – Т3.

Измерение расхода воздуха через регулятор производится воздушным расходомером ДР 18 – 32.

Обработка сигналов осуществляется при помощи трех преобразователей I – 7018Z, I – 7018P, I – 7080D и блока питания Macron. Преобразованный сигнал поступает в компьютер с установленной программой обработки данных – Gduw (рис.3), написанной в среде BorlandDelphi. Разработанный программный комплекс обеспечивает сбор информации по температуре, давлению и расходу в реальном времени и вывод ее (в процессе эксперимента) на экран компьютера в виде графических зависимостей с занесением данных в текстовый файл.

Рис. 3. Интерфейс программы для снятия характеристик КВРД

Испытательный стенд квазиизотермического регулятора давления газа позволяет получить экспериментальные температурные, расходно–перепадные характеристики, данные по давлению по тракту КВРД в зависимости от времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов Ю.М., Соловьев А.А., Тарасов А.А., Целищев А.В. Численное моделирование течения газожидкостного потока в вихревой трубе// Вестник УГАТУ: научный журнал Уфимского государственного авиационного технического университета. Уфа: УГАТУ, 2010. Т.14, №1 (36). С. 32 - 39.
2. Пархимович А.Ю., Соловьев А.А. Исследование экспериментальных характеристик вихревого регулятора давления// Вестник УГАТУ: научный журнал Уфимского государственного авиационного технического университета. Уфа: УГАТУ, 2006. С.13-25.
3.Ахметов Ю.М., Теницкий М.Ф., Свистунов А.В., Юнусбаев Д.И. Исследование процессов температурной стратификации в вихревой трубе методами численного моделирования// VI Всероссийская зимняя школа аспирантов и молодых ученых: сборник конференции. Уфа, 2012. С.38-46.
4. Русак А.М., Ахметов Ю.М., Пархимович А.Ю., Свистунов А.В., Соловьев А.А., Целищев В.А., Чиндина А.А. Исследование и применение вихревых технологий на кафедре ПГМ УГАТУ // Вестник УГАТУ, 2012. Т. 16, №2 (47).

УДК 629.1

Ю.М. Ахметов, Д.И. Юнусбаев, Э.И. Зангиров,
А.В. Свистунов, М.Ф. Теницкий (УГАТУ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ ДЛЯ ГРП

Существующие системы дросселирования газа и регулирования его расхода при транспортировке до потребителя предусматривают введение различных устройств (дожигание газа, подогрев от постороннего источника тепла) для компенсации снижения температуры. При давлении газа в магистральных трубопроводах равном 7,5МПа, потребителю поступает 0,103МПа, что вызывает снижение температуры не менее, чем на 25 градусов. Это вызывает

необходимость увеличения эксплуатационных и материальных затрат, а также значительное отрицательное экологическое воздействие на окружающую среду [1].

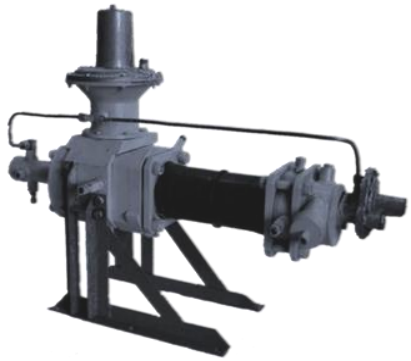


Рис. 1.
Экспериментальный образец КВРД

Исследования, проведенные в ФГБОУ ВПО УГАТУ совместно с ОАО НИИТ, позволили разработать квазиизотермический вихревой регулятор давления (КВРД) (рис.1) [2], который использует принцип температурной стратификации и позволяет при дросселировании снизить проявление эффекта Джоуля–Томпсона, что исключает необходимость использования подогревателей газа. Основанием для – изучение явления температурной стратификации в вихревых трубах. В результате анализа полученных экспериментальных данных было выдвинуто предположение о возможности получения эффекта изотермии путем смешения «горячего» и «холодного» газовых потоков. Однако неполнота теоретической базы, объясняющей процессы, приводит к необходимости детального изучения термодинамических процессов в отдельных элементах КВРД и определению влияния окружающих факторов (температуры и давления) на технические характеристики, для выдачи рекомендаций по методикам расчёта и проектирования.

Экспериментальные исследования по изучению возможности квазиизотермического дросселирования газа с помощью вихревых устройств были проведены в лаборатории «Газодинамика высоких давлений» УГАТУ [3].

Базовая схема измерений режимных параметров КВРД, при ее испытаниях, приведена на рис.2.

На КВРД был проведен цикл экспериментов на сжатом воздухе. Абсолютное входное давление в экспериментах составляло 0,14; 0,18; 0,22; 0,28; 0,34; 0,4; 0,48МПа. Выходное давление – 0,1009÷0,103МПа. Величина открытия клина – 0,5; 1,2 – 1,5; 1,87; 2мм. Величина расхода – 0÷500м^3/час. Температура воздуха на входе в регулятор в процессе экспериментов изменялась в интервале от 271,4K до 28K. На всех режимах работы, в течение времени от 30 до

100 секунд, соблюдалось постоянство расхода газа, определяемое заданными параметрами давлений газа на входе и выходе из регулятора.

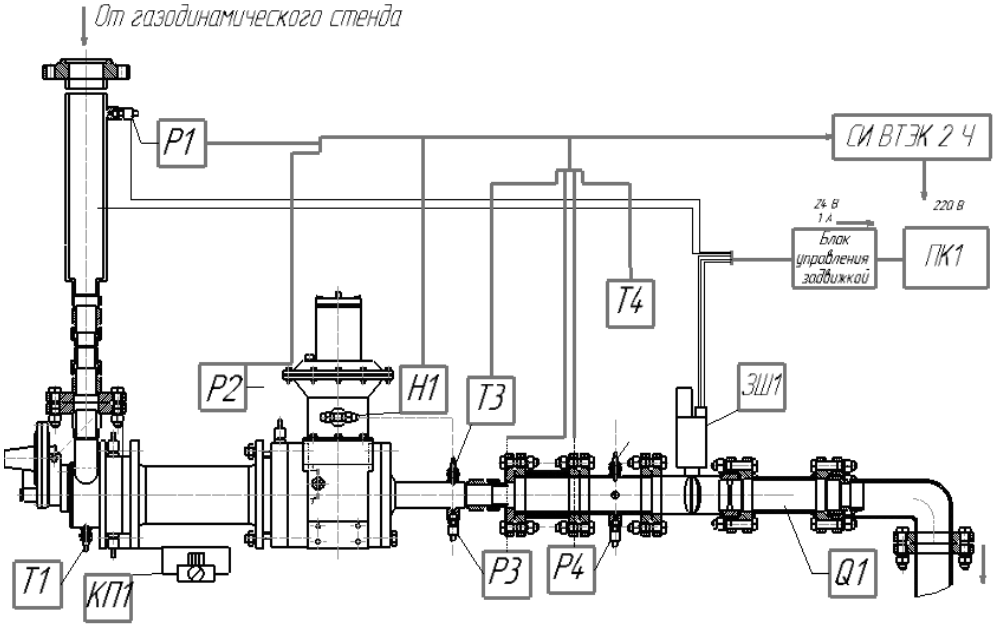


Рис. 2. Базовая схема измерений режимных параметров КВРД: *Р1…Р4 – датчики давления; Т1…Т4 – термопары; Q1 – расходомер; Н1 – датчик положения регулирующего клина; КП1 – клапан предохранительный; ЗШ1 – задвижка шиберного типа*

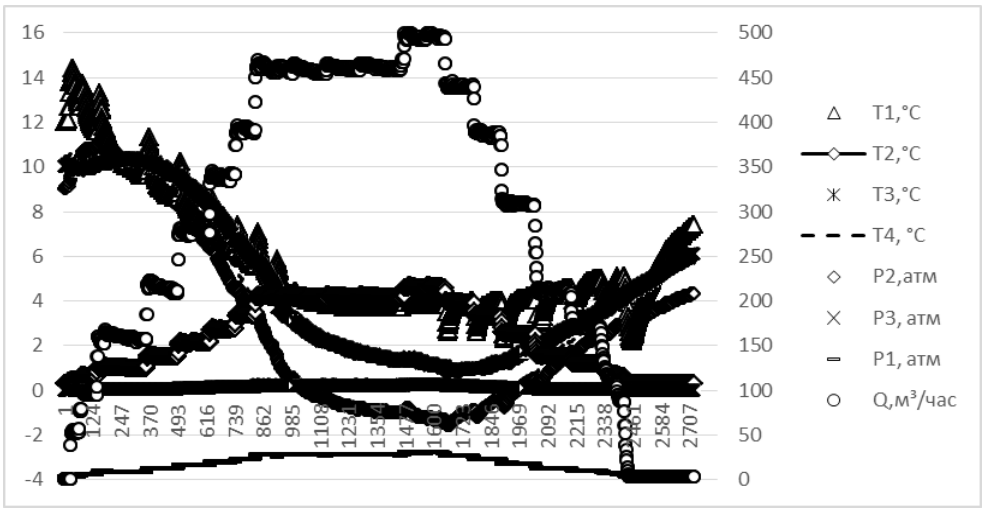


Рис. 3. Результат экспериментальных исследований

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований (рис.3) методом 3σ проводилась для каждого стационарного режима. Результат статистической обработки данным

методом обеспечивает вероятность достоверности измеренных параметров 99% в доверительном интервале.

Случайная погрешность определяется количеством измерений и имеет значение на порядок ниже приборной и по этой причине не учитывается [3].

Экспериментальные данные обрабатывались с помощью встроенных функций прикладного программного пакета *MS Excel.* Для этого массив экспериментальных данных сгруппирован по абсолютной величине входного давления на интервалы. Для каждого интервала были найдены абсолютные значения, а также диапазоны изменения входной и выходной температур.

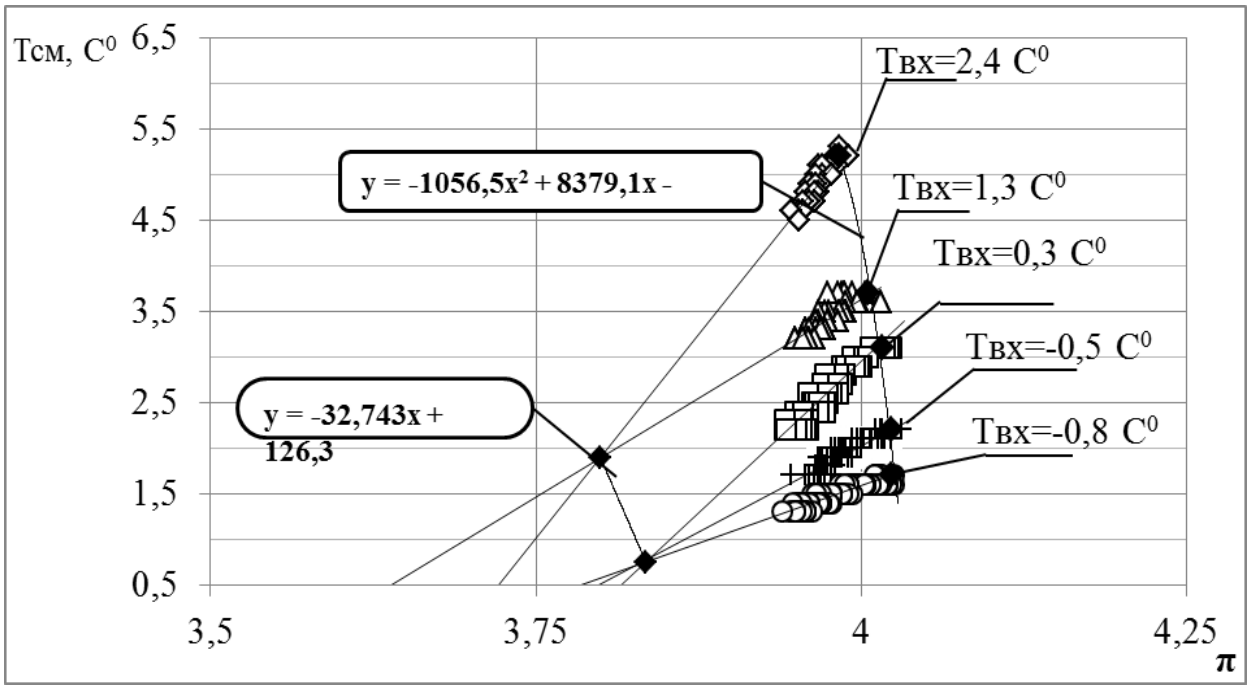


Рис. 4. Зависимость смесевой температуры газа $T_{см}$ от коэффициента расширения газа π

Зависимость смесевой температуры газа $T_{см}$ от коэффициента расширения газа π ($\pi = P_{вх} / P_{вых}$) при постоянных значениях входной температуры представлена на рис. 4.

Выполненный анализ показывает, что характер изменения температуры газа при квазиизотермическом дросселировании газа определяется как величиной π, так и непосредственным влиянием температуры газа на входе в регулятор. Аналитически зависимость

между указанными параметрами может быть представлена в виде полинома второго порядка в зависимости от $t_{см} = f(\pi)$

$$T_1 \cdot x^2 + T_2 \cdot x + A_0 = y,$$

где y – текущее значение $t_{см}$, x – текущее значение π,

T_1 и T_2 –весовые функции степенного (первого или второго порядка) взаимного влияния параметров π и $t_{см}$,

A_i – свободный член полиномов, определяемый функциональной зависимостью $A_i = f(\pi_i) = A_0 + k_{\pi-A} \cdot \pi_{тек.}$

Одним из основных факторов, определяющих характеристики пневмооборудования, является пропускная способность проточной части как дросселирующей системы (расходно–перепадная характеристика). Ранее проделанные эксперименты не давали возможность получения расходно–перепадной характеристики устройства. Главной отличительной особенностью разработанного экспериментально стенда явилось использование датчика измерения расхода газа, что позволило построить характеристику (рис.5).

