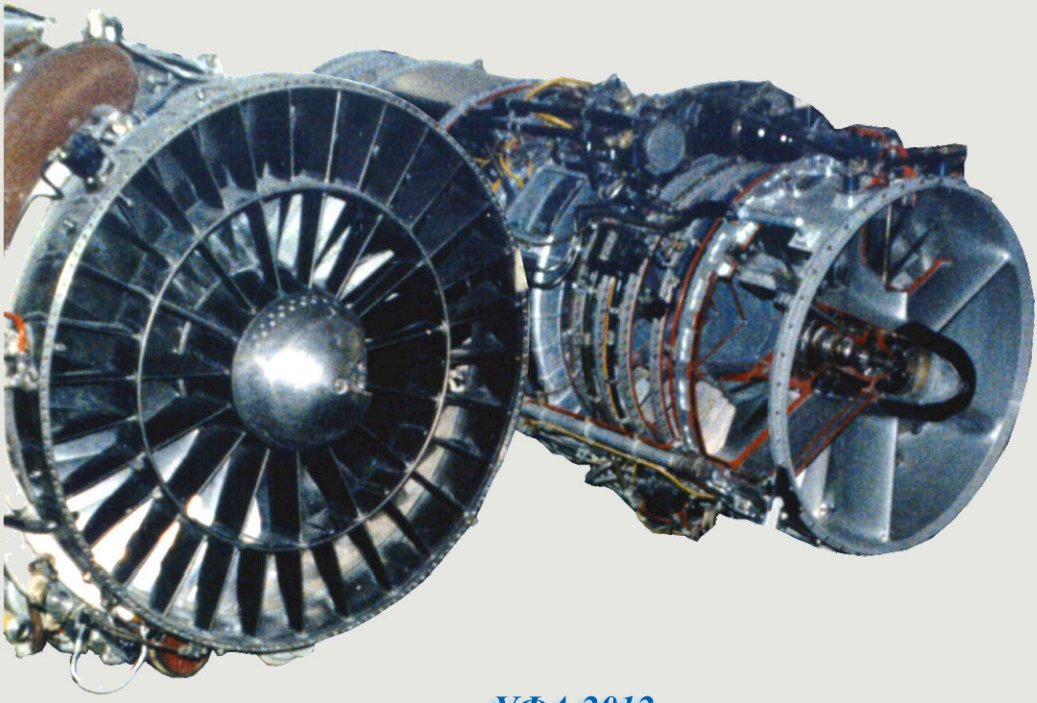
НАУКА-ПРОИЗВОДСТВУ

ВЫПУСК 7



УФА 2012

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 7

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

Уфа «ВАГАНТ» 2012

УДК 681.526
ББК 30.124
Н34

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

Н34 Наука – производству: Ежегодный научно-технический сборник. Вып. 7/ под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В. Л. Юрьева. – Уфа: Издательство «Вагант», 2012. – 299 с.
ISBN **978596350414-7**

Представлены статьи, отражающие результаты научной и производственной деятельности специалистов научных организаций, предприятий и вузов, направленной на совершенствование организационных и технологических процессов. Большая часть представленного материала нашла практическое применение.

Сборник представляет интерес для инженерно-технических работников предприятий, аспирантов и студентов технических и экономических специальностей.

ISBN 978596350414-7

© ОАО НИИТ, 2012
© Издательство «Вагант», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел I. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Юрьев В. Л., Заянчковский Ю. И. Стратегия и политика ОАО НИИТ в области качества 7

Заянчковский Ю. И. Процессный подход – путь повышения эффективности системы менеджмента качества в организации 18

Заянчковский Ю. И. Риск-менеджмент в системе общего менеджмента организации 37

Кадырова Ж. М., Сухова Н. А. Методы анализа и прогнозирования трудоёмкости 48

Никитин В. В., Теплов В. С., Тормышев А. А. Организация международных проектов на основе принципов «бережливого производства» 57

Галимова М. П. Инновационные инструменты реализации стратегии управления производственными активами (на примере ТОиР) 71