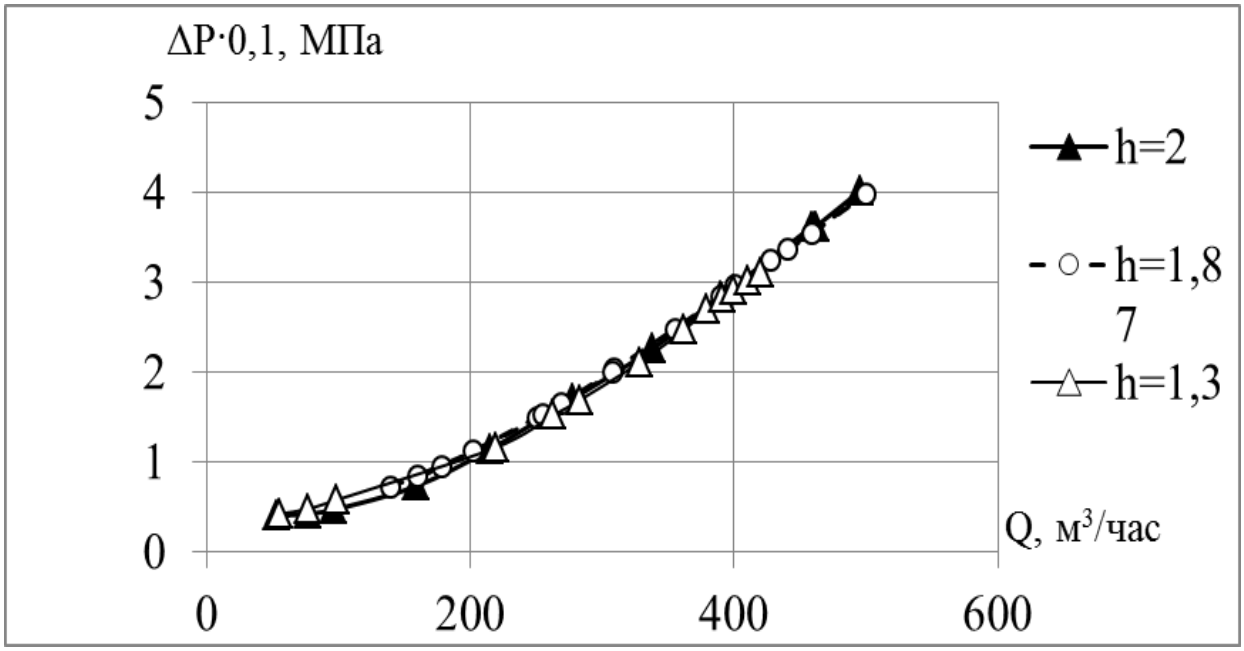


Рис. 5. Расходно – перепадная характеристика КВРД

Построена зависимость величины расхода газа Q, пройденного через регулятор, от величины изменения высоты клина h при различных значениях изменения входной и выходной температур ΔT,

которая показывает, что максимальный подогрев газа получен при высоте открытия клина равной 1.87 мм и при максимальном расходе газа (рис.6).

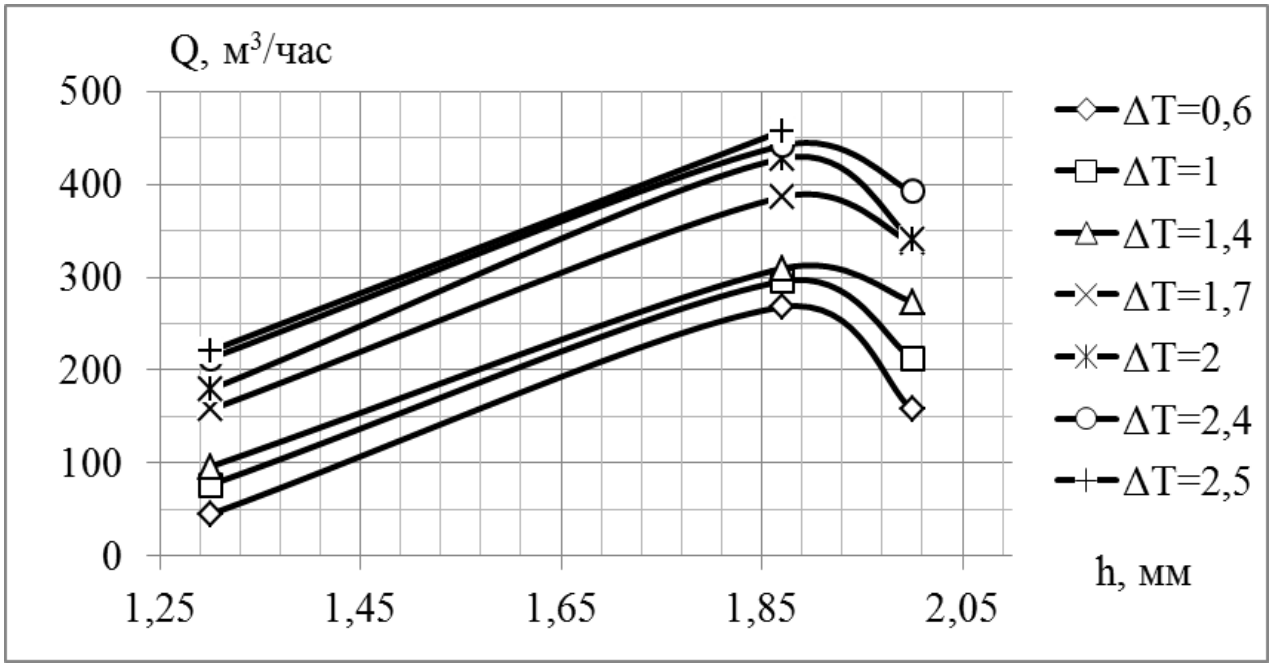


Рис. 6. Зависимость величины расхода газа от величины изменения высоты клина при различных ΔT

Зависимости выходной температуры от входной при постоянных значениях коэффициента расширения газа π представлены на рис.7.

Анализ характеристики (рис.7) показывает, что в области изменения значения π в интервале от 1,42 до 3,98 наблюдается подогрев газа.

В результате проделанной работы построена рабочая характеристика, показывающая пропускную способность проточной части как дросселирующей системы; построена эмпирическая зависимость, при которой независимо от величин коэффициента расширения и температуры на входе осуществляется постоянство значения выходной температуры; в качестве рекомендации для проектирования устройств квазиизотермического дросселирования газа показано, что необходимо обеспечить работу устройства на режимах, при которых величина расширения газа входила в диапазон

1,4÷4, и контролировать входные параметры давления газа на входе в КВРД.

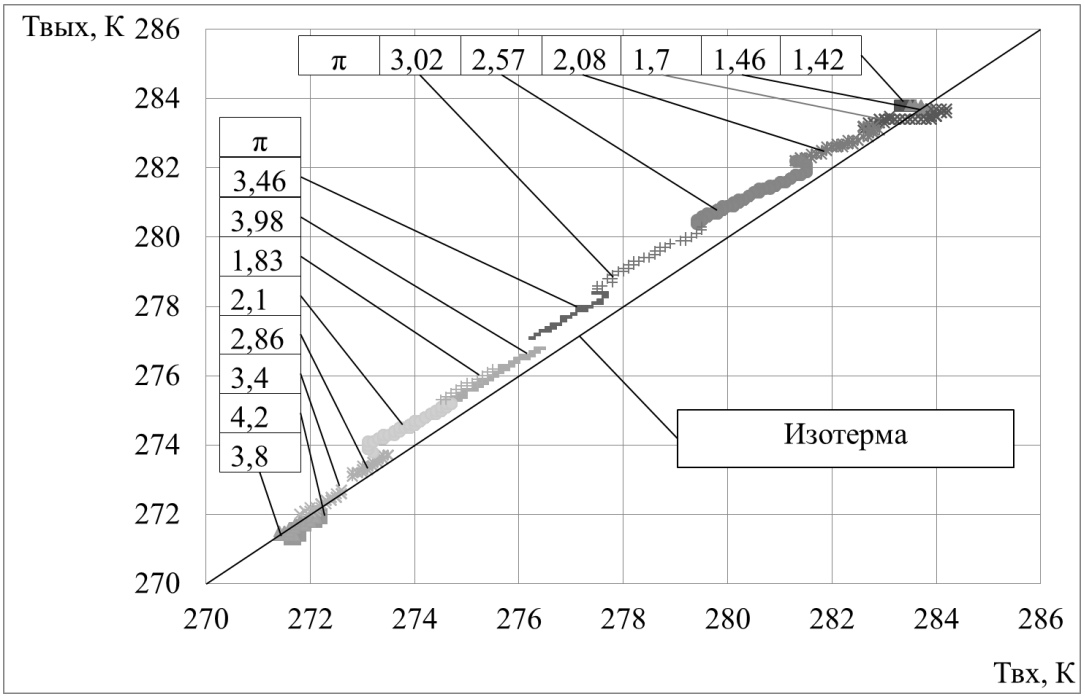


Рис. 7. Зависимость смесевой температуры газа от температуры на входе в регулятор при различных π

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакиров Ф.Г., Ахметов Ю.М., Гурин С.В., Дистанов Р.Ю. Энергосбережение при эксплуатации газотранспортнораспределительных систем за счет использования вихревых регуляторов давления газа// Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов: научно-технический журнал. 2008, №1(71). С.56-65
2. Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты): пат. № 2237918 РФ. № 2003114801/28; заявл. 19.05.2003; опубл. 10.10.2004. Бюл.№28.
3. Гурин С.В., Соловьев А.А. Исследование возможности получения изотермического процесса дросселирования в вихревом регуляторе давления газа // Вестник УГАТУ, 2006. Т. 8, №1(17). С.3-6.
4. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. С. 21, 73–86.

УДК 629.1

Ю.М.Ахметов, Э.И.Зангиров, Р.Р.Калимуллин, А.В.Свистунов, М.Ф.Теницкий, Д.И.Юнусбаев (УГАТУ)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА СМЕШЕНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ПОТОКОВ НА ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ВИХРЕВОМ РЕГУЛЯТОРЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ

Исследование термогазодинамических параметров вихревых устройств и механизмов, реализующих вихревой эффект, является основным направлением развития вихревой техники. В результате множества исследований определено, что вихревое движение обладает структурой потока. Особо важно знать вихревую структуру потока при создании и эксплуатации новых технических устройств для интенсификации особенностей вихревого эффекта в них. С целью интенсификации процессов, возникающих при вихревом движении, аппараты эксплуатируются на режимах с повышенной закруткой потока. При этом течение оказывается, как правило, нестационарным. Структура таких течений, особенно с теоретической точки зрения, изучена недостаточно.

Процесс дросселирования газа в вихревой трубе (вихревой эффект), исследуемый с 1937 года, обладает рядом особенностей. Рассмотрены и проанализированы научные труды, публикации, результаты исследований, посвященные проблемам изучения и практического применения устройств, реализующих вихревой эффект, таких ученых, как В. С. Мартыновский, В. П. Алексеев, А. П. Меркулов, А. И. Леонтьев, Ш. А. Пиралишвили, Ю. Д. Райский, Л. Е. Тункель, В. М. Бродянский, А. Д. Суслов, Р. Я. Амиров, Р. Х. Мухутдинов, М. А. Жидков, А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. А. Целищев, С. В. Гурин, А. А. Соловьев, А. Ю. Пархимович. Из зарубежных современных исследователей вихревого эффекта можно выделить Шепера (Scheper G. V.), Ван Димтера (Van Deemter J. J.), Такахама (Takahama H.) и др. Однако несмотря на интенсивное изучение этого явления в течение последних пятидесяти лет,

исследователи не пришли к единому мнению о его механизме. Гертлеровские вихри (Stephan et al.,1983), сжимаемость (Amitani et al.,1983; Д.К. Зайцев, Е.М.-Смирнов,1994), турбулентный перенос тепловой энергии (Linderstrom-Lang,1971), акустические потоки (Kurosaka,1982), перестройка вынужденного вихря в свободный (А.П.Меркулов,1969), влияние вязкостных эффектов (В.И. Кузнецов, 1989; В.А. Баранов и др.,1994) и другие механизмы предлагались как возможные механизмы реализации эффекта энергоразделения в вихревых трубах.

На современном этапе изучения закрученных потоков исследователи пришли к выводу о том, что основную роль в них играют трехмерные вихревые структуры винтовой формы (С.В. Алексеенко, В.Л. Окулов,1996). А. Гупта с соавторами (1987) указывают на значительное влияние прецессии вихревого ядра на процесс энергоразделения. При изучении динамики течения в вихревой трубе Н.А. Артамонов, Б.Ф. Абросимов и М.З. Максименко (1987) сделали важное наблюдение о винтовой структуре потока в трубе Ранка. С.В. Лукачевым (1981) было дано объяснение регулярных пульсаций потока (типа прецессии) в вихревых трубах как следствие возникновения крупномасштабных вихревых структур. В своей последующей работе он предложил гипотезу о возможности существования двойных и тройных вихревых образований на основе анализа сдвига фаз между пульсациями давления, измеренными в двух диаметрально противоположных точках вихревой трубы (С.В. Лукачев, 1984). Развитие этих представлений было продолжено в работе Ю.А. Кныша (1988). Однако возникновение вихревых структур в вихревых трубах оба исследователя связывают не с неустойчивостью интенсивно закрученных потоков, а с неустойчивостью типа контактного разрыва на поверхности раздела периферийного подогретого газа и центрального холодного ядра потока. В связи с этим базовыми вихревыми структурами они считают вихревые кольца в виде тора, которые в реальном несимметричном потоке деформируются и сворачиваются в спиральные вихревые структуры. Точное представление о винтообразной форме вихревой структуры, образующейся в результате неустойчивости потока, в указанных работах отсутствует. Вместе с тем при исследовании структуры потока в другом аппарате

(вихревом генераторе звука) С.В. Лукачев (1988) связывает образование прецессирующего винтового вихря с распадом вихря. Наконец, явное подтверждение наличия винтообразных винтовых структур в вихревой трубе получено с помощью специальных методов визуализации в работе В.А. Арбузова с соавторами (1997) [1].

Попытки визуализации вихревых течений по результатам численного эксперимента, предпринятые некоторыми авторами [2], показывают качественно непротиворечивую картину, но не отражают специфику движения потоков и характер их взаимодействия.

С целью определения влияния характера смешения стратифицированных потоков газа на протекание процессов в камере энергетического разделения была разработана твердотельная модель квазиизотермического вихревого регулятора давления газов (КВРД) с внешним смешением газа (рис.1) и осуществлено численное моделирование термогазодинамических процессов в ней. Численное моделирование было выполнено в пакете прикладных программ вычислительной гидродинамики *Flow Simulation 2012* производства компании *SolidWorks*, предусматривающем решение полной системы уравнений в тензорном виде [3].

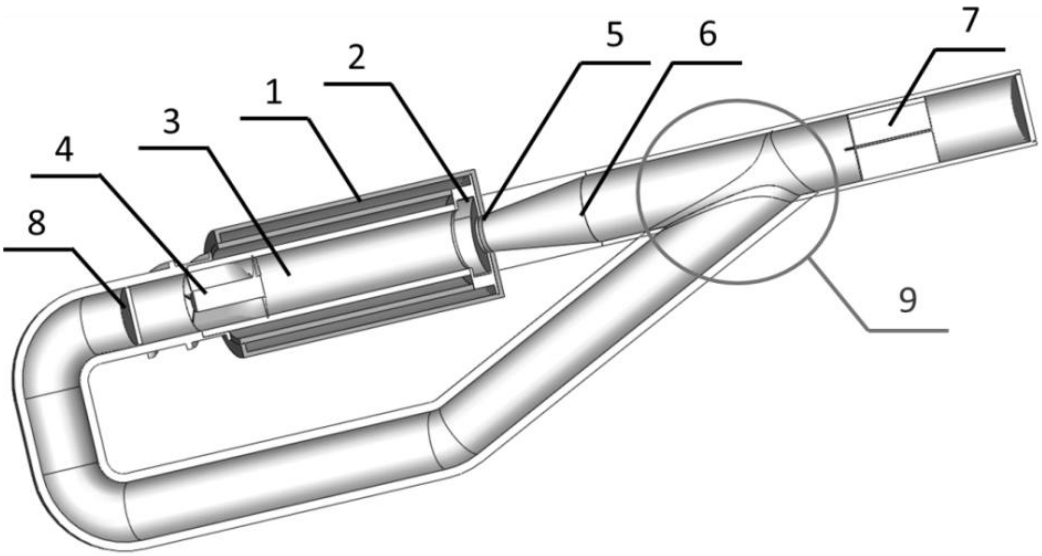


Рис.1. Трехмерная твердотельная модель квазиизотермического вихревого регулятора давления с внешним смешением: *1 – корпус, 2 – закручивающее устройство, 3 – камера энергетического разделения, 4 – устройства торможения, 5 – диафрагма, 6 – диффузор, 7 – крестовина, 8 – щелевая диафрагма, 9 – узел смешения потоков*

Система уравнений математической модели, решаемая аппаратом программного комплекса *Flow Simulation*, после расстановки граничных и начальных условий включает в себя:

- уравнение неразрывности

$$\left(\rho u^{j}\right)_{,j} = 0, \qquad (1)$$

- уравнения движения

$$\rho u^{j} u^{i}{}_{,j} = \left(2\mu e^{ij} - \frac{2}{3}\mu u^{k}{}_{,k} g^{ij} - p g^{ij}\right)_{,j}, \qquad (2)$$

- уравнение энергии

$$\rho c_p u^{j} \frac{\partial T}{\partial x^{j}} = u^{j} \frac{\partial p}{\partial x^{j}} + g^{ij}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x^{j}}\right)_{,j} + 2\mu e^{ij} - \frac{2}{3}\left(u^{j}{}_{,j}\right)^{2} \quad . \qquad (3)$$

Верхние индексы обозначают контравариантные, а нижние – ковариантные составляющие соответствующих тензоров; индекс «запятая» внизу обозначает ″делать ковариантное дифференцирование по соответствующей координате″; e^{ij}– контравариантные составляющие тензора скоростей деформации, которые равны

$$e^{ij} = \frac{1}{2}\left(g^{ik} u^{j}_{,k} + g^{jk} u^{j}_{,k}\right), \qquad (4)$$

где g^{ik}–контравариантные составляющие метрического тензора;

μ–коэффициент вязкости; λ–коэффициент теплопроводности; c_p– коэффициент удельной теплоемкости при постоянном давлении; ρ – плотность; u^{j}–контравариантная составляющая вектора скорости;

T– температура; *p* – давление.

В решении данной задачи используется квазистационарная полуэмпирическая *k* – ε – модель турбулентности.

Касательные напряжения для вязкой ньютоновской жидкости определяются в данной модели следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\cdot\delta_{ij}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}. \qquad (5)$$

Для замыкания системы уравнений применяются уравнения переноса турбулентной кинетической энергии и уровня ее диссипации согласно k – ε – модели

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k}{\varepsilon}, \quad (6)$$

уравнение турбулентной кинетической энергии (k)

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k}((\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_k}) + \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon, \quad (7)$$

уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии (ε)

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k}((\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}) + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k} f_1 \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho\varepsilon^2}{k}. \quad (8)$$

В существующих моделях вихревых течений для описания состояния газа используется уравнение идеального газа Менделеева–Клапейрона. Такое допущение корректно лишь для узкого диапазона параметров течения газа в вихревой трубе. Это связано со свойством сжимаемости реальных газов, которое не описывается уравнением состояния идеального газа.

Уравнения состояния Ван-дер-Ваальса и Редлиха–Квонга были выбраны как уравнения для широкого диапазона изменения параметров состояния газа

$$\left(p + \frac{a}{\upsilon^2}\right) \cdot (\upsilon - b) = R \cdot T, \quad (9)$$

где a, b–константы, характеризующие величину сил притяжения молекул и величину сил отталкивания соответственно, определяемые значениями критических параметров газа

$$a = 3 \cdot p_{kr} \cdot \upsilon_{kr}^2, \quad b = \frac{R \cdot T_{kr}}{8 \cdot p_{\text{kr}}}.$$

Уравнение состояния Редлиха–Квонга выглядит следующим образом:

$$p = \frac{R \cdot T}{\upsilon - b} - \frac{a}{(\upsilon + b) \cdot \upsilon \cdot \sqrt{T}}, \quad (10)$$

$$a = \frac{0.42748 \cdot R^2 \cdot T_{\text{kr}}^{2.5}}{p_{\text{kr}}}, \quad b = \frac{0.08662 \cdot R \cdot T_{\text{kr}}}{p_{\text{kr}}}$$

Для описания термогазодинамических характеристик турбулентных течений в квазистационарной постановке уравнения математической модели из классической формы преобразуются методом Рейнольдса и записываются в тензорном виде.

Систему уравнений движения среды при численных расчетах турбулентных течений дополнили моделями турбулентности, позволяющими рассчитать значения турбулентных добавок, входящих в эти уравнения [4].

Визуализация результатов численного моделирования течения газа в КВРД с внешним смешением при помощи линий тока, спроецированных на плоскость симметрии камеры энергетического разделения (рис.2), показывает наличие замкнутых циркуляционных зон между центральным и периферийным потоками. Поле проекций полных скоростей потока, представленное на рис.3, демонстрирует неоднородность характера течения газа и наличие зон заторможенного потока в центральной части вихревой трубы (примерно 90 м/с).

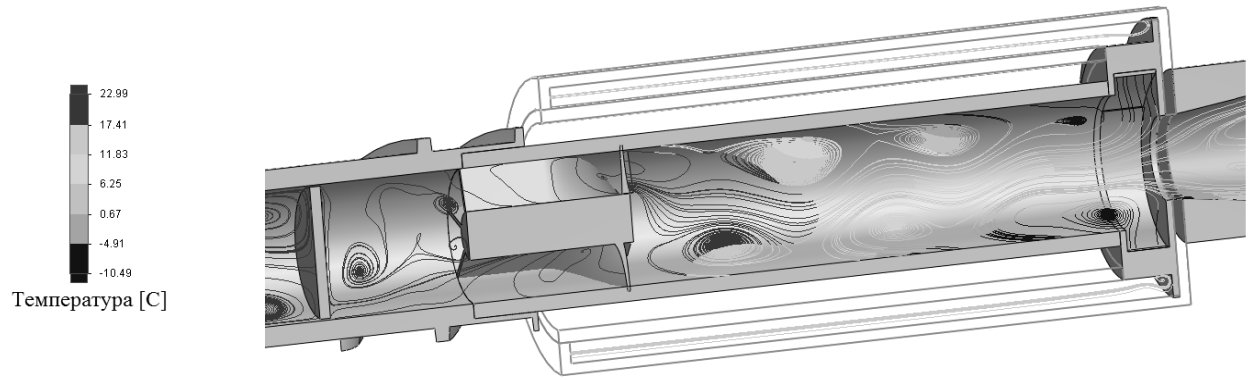


Рис.2. Проекция линий тока на плоскость симметрии камеры энергетического разделения

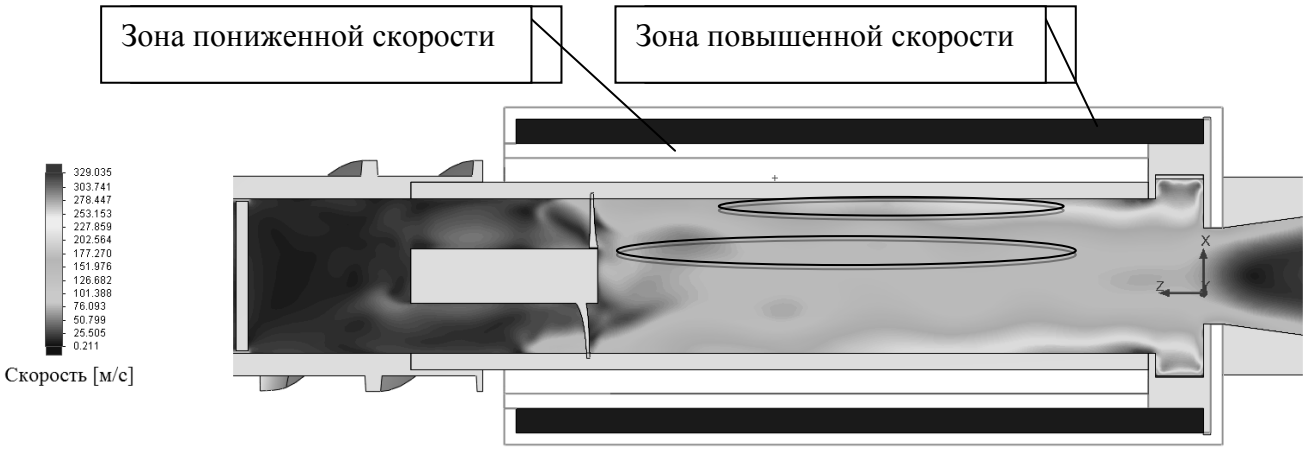


Рис.3. Поле полных скоростей потока

Анализ полученных структур потока позволил их разделить на крупномасштабную структуру центрального потока (осевую) и крупномасштабную вихревую структуру периферийного потока (КВС) (рис.4), что подтверждается результатами визуализации течений в вихревых трубах, представленных на рис.5 и рис.6.

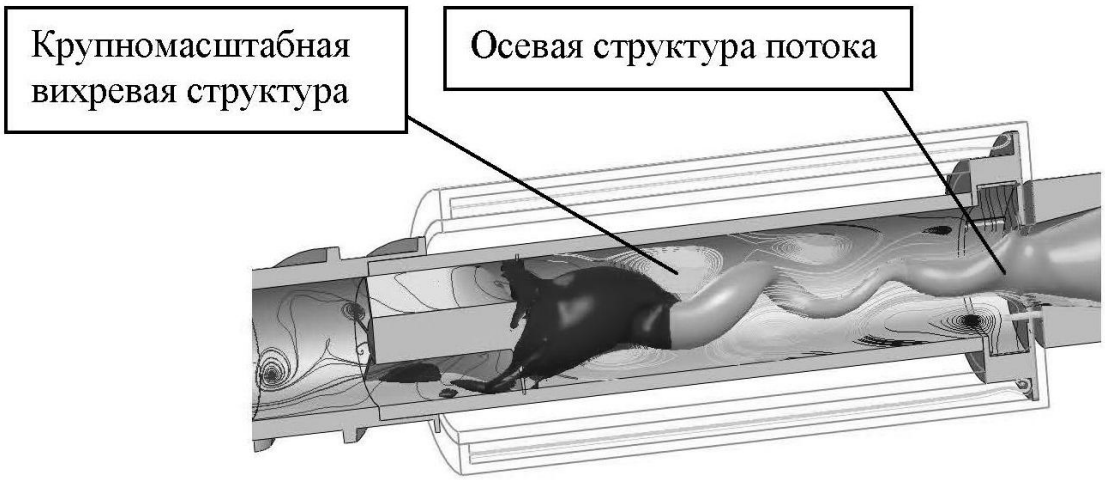


Рис.4. Пространственная конфигурация крупномасштабной структуры центрального потока (осевой) и крупномасштабной вихревой структуры периферийного потока (КВС), полученная в результате прямого численного моделирования

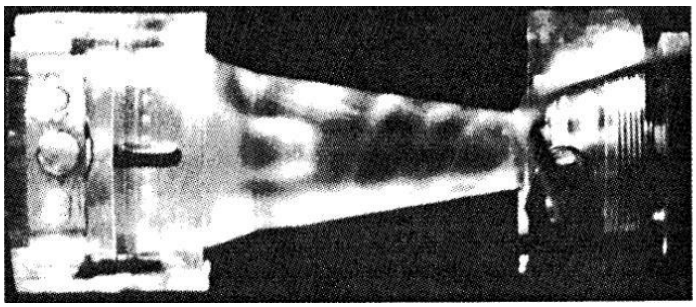


Рис.5. Шлирен-снимок крупномасштабных вихревых жгутов в камере энергетического разделения трубы Ранка-Хилша [5]

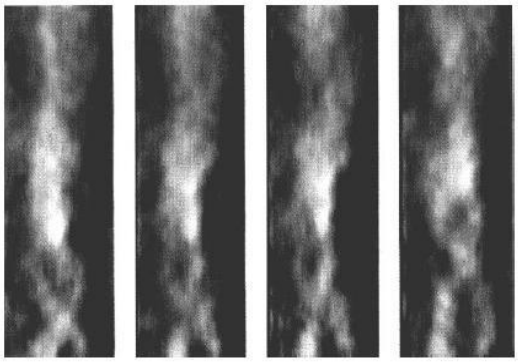


Рис.6. Визуализация крупномасштабных вихревых структур в двухсопловой вихревой трубе методом биохроматической фильтрации Гильберта в виде двойной спирали со временем экспозиции

Исследование характера движения полученных структур позволило выявить следующие особенности: КВС имеет закрутку относительно собственной оси, находящейся в «центре» структуры; ось КВС не имеет закрутки, имеет форму спирали и движется вдоль оси вихревой трубы в направлении от тангенциального закручивающего устройства в сторону камеры энергетического разделения; осевой поток имеет закрутку относительно собственной оси и движется вдоль нее в сторону, противоположную движению КВС, ось имеет форму спирали (рис.7).