Сухова Н. А., Семенов А. С., Кадырова Ж. М. Управление техническим перевооружением предприятия на основе технологического аудита 85

Раздел II. ТЕХНОЛОГИЯ АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Сухова Н. А., Семенов А. С. Основные тенденции развития перспективных технологий в авиадвигателестроении 93

Быков Ю. Г., Ромашов А. С., Базылева О. А., Рассохина Л. И. Применение нового интерметаллидного сплава ВКНА4-УР модифицированного в конструкции перспективного двигателя 105

Поклад В. А. Исследование возможности использования жаропрочного никелевого сплава ВЖ 172 в цельносварных конструкциях барабана компрессора высокого давления перспективного двигателя 110
Морозов С. В., Квятковский Н. С. Разработка системы управления линии для изотермической раскатки дисков АЛРД-1200 117
Ковалев И. С., Юрьев В. Л. Алмазное шлифование как перспективный метод механической обработки сплавов на основе TiAl 123
Ковалев И. С., Юрье В. Л. Перспективы промышленного применения сплавов на основе TiAl 138
Грибановский В. А., Юрьев В. Л., Никитин С. Н., Ахметов А. М. Способ получения рабочего колеса компрессора 150
Горелов В. А., Алексеев С. В. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов 160
Аникин В. Н., Пьянов А. А. Исследование закономерностей нанесения композитных покрытий на основе модификаций AL_2O_3 на твердый сплав..... 168
Арсентьев В. С. Использование устройства контроля параметров модели “УКП-2008” при испытаниях ГТД на неустановившихся режимах работы 174
Петухов А. В. Применение интеллектуальных технологий для оптимизации стендовых испытаний газотурбинных двигателей 195
Перевоин С. А. Повышение качества ремонта рабочих охлаждаемых турбинных лопаток за счёт использования сверхкритической технологии…… 202
Шехтман С. Р. Технология осаждения вакуумных ионно-плазменных наноструктурированных покрытий TI-TIN на детали вертолетной техники 207

Фадин Д. М., Яковлев М. Г. Разработка модели стойкости режущего инструмента, учитывающей число циклов его термосилового нагружения в процессе обработки 219

Каримов И. Г., Постнов В. В. Влияние нестационарности температуры резания на износ инструмента при продольном и торцевом точении 229

Раздел III. ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ахметов Ю. М, Зангиров Э. И., Свистунов А. В. Идентификация результатов экспериментальных стендовых испытаний квазиизотермического дросселирования в вихревом регуляторе давления газа..... 241

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 250

Ахметов Ю. М., Зангиров Э. И., Мухаметов М. В., Свистунов А. В. Чиндина А. А. Разработка структурной схемы квазиизотермического процесса дросселирования газа 255

Ахметов Ю. М., Зангиров Э. И., Свистунов А. В., Чиндина А. А. Численное моделирование термогазодинамических процессов в устройствах торможения закрученного потока 271

Ахметов Ю. М., Калимуллин Р. Р., Глухов Е. А., Мухаметов М. В. Преобразование водородосодержащей рабочей жидкости по замкнутому циклу 283

Кярамян К. А., Лыков А. М. Расчет процесса алюмотермитной сварки рельсов 290

Очередной выпуск ежегодного научно-технического сборника «Наука – производству» посвящен 100-летию со дня рождения Вагоса Павла Васильевича – конструктора «от бога», заслуженного изобретателя РСФСР.

Павел Васильевич проработал в Институте 27 лет ведущим инженером-конструктором, начальником научно-исследовательского сектора.

В 1959 г. под руководством П. В. Вагоса в Институте создано направление по разработке специализированного оборудования для обработки пера лопатки ГТД.

В 1959-1960 гг. был разработан первый станок – фрезерный полуавтомат 4ФСЛ-1 для обработки рабочих лопаток компрессора длиной до 300 мм, удостоенный Золотой медали ВДНХ СССР.