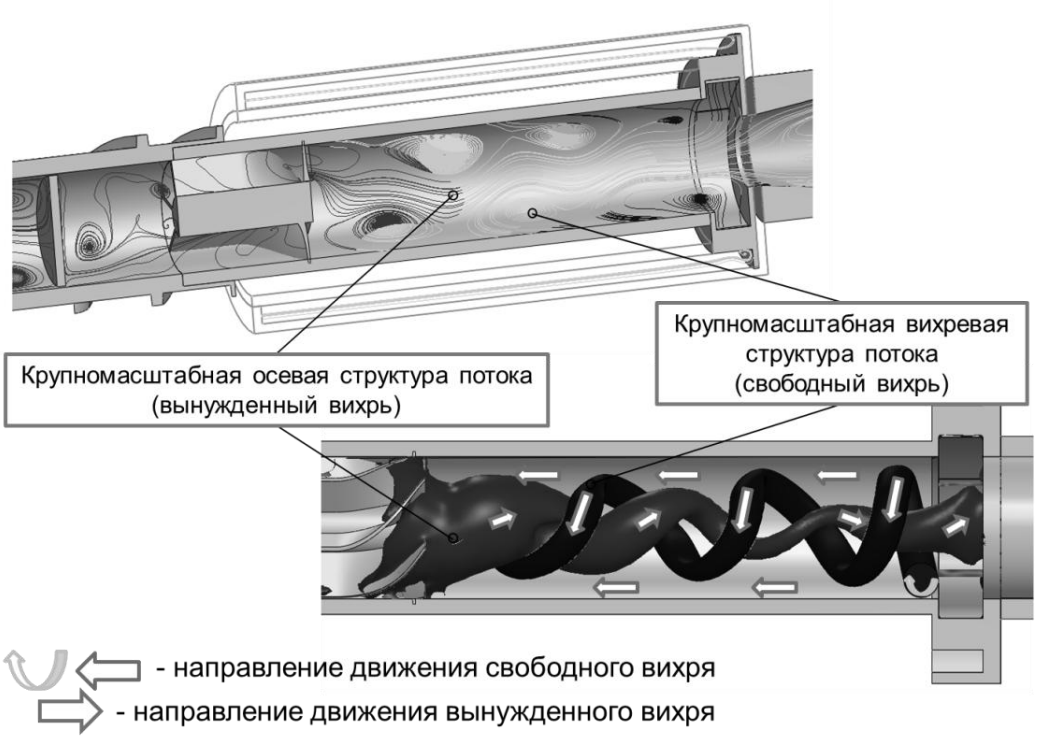


Рис. 7. Схема закрутки потоков в структуре движущегося потока в камере энергетического разделения КВРД с внешним смешением

Моделирование течения газа по тракту камеры энергетического разделения КВРД с внешним смешением позволило получить массив данных и построить линии тока движения газа. Анализ визуализации экспериментальных данных позволил выявить крупномасштабную вихревую и приосевую структуры потока газа.

Методом численного моделирования были исследованы скорости потока газа в КВРД с внешним смешением, что позволило выдвинуть гипотезу о характере движения газа. Согласно

предлагаемой гипотезе в КВРД в потоке газа можно выделить две структуры: осевую (вынужденный вихрь) и крупномасштабную (свободный вихрь). После прохождения потока газа через закручивающее устройство КВРД с внешним смешением поток образует крупномасштабную вихревую структуру, которая представляет собой спираль и имеет собственную ось вращения. Частицы потока движутся вдоль оси КВС в направлении от закручивающего устройства в сторону камеры энергетического разделения. Помимо этого, КВС совершает вращательное движение относительно оси вихревой трубы. По мере движения КВС по камере энергетического разделения, образуется спиралевидный осевой поток, ось которого закручена относительно оси камеры энергетического разделения КВРД. Частицы осевого потока движутся в сторону, противоположную движению частиц КВС.

В дальнейшем планируется определение характера взаимодействия рассчитанных крупномасштабных вихревых структур свободного и вынужденного характера образования с различными функциональными зависимостями $V_{окр} = f(R_{окр})$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куйбин П.А. Исследование динамики и неустойчивости отрывных течений и следов: дисс. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИТ СО РАН, 1993. 140 с.
2. Linderstrom-Lang CU. The three-dimensional distributions of tangential velocity and total-temperature in vortex tubes. J Fluid Mech, 1971.45.
3. Ахметов Ю.М. и др. Численное моделирование стратификации газа в камере энергетического разделения вихревой трубы// Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение: сборник научных трудов VIII Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2013. С.107-111.
4. Ахметов Ю. М. и др. Исследование влияния тормозного устройства на структуру потока и параметры изотермического вихревого регулятора давления// Вестник УГАТУ. 2011. Т.15, № 4 (44). С. 149-153.
5. Пиралишвили Ш.А. и др. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М: Энергомаш, 2000. 415с.
6. Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Яворский Н.И. и др. Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка // Письма в ЖТФ, 1997.Т.23, №23.

УДК 629.1

Ю.М.Ахметов, Э.И.Зангиров, Р.Р. Калимуллин, А.И.Латыпов, Н.В.Шестерякова (УГАТУ)

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В ВИХРЕВОМ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ

В настоящее время нельзя назвать область человеческой деятельности, в которой в той или иной степени не использовались бы методы моделирования [1]. Особенно это относится к сфере управления различными системами, где основными являются процессы принятия решений на основе получаемой информации.

В основе моделирования стоит теория подобия, которая утверждает, что абсолютное подобие может иметь место лишь при замене объекта другим, точно таким же [2]. При моделировании абсолютное подобие не имеет места и стремятся к тому, чтобы хорошо воспроизвести исследуемую сторону функционирования объекта. Классификация видов моделирования представлена на рис.1.

Моделирование является частью такого большого процесса как проектирование, связанное с инженерной деятельностью, направленной на создание новых объектов, методов, теорий [1]. Однако это не только создание идеи построения объекта, но и обоснование способа его реализации, разработка модели объекта с учетом последствий, к которым приведет его создание, использование либо снятие с производства.

Необходимость использования метода моделирования определяется тем, что многие объекты непосредственно исследовать или вовсе невозможно, или же это исследование требует много затрат и времени.

Процесс моделирования включает три элемента: объект исследования; субъект (исследователь); модель, опосредствующую отношения познающего субъекта и познаваемого объекта.

Моделирование – циклический процесс. Это значит, что за первым четырехэтапным циклом может последовать второй, третий, четвертый и т.д. При этом знания об исследуемом объекте

расширяются и уточняются, а исходная модель постепенно совершенствуется. Недостатки, обнаруженные после первого цикла моделирования, обусловленные небольшим знанием объекта и ошибками в построении модели, можно исправить в последующих циклах.

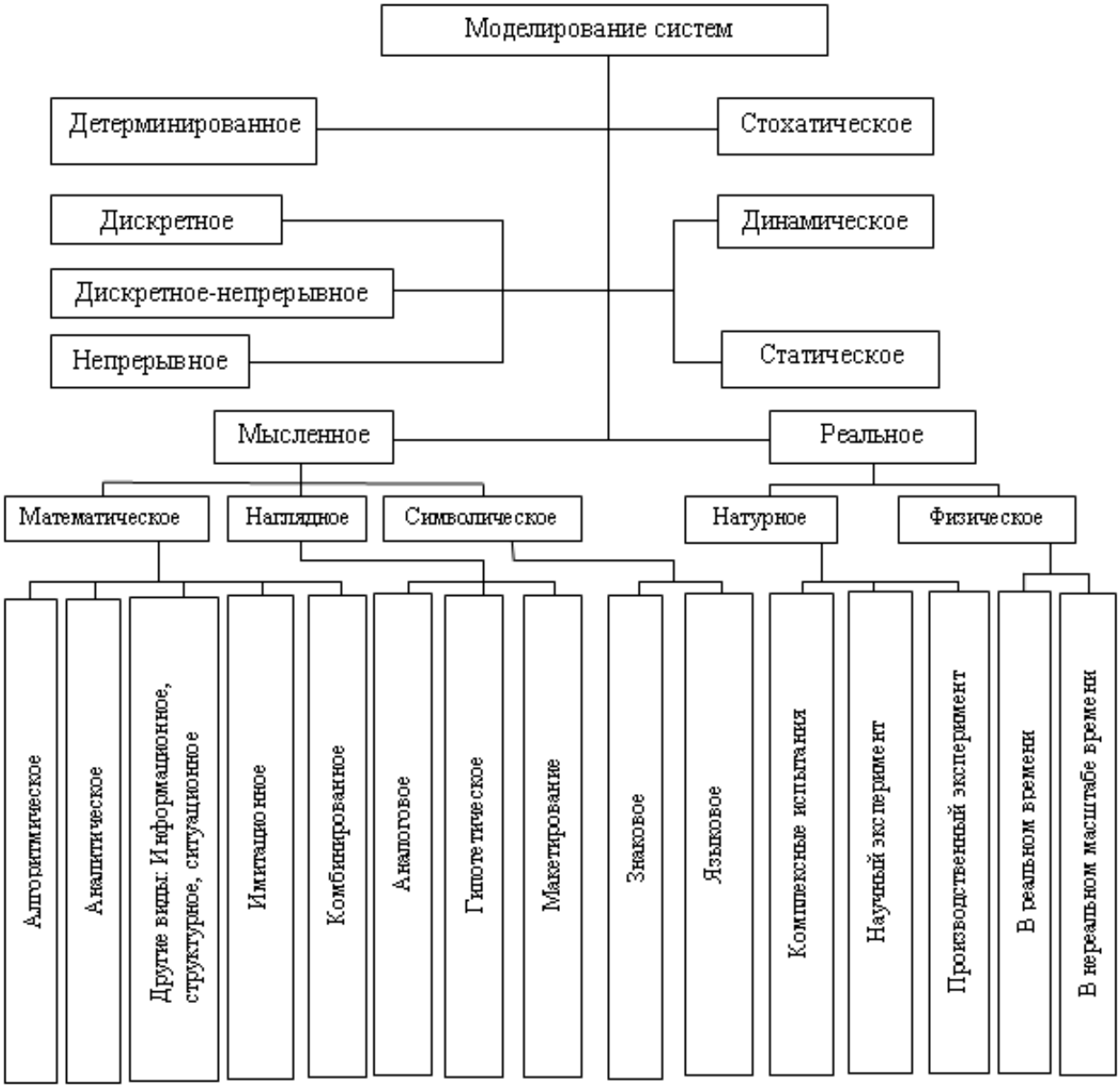


Рис.1. Виды моделирования систем

Гидравлическая или гидромеханическая системы, как любая комбинированная система, характеризуется относительно крупным числом величин, которые принято делить на параметры состояния, т.е. переменные, зависящие от времени, и параметры,

характеризующие физические свойства и условия работы [3]. Часть переменных первого вида, описывающих внешние воздействия на систему и воздействия элементов друг на друга, можно рассматривать как входные, а остальные – как выходные сигналы, которые наблюдаются при анализе системы, и внутренние переменные, которые в зависимости от принятой формы модели либо сохраняются, либо исключаются из модели.

Моделирование гидромеханических устройств имеет ряд специфических особенностей, одна из которых заключается в тесной связи между принципиальной схемой и конструкцией [1]. Переход от математической формулы к реальной конструкции – достаточно сложный процесс. Далеко не все желаемые функции могут быть воплощены в реальную конструкцию при современном уровне развития техники и технологии. Требования к автоматике обычно противоречивы: с одной стороны, нужно получить высокую точность и надежность, с другой – необходимо иметь малые массу и габариты. Любое конструктивное решение, как правило, является компромиссным.

Сложность математического моделирования гидромеханических устройств обусловлена сложностью протекающих в них процессов, многообразием и противоречивостью требований. Для систем подобного типа особое значение имеют линейные аналитические методы, которые позволяют относительно просто выполнять анализ и синтез систем.

При построении моделей процессов в стационарном состоянии, переменные уравнений их математического описания не зависят от времени, а для динамических моделей, описывающих нестационарные режимы процессов, переменные уравнений математического описания являются функциями времени, и динамический процесс описывается системами дифференциальных уравнений.

Машинная имитация – это эксперимент, проводимый с помощью вычислительной техники, но не на реальном объекте, а на его модели, описывающей поведение изучаемой системы в течение определенного отрезка времени с введением, в случае необходимости, изменений в значение параметров, структуру и взаимосвязь. При этом модель объекта не обязательно должна быть

записана в виде математических уравнений – она может быть словесным описанием операций, производимых над набором чисел вместе со значениями этих чисел. Эти модели дают алгоритм, то есть последовательность операций, осуществление которых приводит к искомому конкретному решению. Другими словами, алгоритмические методы дают не столько решение, сколько способ его нахождения, что существенно расширяет их возможности по сравнению с аналитическими методами.

К методам машинной имитации можно отнести два наиболее основных вида моделирования – это алгоритмическое и имитационное моделирование.

При имитационном моделировании алгоритм, реализующий модель, воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состоянии процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы.

Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим моделированием является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и др., которые часто создают трудности при аналитических исследованиях.

В общем случае для любых гидромеханических устройств можно выделить три последовательных этапа численного моделирования: построение модели процесса; обеспечение её достоверности; реализация процесса моделирования.

Следует отметить основные преимущества компьютерного моделирования:

1. Поведение системы можно наблюдать при самых различных условиях.
2. Можно изучить поведение системы в таких гипотетических условиях, которые в настоящее время вряд ли могут реально иметь место.

3. Путём исследования модели можно предсказать, как поведёт себя реальная система при натурных испытаниях.
4. Всесторонние испытания системы можно выполнить за сравнительно короткий промежуток времени.
5. По данным испытаний можно сделать некоторые умозаключения относительно системы, которую ещё предстоит синтезировать.
6. Результаты моделирования можно получить с гораздо меньшими затратами, чем при натурном моделировании.
7. Компьютерное моделирование часто является единственным или безопасным методом анализа системы.

Моделирование течения двухфазной жидкости в вихревом теплогенераторе состоит из трех этапов. Методика содержит инженерный расчет тепла на отопление потребителей, математическую модель течения двухфазной жидкости, методику проведения численного моделирования, методику проведения физического моделирования, методику верификации результатов численного моделирования на основе результатов экспериментального исследования.

На рис.2 представлена блок-схема методики моделирования.

На первом этапе проводится ряд расчетов, к которым можно отнести:

− систематизированность исходных данных;
− расчёт максимального часового расхода тепла на отопление природного газа

$$Q_{\text{ОТ}} = a \cdot V_3 \cdot q_0 \cdot (t_j - t_0), \qquad (1)$$

где V_3 – объем здания, м^3; q_0 – удельная тепловая характеристика здания, ккал/час·м³·ºС; a – поправочный коэффициент на изменение величины отопительной характеристики зданий при температуре, отличной от -30ºС; t_j – расчетная температура в отапливаемом здании, ºС; t_0 – расчетная температура наружного воздуха, ºС;

− расчёт тепловой производительности вихревого теплогенератора;
− расчёт потребляемой энергии из сети;
− расчет нагрева рабочей жидкости в центробежном насосе;
− разработка структурной схемы вихревого теплогенератора;
− разработка феноменологической модели течения жидкости в вихревом теплогенераторе;

Под феноменологической моделью понимают комплекс способов для описания физики процессов, учитывающих:

- *характер физических процессов с комплексом допущений и условий, принимаемых для моделирования;*
- *функциональное представление взаимосвязей параметров при поэлементном представлении отдельных узлов, составляющих полное конструктивное наполнение исследуемого объекта.*

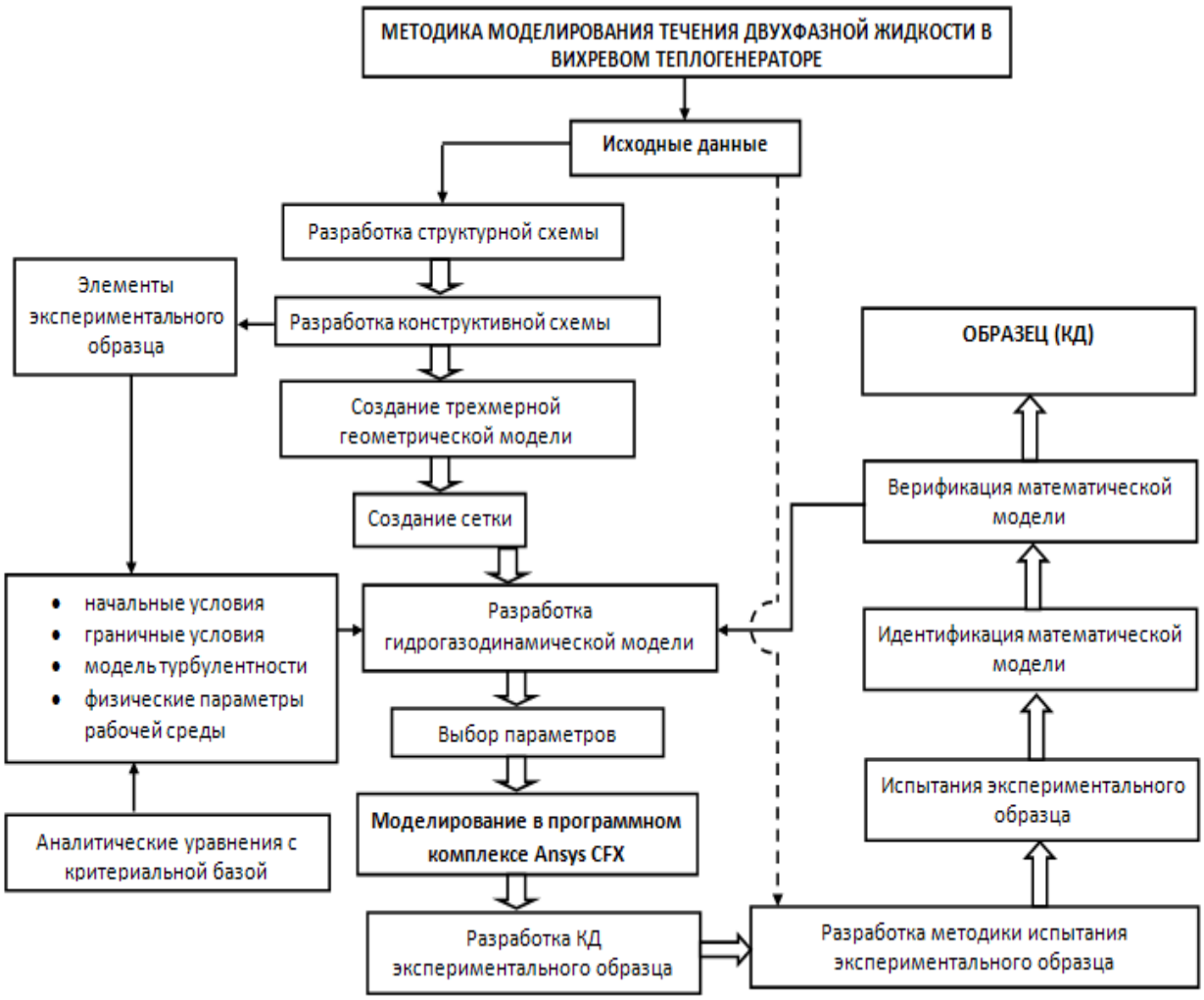


Рис.2. Блок-схема методики моделирования течения двухфазной жидкости в вихревом теплогенераторе (ВТГ)

Феноменологическая модель описывает объект в широком диапазоне влияющих факторов. Использование такой модели дает представление о физике процесса, предоставляет широкие

прогностические возможности. Основные допущения модели течения жидкости в вихревом теплогенераторе:

- *температура жидкости ниже температуры кипения;*
- *сплошность жидкости нарушена присутствием микронеоднородностей – кавитационных зародышей;*
- *в качестве модели кавитационного зародыша рассматривают модель «свободного» зародыша, то есть сферический пузырек радиуса R_n, наполненный насыщенным паром, давление которого P_v, свободно перемещающийся в жидкости;*
- *при расчете гидравлических потерь областью обратных токов пренебрегают;*
- *не учитывают потери при трении потоков и трении витков между собой;*
- *принимают, что в вихревом теплогенераторе существует два вида потоков: основной поток, направленный вдоль стенок вихревой трубы в сторону выходного отверстия, и осевой поток;*
- *за положительное направление движения принимается движение объема жидкости из рассматриваемого объема;*
- *координата z направлена вертикально вниз, т.е. по направлению силы тяжести объема жидкости.*

Функциональная схема процессов в вихревом теплогенераторе представлена на рис.3.

− разработка конструктивной схемы ВТГ.

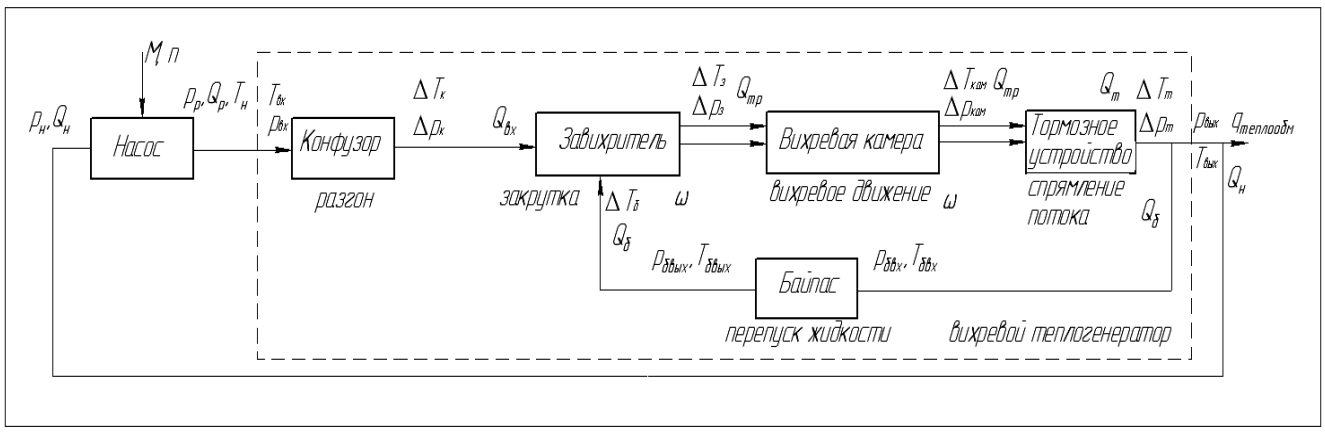


Рис.3. Функциональная схема процессов в контуре вихревого теплогенератора

− разработка твердотельной модели вихревого теплогенератора для последующего численного моделирования гидродинамических процессов.

На втором этапе производится численное моделирование течения двухфазной жидкости в вихревом теплогенераторе:

− построение расчетной области;

− подбор начальных и граничных условий, физических параметров рабочей среды по аналитическим уравнениям и расчетам, проведенным в первом этапе моделирования;

− выбор модели турбулентности;

− проведение численного моделирования на профессиональном аналитическом *CFD*-комплексе *Ansys CFX* для решения широкого спектра термо-гидрогазодинамических задач;

− выбор модели кавитационного массопереноса.

Этапы численного моделирования в *Ansys CFX* представлены на рис.4.

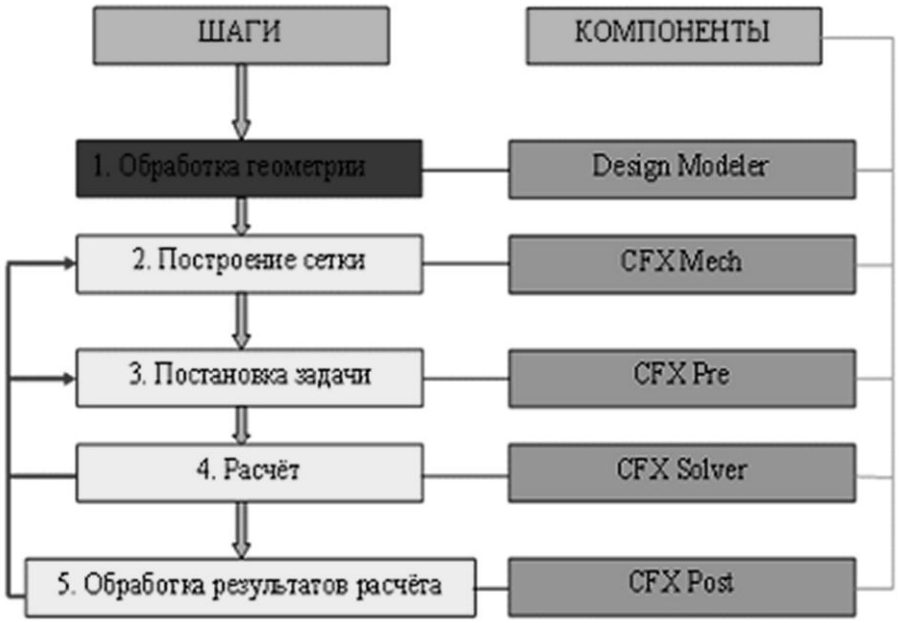


Рис.4. Этапы численного моделирования

В современные пакеты вычислительной гидрогазодинамики (*Star-CD, Ansys CFX, Ansys Fluent*) включено множество математических моделей, в том числе и модели кавитации.

При моделировании кавитации следует выделять два понятия: модель кавитации и модель кавитационного массопереноса. Модель кавитации – это совокупность уравнений, описывающих кавитирующий поток и массоперенос в нём. Модель кавитационного массопереноса – это модель механизма переноса массы при фазовом переходе или выделения газа при кавитации.

Численные модели кавитации можно поделить на три группы: «Условные», «Массовые», «Эйлера».

Модели «Условные» используют для расчёта кавитации кавитационное число [4]

$$K = \frac{p - p_{кр}}{\frac{\rho v^2}{2}}, \qquad (2)$$

где p – давление в ячейке, $p_{кр}$ – критическое давление, при котором возникает кавитация, обычно – давление насыщенных паров; v – скорость потока в ячейке, ρ – плотность жидкости.

«Условные» модели делятся на два вида в зависимости от условия применения: по значению кавитационного числа, по давлению насыщенных паров и местной скорости потока. Массоперенос в этом классе моделей не считается. При верном условии ячейка заполняется паром или исключается из расчёта. Достоинства: быстрота получения решения. Недостатки: качество сетки влияет на точность полученного решения, сложность в задании кавитационного числа. Используются при начальных инженерных расчётах, в предположении, что кавитация начнётся при заданном кавитационном числе. Не отменяет необходимость эксперимента по выяснению точного значения кавитационного числа.

Модели «Массовые» отличаются от моделей «Условных» рассчитываемым кавитационным массопереносом в зависимости от величины абсолютного давления, вычисленной решателем. Включение модели кавитационного массопереноса происходит при достижении уровня давления насыщенных паров жидкости или величины давления, указываемой пользователем. Основное отличие от «Условных» моделей – расчёт величины массовой доли образовавшегося и сконденсировавшегося пара. Достоинства «массовых» моделей: способность моделировать кипение и кавитацию в низкоскоростных потоках жидкости, относительно

небольшое время расчёта. Недостатки: некачественное моделирование кавитации в высокоскоростных потоках жидкости. Модели используются для определения зон кавитации в лопастных машинах, моделирования кипения жидкости и пузырьковой кавитации. Для численного моделирования кавитации нет необходимости в проведении эксперимента с целью определения кавитационного числа. Данные модели присутствуют в *Ansys Fluent* [4].

Модели «Эйлера» позволяют рассчитать характеристики пара и жидкости за счёт добавления уравнений импульса для фазы пар. Достоинства: возможность моделирования гидродинамической кавитации в медленных и высокоскоростных потоках жидкости, развитой кавитации, нестационарных течений. К недостаткам моделей «Эйлера» следует отнести длительность расчета. Данные модели используются для моделирования кавитации в гидрооборудовании и быстроходных центробежных насосах. Также возможно моделирование кавитации в вихревых трубах с подключением термодинамических соотношений. Модели данного типа присутствуют в *Ansys Fluent* и *Ansys CFX* [4].

Моделирование кавитационного потока в моделях кавитации основывается на фундаментальных законах механики жидкости и газов – уравнении неразрывности, уравнении импульса, законе изменения турбулентной вязкости от скорости (модель турбулентности).

При численном моделировании кавитации на первый план выходит модель кавитационного массопереноса, назначение которой заключается в расчёте массы выделившегося и сконденсировавшегося пара.

Для расчёта массы выделившегося и сконденсировавшегося пара необходимо учитывать динамику кавитационного пузырька. Для этого используется уравнение Релея-Плессета [4]

$$R\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{3}{2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2+\frac{2\sigma}{\rho R}=\frac{p_н-p}{\rho}. \qquad (3)$$

Поскольку решить данное уравнение в общем виде невозможно, его упрощают, пренебрегая вторым порядком и не учитывая

поверхностное натяжение жидкости. В этом случае уравнение динамики пузырька примет вид [4]

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}(\frac{p_н - p}{\rho})}. \quad (4)$$

На основании упрощенного уравнения динамики кавитационного пузырька созданы три модели массопереноса: модель Singhal, модель Zwart-Gerber-Belamri, модель Schnerr – Sauer [4].

Модель Singhal является самой ранней моделью межфазного переноса и представляет собой следующие уравнения [4]:

$$\begin{aligned} & p < p_н, \\ & m_e = F_{vap} \frac{\max(1,\sqrt{k})(1 - f_v - f_g)}{\sigma} \rho_l \rho_{vap} \sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_н - p}{\rho_l}}, \\ & p > p_н, \\ & m_c = F_{cond} \frac{\max(1,\sqrt{k})(f_v)}{\sigma} \rho_l \rho_{vap} \sqrt{\frac{2}{3}\frac{p - p_н}{\rho_l}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где f_v–массовая доля пара; f_g – массовая прочих (неконденсируемых) газов в жидкости; m_e – масса выделившегося пара; m_c – масса сконденсированого пара; Г – коэффициент диффузии жидкости в пар; F_{vap}=0,02 – коэффициент парообразования; F_{cond}= 0,01 – коэффициент конденсации; k – коэффициент релаксации по давлению; ρ_{vap} – плотность пара;ρ_l–плотность жидкости. К достоинствам данной модели следует отнести: возможность учёта несконденсированного газа (необходимо при моделировании течений нефти), высокую степень совпадения результатов численного моделирования течений в центробежных насосах с действительностью. Недостатком данной модели является плохая сходимость вследствие необходимости подбора k.

Для устранения недостатков модели Singhal была создана модель Zwart-Gerber-Belamri. В модель Zwart-Gerber-Belamri были внесены упрощения: плотность жидкости и плотность жидкости с пузырьками считаются одинаковыми, в жидкости отсутствует несконденсированный газ. Уравнения массопереноса для модели Zwart-Gerber-Belamri [5]:

$$p < p_{\text{н}}, m_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha)\rho_{vap}}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_{\text{н}} - p}{\rho_l}},$$
$$p > p_{\text{н}}, m_c = F_{cond} \frac{3\alpha\rho_{vap}}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3}\frac{p - p_{\text{н}}}{\rho_l}}, \quad (6)$$

где F_{vap} = 50; F_{cond} = 0.01; α_{nuc}= $5 \cdot 10^{-4}$ – коэффициент связи объёмной доли с массовой; $R_0 = 10^{-6}$м – начальный радиус пузырька. К достоинствам модели Zwart-Gerber-Belamri относится хорошая сходимость; возможность изменения коэффициентов. Однако она считается менее точной, чем модель Singhal.

Модель Schnerr–Sauer является следующей модификацией модели Singhal. Для повышения сходимости в ней было модифицировано уравнение массопереноса для фазы пар. Массоперенос пара в модели Schnerr–Sauer считается в зависимости от объёмной концентрации пара, которая находится методами математической статистики из количества кавитационных пузырьков n

$$\alpha = \frac{n \cdot \frac{4}{3}\pi R_0^{\,3}}{1 + n \cdot \frac{4}{3}\pi R_0^{\,3}}. \quad (7)$$

Уравнения массопереноса для модели Schnerr – Sauer [5]:

$$p < p_{\text{н}}, m_e = \frac{\rho_{vap}\rho_l}{\rho}\alpha(1-\alpha)\frac{3}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_{\text{н}} - p}{\rho_l}},$$
$$p > p_{\text{н}}, m_c = \frac{\rho_{vap}\rho_l}{\rho}\alpha(1-\alpha)\frac{3}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p - p_{\text{н}}}{\rho_l}}. \quad (8)$$

Достоинство данной модели заключается в пропорциональном массопереносе при парообразовании и конденсации, что автоматически обеспечивает хорошую сходимость.

Применение разработанной математической модели и методики имитационного моделирования течения двухфазной жидкости в пакете *Ansys CFX* позволяет выполнять расчёт характеристик ВТГ.

На третьем этапе выполняется конструкторская проработка и выпуск рабочих чертежей, изготовление опытных образцов и разработка экспериментального стенда, разработка методики проведения экспериментальных исследований. Далее выполняются

экспериментальные исследования, верификация результатов и доработка элементов ВТГ для обеспечения лучших характеристик.

Рис.5.Комплект измерительный К505

Замер приводной мощности проводится с помощью комплекта измерительного К505 (рис.5), который предназначен для измерения силы тока, напряжения и мощности в однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузках фаз.

Схема подключения комплекта измерительного к экспериментальной установке представлена на рис.6.

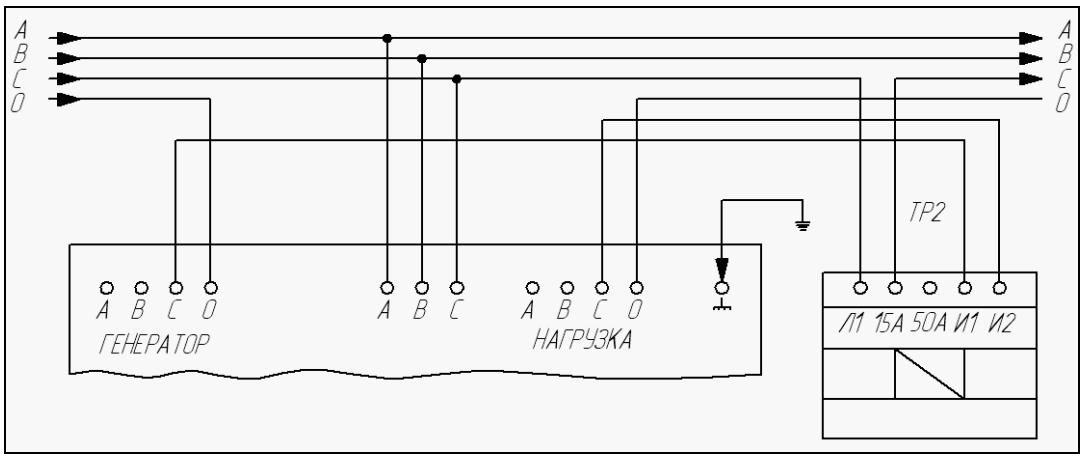


Рис.6. Схема подключения комплекта измерительного К505 к экспериментальной установке

Мощность трехфазной цепи P_Σ определяется путем суммирования измеренных мощностей в каждой фазе

$$P_\Sigma = P_A + P_B + P_C, \qquad (9)$$

где P_A, P_B, P_C – мощности, измеренные в фазах A, B, C.

Вольтметр измеряет фазное напряжение $U_\text{ф}$. Линейное напряжение $U_\text{л}$ определяется по формуле

$$U_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{ф}. \quad (10)$$

Полезная мощность насоса (Вт)

$$N_{П} = G \cdot \Delta p_{н}, \quad (11)$$

где G – объемный расход жидкости; $\Delta p_{н}$ – перепад давления в насосе.

КПД насоса

$$\eta_{Н} = \frac{N_{П}}{P_{\Sigma}}. \quad (12)$$

Количество тепла, выделившегося за время проведения экспериментальных исследований (Дж),

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta t = C \cdot \rho \cdot V \cdot (t_2 - t_1), \quad (13)$$

где C–удельная теплоемкость жидкости (вода), m – масса жидкости.

Потребляемая электрическая энергия из сети за время проведения экспериментальных исследований (Дж)

$$W = P_{\Sigma} \cdot \tau. \quad (14)$$

КПД вихревого теплогенератора

$$\eta_{Н} = \frac{Q}{W}. \quad (15)$$

Разработанная методика моделирования течения двухфазной жидкости в вихревом теплогенераторе в одно- и трехмерной постановках позволяет определять основные параметры и характеристики теплогенераторов с последующей идентификацией и верификацией результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование: Методы, описания и исследования сложных систем / под ред. А.А. Самарского. М.: Наука, 1989. 271 с.
2. Гетманова А.Д. Учебник по логике. М.: Издательство «Владос»,1994. 303с.
3. Райский Ю.Д., Тункель Л.Е. Применение вихревых труб в схемах подготовки природного газа. М.: ВНИИЭГаз, 1979. 56 с.

4. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide. April 2009. ANSYS Inc.
5.Арзуманов З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М.: Энергия, 1978. 304 с.
6. Ахметов Ю. М., Калимуллин Р. Р., Хакимов Р.Ф., Константинов С. Ю., Целищев Д. В. Исследование гидродинамических и термодинамических процессов высоконапорного многофазного вихревого течения жидкости// Вестник УГАТУ, 2012. Том 16, №2 (47) С.163–168.
7.Алямовский А.А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: Издательство БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

УДК 658.23

Н.И.Семавин (ОАО НИИТ)

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РАЗМЕЩЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При разработке планировочных решений размещаемого оборудования возникают задачи по формированию требований к производственным помещениям. Аналогичные задачи появляются и при передислокации уже действующих производств на другие производственные площадки.

В данной статье предлагается методологический подход к формированию требований к производственным помещениям для проектируемых и действующих, но передислоцируемых технологических производств.

Методологический подход состоит из трех этапов.

На первом этапе производится сбор необходимых исходных данных:

- технологический процесс;
- занимаемая площадь оборудованием;
- высотные размеры;
- категорийность помещений по взрывопожарной опасности;

– наличие вредных выбросов;
– вид необходимых подъездных путей;
– объемы и виды требуемой энергообеспеченности (электроэнергия, вода, отопление, вентиляция, канализация и т. п.);
– особые условия (нагрузка, уклоны полов и т. д.);
– информация о вспомогательных участках.

На втором этапе производится обработка и анализ собранных материалов. Особенностью выполнения работ на этом этапе является изучение и анализ всего технологического цикла с целью его условного разбиения на технологические линии и цепочки. Такое условное разбиение позволяет определить возможные места «разбиения» технологической линии или цепочки с целью компактного размещения оборудования. Так, например, технологическое оборудование, расположенное в одну линию, требует производственное помещение, имеющее значительные размеры по длине. При разбиении на участки, появляется возможность спланировать технологический процесс, к примеру, в две и более технологические линии, что позволяет, не нарушая самого технологического процесса, компактно располагать оборудование. Такой подход актуален, особенно при передислокации действующих производств в уже существующие здания и сооружения.

При анализе технологического процесса с точки зрения планировки следует обратить внимание на такие его особенности, как расположение мест аспирации и вытяжной вентиляции, мест подвода сжатого воздуха, воды и пр.

При анализе системы электроснабжения следует обратить внимание на такие требования, как количество вводных устройств, резервирования, надежность и качество электроэнергии.

При анализе системы водоснабжения необходимо определить количественные и качественные характеристики, включая оборотное техническое водоснабжение и систему автоматического пожаротушения, если таковая необходима.

При рассмотрении системы отопления необходимо определить источники теплоснабжения, параметры теплоносителей систем отопления, тепловые нагрузки.

При определении категории помещения по взрывопожарной опасности необходимо определить категорию каждого производственного участка, а также вспомогательных участков.

В случае если на объекте используется газ, для технологического пресса или отопления, то необходимо иметь характеристики по количеству и параметрам потребляемого газа.

Все потребляемые энергоресурсы должны учитываться, поэтому производство должно быть оснащено узлами или системами учета, иногда требующих отдельных помещений.

Третий этап работ состоит, как правило, из двух частей. Вначале производится предварительное размещение технологического оборудования с целью определения необходимых площадей, включая зоны обслуживания, проезды. Далее делается предварительный вариант прокладки всех инженерных сетей (кабели, трубопроводы, вытяжки и пр.) к оборудованию.

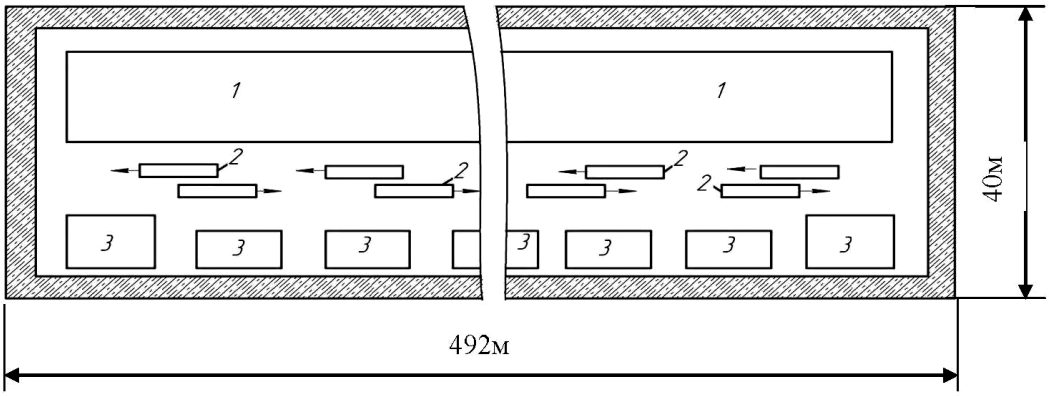
В заключительной части с помощью итераций определяют окончательный вариант планировки размещения технологического оборудования, вспомогательных участков.

В случае передислокации действующих производств, возможно одновременно решить некоторые проблемы (узкие места) технологического процесса.

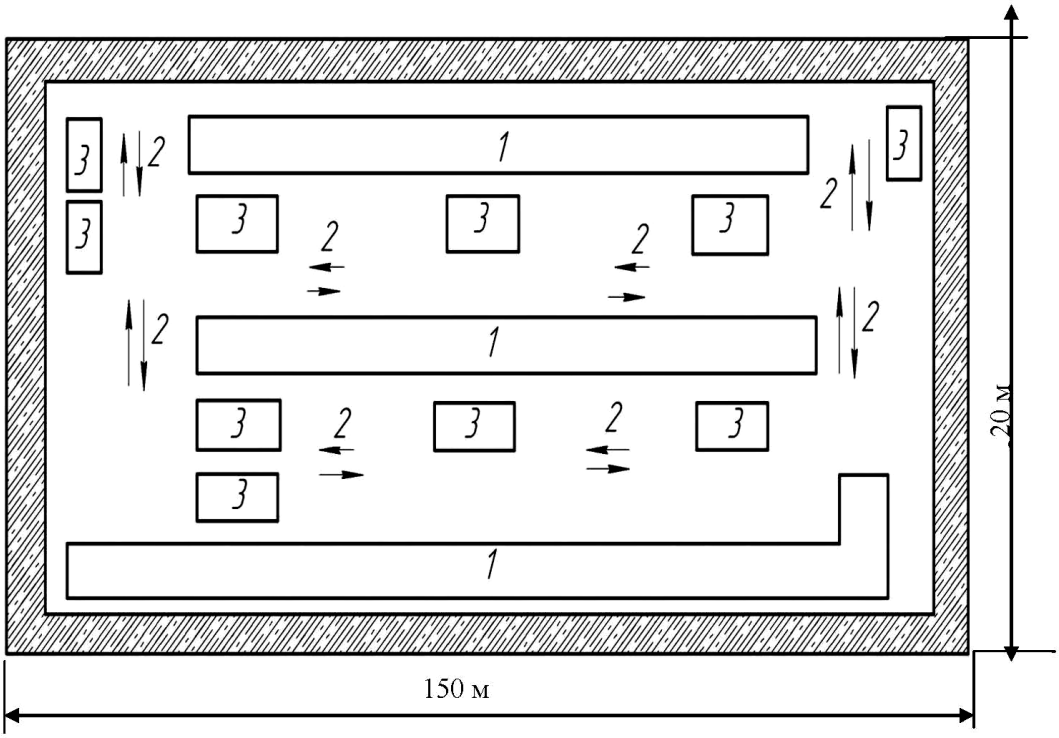
Примером использования такого методологического подхода может служить работа, выполненная специалистами Института технологии и организации производства (ОАО НИИТ) по передислокации действующего производства на уже существующую промышленную площадку.

Действующее производство размещалось в производственном корпусе длиной 492 м и шириной 40 м. Основной производственный процесс располагался в одну непрерывную технологическую линию (рис.1а). Технологический процесс и оборудование были разработаны и изготовлены одной из зарубежных фирм. Процесс имеет высокий уровень механизации и автоматизации.

Перед ОАО НИИТ стояла задача разместить производство в существующем корпусе размерами 150х120 м. Как видно, одна из сложностей заключалась в том, что новое производственное помещение имело меньшую площадь и другую конфигурацию.



а) до передислокации



б) после передислокации

Рис.1.Схема размещения технологического оборудования: *1 – участки технологического оборудования, 2 – движение внутрицехового транспорта, 3 – участки складирования изделий*

Используя методологический подход, описываемый в данной статье, были собраны на первом этапе необходимые исходные данные. Затем был произведен анализ собранных материалов. Наиболее трудным было выделение технологических цепочек из непрерывной технологической линии. Произведя разделение

технологической линии на цепочки, были определены места возможного разрыва технологической линии, но которые не нарушают существенно сам ход процесса. Так был удален автоматизированный участок промежуточного хранения изделий, длиной 60м, расположенный на рольгангах. Операцию промежуточного хранения изделий на рольгангах заменили обычным хранением, а для перемещения использовали автопогрузчик. Такое внесение изменений является вынужденным, чтобы уменьшить длиновые размеры технологической линии. Кроме того, детальный анализ технологических цепочек позволил исключить из процесса несколько рольгангов. Это дало возможность еще на 40 метров сократить общую длину технологической линии. Также результатом анализа явилось то, что общую технологическую линию можно разделить на три участка.

На третьем этапе были выполнены работы по размещению оборудования с учетом внесенных изменений на новые производственные площади. Итерации планировок потребовались для уточнения противопожарных разрывов между участками, а также для улучшения логистических маршрутов внутри цеха. В результате разработано планировочное решение, представленное на рис.1б.

Результаты выполненной работы следующие:

1. Решен вопрос передислокации действующего производства на меньшую площадь.
2. Удалось высвободить значительную часть оборудования из производственного цикла. Высвободившееся оборудование можно использовать в других процессах.
3. Высвобождение оборудования позволило сэкономить потребление электроэнергии.

Передислоцированное производство успешно функционирует.

УДК 621.311.6

И.М. Гарифуллин, Л.И. Гутин (ООО “Верба”), М.Г. Закиров, О.В.Нагуманов, Р.Р.Суфиянов,Ф.М.Агадуллин (ОАО НИИТ)

ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ВЫХОДЕ ТИРИСТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ПРИ РЕЗКОМ СБРОСЕ НАГРУЗКИ

При создании мощных низковольтных источников постоянного тока для группового электроснабжения возникает проблема ограничения бросков выходного напряжения, связанных с резким выводом из работы наиболее энергоемкого потребителя. Питание от промышленной трехфазной сети в данном случае осуществляется через понижающий трансформатор, паразитные параметры которого обусловливают существенные падения напряжения от потребляемого тока, так что сброс нагрузки вызывает повышение напряжения, подводимого к выпрямителю. Как показывает практика, в некоторых режимах длительность адаптации системы регулирования угла включения тиристоров оказывается соизмеримой с длительностью переходного процесса в силовой части источника. В таких ситуациях, система автоматического регулирования (САР) выпрямителя не всегда способна своевременно скомпенсировать действие возмущения, вызываемого резким снижением нагрузки. Это обстоятельство становится причиной возникновения перенапряжений на выходных шинах источника, к которым остаются присоединенными другие, маломощные потребители, предъявляющие, однако, довольно жесткие требования по допустимой амплитуде бросков питающего напряжения.

В данной статье приводятся сведения о разработанном и внедренном опытном образце системы ограничения перенапряжений на выходных шинах источника питания серии ТИП, возникающих при резком отсоединении основного энергопотребителя.

Принцип действия системы состоит в кратковременной подмене реальной нагрузки ее резисторным имитатором. Работа имитатора осуществляется в два этапа: сначала по сигналу, формируемому

датчиком рассогласования выходного напряжения источника с заданной уставкой, производится бесконтактное практически одновременное присоединение к выходным шинам группы резисторных матриц, а затем, после определенной задержки матрицы поочередно выводятся из работы. Интервал задержки выключения подбирается достаточным для эффективной адаптации системы автоматического регулирования выпрямителя. Таким образом, имитатор сначала перехватывает ток отключаемого потребителя, а затем ″размазывает″ во времени процесс собственного выхода из работы.

На рис.1 приведена блок-схема источника питания с предлагаемым имитатором. При сбросе нагрузки датчик рассогласования выдает импульсный сигнал на устройство включения тиристорного присоединителя, обеспечивающего форсированное одновременное подключение к выходным шинам пяти резисторных матриц. Эквивалентное активное сопротивление всех матриц подбирается исходя из условия обеспечения неизменности потребляемого от источника тока, то есть матрицы перехватывают весь ток выводимого из работы потребителя. В данном конкретном случае на серийном источнике ТИП-1 ставилась задача перехвата номинального тока порядка 150А при номинальном выходном напряжении 24В, причем в качестве матриц имитатора использовались резисторные блоки, каждый из которых содержал по тридцать параллельно соединенных резисторов МЛТ2-24Ом.

Одновременно с присоединителем матриц устройство включения запускает систему задержки их последующего вывода из работы. При этом длительность задержки должна быть достаточной для адаптации системы автоматического регулирования выпрямителя без возникновения перенапряжений, превышающих уровень уставки на 10% от номинального значения. С другой стороны, задержка отключения матриц должна обеспечивать допустимый температурный режим работы образующих их резисторов, поскольку импульсная токовая нагрузка на каждый резистор составляет в данном случае 1А вместо штатного для резистора типа МЛТ2-24 среднего постоянного или действующего значения тока порядка 0,29 А. Проведенные экспериментальные исследования показали, что такой резистор способен без ощутимого перегрева выдерживать

токовую нагрузку амплитудой 1А в течение 0,5 с. Это обстоятельство позволило создать встроенный в источник малогабаритный имитатор на практически безиндуктивных резисторах с естественным воздушным охлаждением.

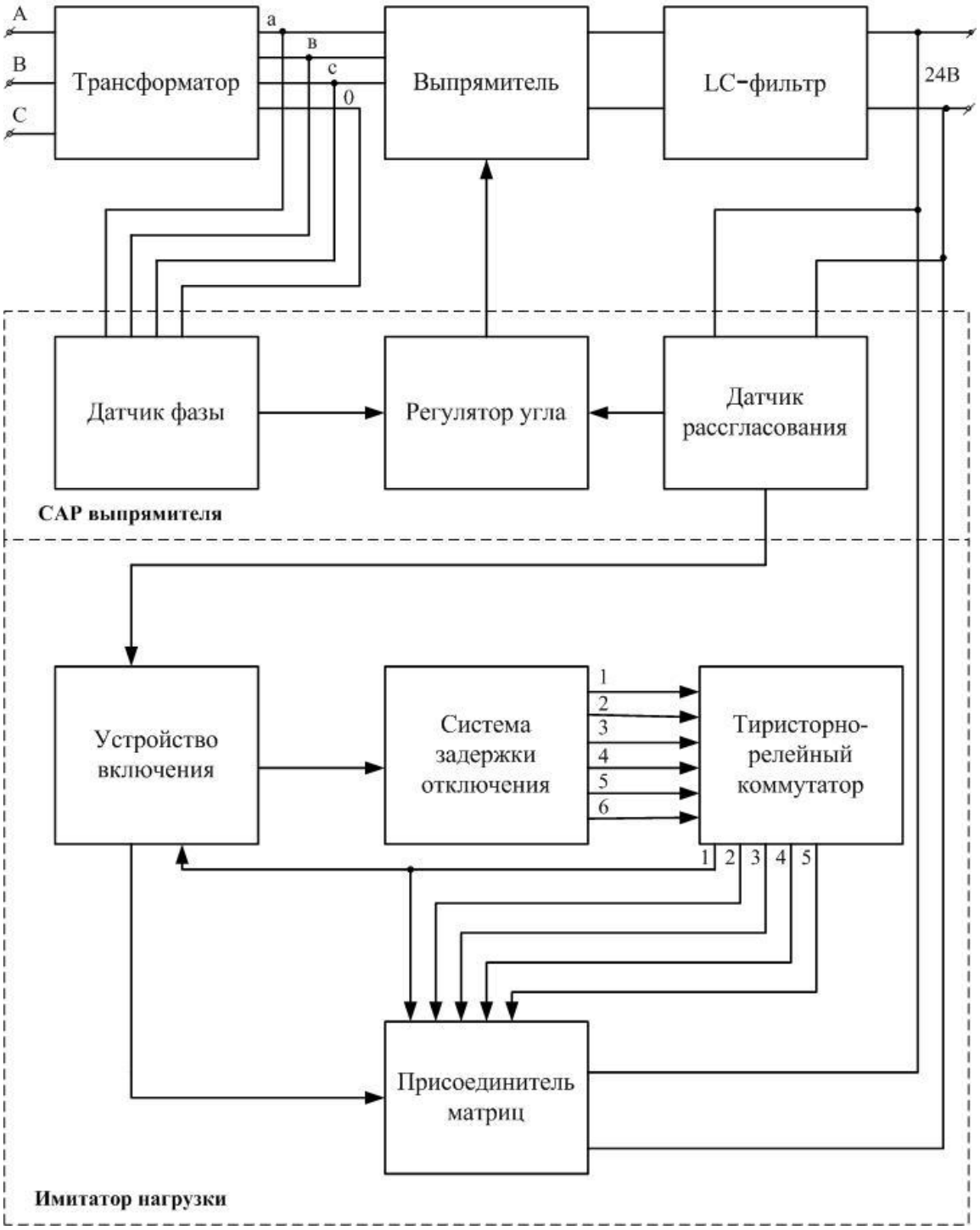


Рис.1. Блок-схема источника питания с имитатором

Выведение резисторных матриц из работы осуществляется тиристорно-релейным коммутатором, каждый из пяти каналов которого срабатывает от соответствующего одноименного с ним канала системы задержки выключения.

Последний, шестой канал системы задержки производит возврат тиристорно-релейного коммутатора в исходное положение. Использование электромагнитных реле позволило построить достаточно простое устройство возврата, автоматически обеспечивающее готовность имитатора к очередному циклу только после отработки всех шести каналов системы задержки выключения. Постоянная готовность к повторному срабатыванию отрицательно сказывается на помехоустойчивости всей системы, поскольку в процессе стабилизации выходного напряжения возможно возникновение колебаний, способных вызывать повторное, несвоевременное срабатывание датчика рассогласования, приводящее к сбою. Для предотвращения такого явления в разработанном имитаторе применена блокировка устройства включения, вводящаяся в действие сразу после срабатывания первого канала системы задержки выключения. Снятие же этой блокировки производится после срабатывания последнего, шестого канала системы задержки.

На рис.2 приведена принципиальная схема устройства включения, представляющего собою тиристорный формирователь, нагруженный на трансформаторный распределитель импульсов. Конденсатор формирователя C_{01} заряжается от автономного источника питания напряжением 24В через высокоомный резистор R_{01}. При резком сбросе нагрузки от датчика рассогласования приходит отпирающий импульс на тиристор T_{01}, и предварительно заряженный конденсатор C_{01} разряжается на первичные обмотки импульсных трансформаторов $ИТ_{01} \div ИТ_{06}$.

Подача отпирающих импульсов на тиристоры всех устройств, описываемых в данной работе, осуществляется по единому традиционному принципу: для предотвращения возможных выбросов обратных токов в цепи управления введены неуправляемые диоды, причем один из них включен последовательно, а другой – параллельно, шунтируя управляющий переход тиристора по выбросам обратного тока последовательно включенного диода.

Требуемая величина тока управления обеспечивается сочетанием последовательно и параллельно включенных резисторов.

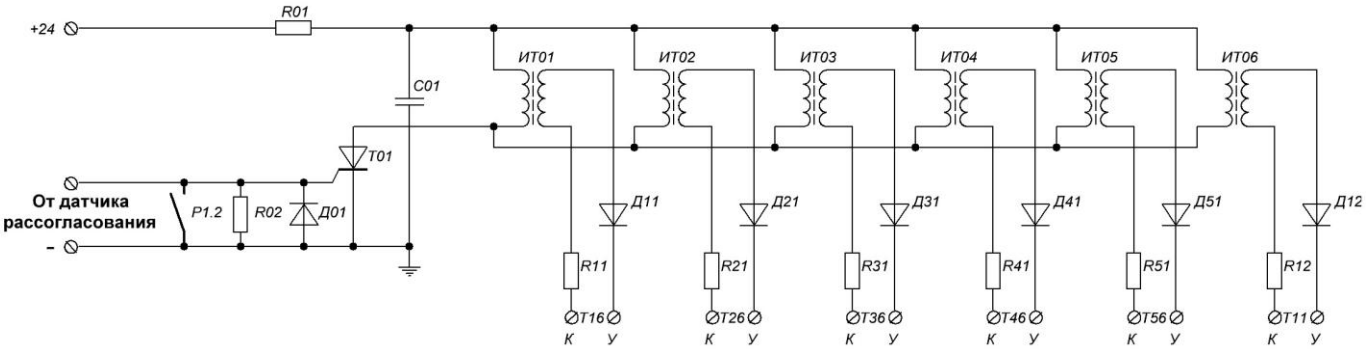


Рис.2. Принципиальная схема устройства включения

Нормальноразомкнутые контакты реле $Р_{12}$ обеспечивают возможность блокирования управляющего перехода тиристора $Т_{01}$ от повторных включений, приводящих к нарушению работы имитатора.

Одновременно с подачей отпирающих импульсов на тиристоры присоединителя матриц $Т_{16} \div Т_{56}$ производится запуск первого канала системы задержки выключения, принципиальная схема которого приведена на рис. 3.

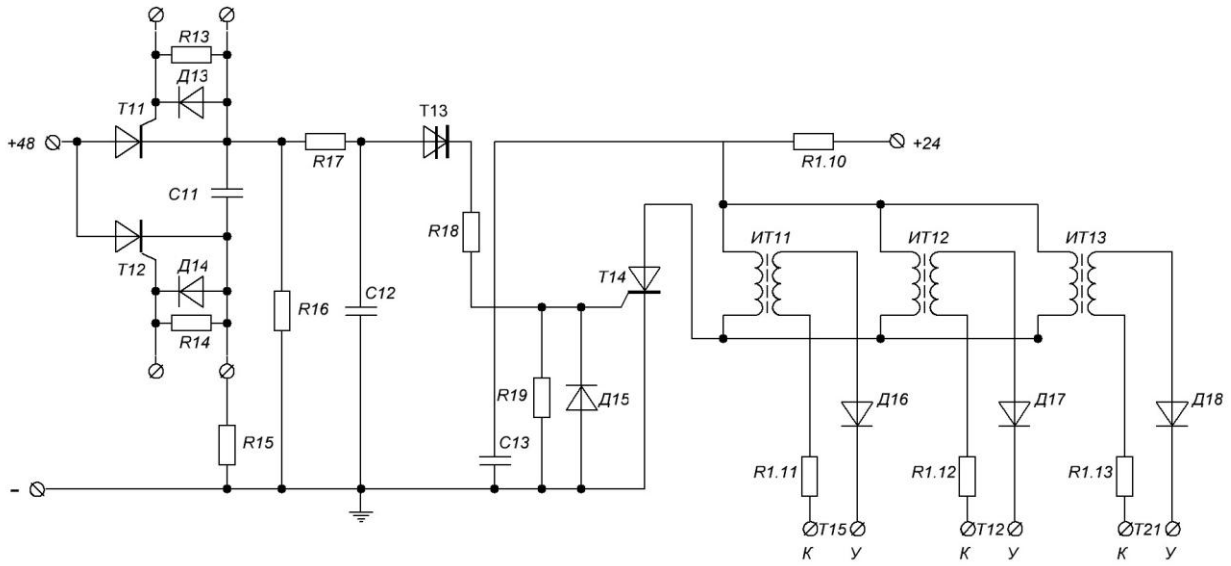


Рис.3. Первый канал системы задержки выключения

Включение проходного тиристора $Т_{11}$ от $ИТ_{12}$ вызывает экспоненциальную зарядку конденсатора времязадающей цепочки

R_{17} – C_{12}. Резистор R_{16} обеспечивает протекание через тиристор T_{11} анодного тока, превышающего ток его удержания, так что этот тиристор продолжает оставаться включенным и после исчезновения отпирающего импульса. При достижении напряжения на конденсаторе C_{12} уровня срабатывания динистора T_{13} последний включается, и на тиристор T_{14} подается отпирающий импульс. Формирователь, построенный на тиристоре T_{14} и конденсаторе C_{13}, через импульсный трансформатор $ИТ_{11}$ включает тиристор T_{15} тиристорно-релейного коммутатора (рис.4), что приводит к срабатыванию реле P_1.

При этом нормальнозамкнутые контакты P_{11} разрывают анодную цепь тиристора T_{16} присоединителя матриц (рис.5), осуществляя его выключение и вывод из работы резисторной матрицы первого канала $R_{м1}$.

Нормальноразомкнутые контакты P_{12} этого же реле закорачивают управляющий переход тиристора T_{01} на время работы остальных пяти каналов.

Импульс напряжения с трансформатора $ИТ_{12}$ включает тиристор T_{12}, который принудительно выключает проходной тиристор T_{11} обратным анодным током, создаваемым предварительно заряженным конденсатором C_{11}. Сопротивление резистора R_{15} подобрано так, что после выключения тиристора T_{11} анодный ток тиристора T_{12} становится меньше тока его удержания, и тиристор T_{12} самовыключается, выводя из работы первый канал системы задержки выключения.

Импульс напряжения с трансформатора $ИТ_{13}$ осуществляет включение проходного тиристора T_{21} второго канала системы задержки, приводя в итоге к срабатыванию реле P_2, нормальнозамкнутые контакты P_{21} которого разрывают анодную цепь тиристора T_{26}, что вызывает его выключение и вывод из работы резисторной матрицы второго канала $R_{м2}$. Далее работа каждого канала системы задержки, а также соответствующих им каналов тиристорно-релейного коммутатора и присоединителя матриц, осуществляется аналогично вышеописанному.

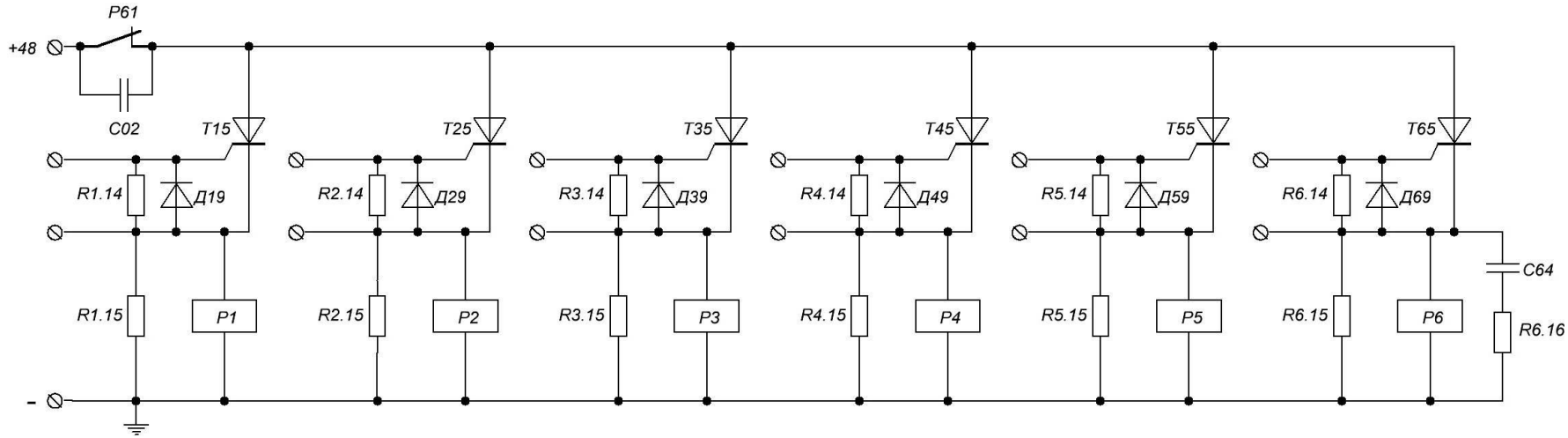


Рис.4. Тиристорно-релейный коммутатор

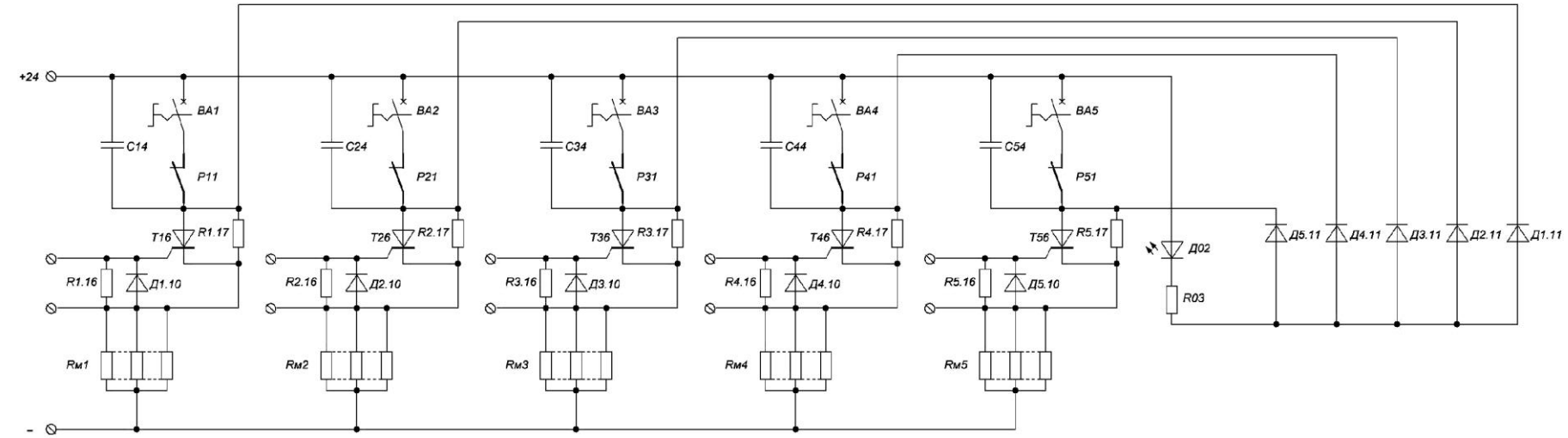


Рис.5. Присоединитель матриц

По мере выведения из работы каждого канала присоединителя матриц соответствующие реле $P_1 \div P_5$, остаются включенными, и для возвращения всего имитатора в исходное состояние после отработки пятого канала необходимо произвести их выключение, что обеспечивается шестым каналом системы задержки, единственным отличием которого от предыдущих пяти является отсутствие импульсного трансформатора, включающего очередной проходной тиристор, поскольку весь набор каналов уже исчерпан.

Импульс напряжения с трансформатора $ИТ_{61}$ шестого канала включает тиристор T_{65}, что вызывает срабатывание реле P_6, к катушке которого подключена RC-цепочка, образованная конденсатором C_{64} и резистором $R_{6.16}$. Размыкание нормальнозамкнутых контактов P_{61} создает разрыв цепи питания всего тиристорно-релейного коммутатора. Однако отпускание реле P_6 и повторное замыкание контактов P_{61} происходит с дополнительной задержкой, достаточной для выключения тиристоров $T_{15} \div T_{65}$ и отпускания реле Р1÷Р5 предыдущих каналов. Конденсатор C_{02}, условно обозначенный как элемент нулевого канала, выполняет функцию ограничения коммутационных перенапряжений и предотвращения искрообразования на размыкающихся контактах P_{61}. Такие же конденсаторы ($C_{14} \div C_{54}$) с той же целью введены и в анодные цепи тиристоров $T_{16} \div T_{56}$ присоединителя матриц (см. рис.5).

Для защиты резисторных матриц от токовых перегрузок присоединение каждой их них осуществляется через однополюсный автомат ВА с номинальным током тепловой отсечки 5А. На рис. 5 приведена схема светодиодной сигнализации выключенного состояния любого из пяти автоматов, построенная на диодах $Д_{1.11} \div Д_{5.11}$, $Д_{02}$ и резисторах $R_{1.17} \div R_{5.17}$, R_{03}.

При включенном состоянии всех пяти автоматов цепь светодиода $Д_{02}$ оказывается зашунтированной, и световой сигнал отсутствует. В случае, когда выключен автомат $ВА_1$, ток протекает по цепи: положительная шина источника – светодиод $Д_{02}$ – токоограничивающий резистор R_{03} – развязывающий диод $Д_{1.11}$– шунтирующий резистор $R_{1.17}$ – матрица R_{M1} – отрицательная шина источника. Если будет выключен любой другой автомат, то в цепь протекания тока светодиода $Д_{02}$ войдет соответствующий

развязывающий диод $Д_{2.11} \div Д_{5.11}$, шунтирующий резистор $R_{2.17} \div R_{5.17}$ и матрица $R_{M2} \div R_{M5}$. Выходной сигнал светодиода $Д_{02}$ обусловливает как визуальное информирование оператора об имеющем место нарушении режима, так и автоматическое срабатывание системы аварийного отключения тиристорного источника питания.

Научное издание

НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ

Ежегодный научно-технический сборник

Выпуск 8

Под общей редакцией
доктора технических наук, профессора В.Л.Юрьева

Подписано в печать 06.12.2013. Формат 60x841/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл-печ.л. 16,5 Уч.-изд.л. 16,4
Тираж 100 экз. Заказ № 97

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО « РегТайм», 450005, ул. 8 Марта, 12/1.

Издательство «Вагант»