Под руководством и при непосредственном участии П. В. Вагоса спроектировано:

- 7 типов фрезерных станков (модели 4ФСЛ-1, 4ФСЛ-2, 4ФСЛ-4, 4ФСЛ-4А, 4ФСЛ-4Б, 4ФСЛ-5, 4ФСЛ-6);

- 6 типов ленточно-шлифовальных станков (модели 4ШСЛ-4, 4ШСЛ-7, 4ШСЛ-8, 4ШСЛ-9, 4ШСЛ-10, 4ШСЛ-11);

- 4 типа станков для электроабразивного шлифования (модели 4ШЭЛ-1, 4ШЭЛ-4, 4ШЭЛ-7, 4ШЭЛ-8);

- 13 станков для изготовления деталей и сборки узлов двигателя «М-412»;

- 2 станка для контроля и сортировки метрических резьб.

Большинство этих станков получило широкое распространение на предприятиях отрасли. Особого внимания заслужили полуавтоматы 4ФСЛ-4А и 4ФСЛ-4Б для фрезерования профиля пера и поверхности перехода от пера к хвостовику рабочих лопаток компрессора длиной до 270 мм, которые были изготовлены большими сериями. Полуавтомат 4ФСЛ-4А удостоен Золотой медали ВДНХ СССР.

В 1984 г. впервые в отрасли был создан станок с числовым программным управлением модели 4ФСЛ-8П для двухстороннего фрезерования профиля пера, прикомлевых участков и антивибрационных полок лопаток.

Станки для электроабразивного шлифования лопаток 4ШЭЛ-7 внедрены на УМПО, РПОМ (г. Рыбинск), ММПО им. Чернышева (г. Москва).

Самоотверженный труд П. В. Вагоса отмечен орденом «Знак Почета», пятью медалями ВДНХ СССР – двумя золотыми, серебряной и двумя бронзовыми, дипломами и свидетельствами участника ВДНХ СССР.

Раздел I

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 338.2 (075.8)
ББК 65.290:65.050

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

СТРАТЕГИЯ И ПОЛИТИКА ОАО НИИТ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА

Современный период стремительного развития общественно-экономических связей требует от организаций нового понимания высшего контекста, когда организация не является обособленным объектом, а является частью своего окружения, изменения которого отражаются на самой организации и наоборот. В этих условиях перед высшим руководством организации стоит задача обеспечить ее гармоничное существование в данном окружении, т.е. наметить стратегию ее поведения.

Понятие “стратегия” определяется как искусство планирования какой-либо деятельности (военной, экономической, научной и т.п.). Причем, это направление должно быть гибкими и постоянно учитывать изменения внешнего контекста. Любой детальный план легко может быть нарушен, поэтому руководитель – стратег должен

искать и формулировать закономерности–принципы, позволяющие свести к минимуму риск недостижения намеченных целей. Исходя из этого, можно сказать, что стратегия организации – это набор принципов, которыми руководствуется организация, реализуя свое генеральное предназначение – Миссию, которую можно рассматривать как идеал.

Период достижения идеала может быть значительным, поэтому приходится детализировать “поведение” организации [1]. Примером такой детализации может служить “пирамида” целеполагания“ (рис. 1).

Миссия – генеральная цель, выражающая смысл существования и общественное предназначение организации.

Видение – идеальное представление лидера о состоянии бизнеса организации**.**

Стратегия – общее представление лидера о состоянии бизнеса организации.

Политика – намерение и направление деятельности организации, ограничивающие область управленческих решений для обеспечения их соответствия стратегии и целям.

Цель и задачи – желательные конечные результаты, которых добиваются или к которым стремятся (задачи-частные, измеряемые цели).

Программа – совокупность одного или нескольких мероприятий, запланированных на конкретный период времени для достижения конкретной цели или решения поставленной задачи.

Рис. 1. Пирамида целеполагания организации

Разработка стратегии в нынешних динамичных и многообразных условиях весьма ответственное, сложное и рискованное дело, потому что классическая модель стратегии,

основанная на понятиях микроэкономики, не подходит для большинства современных проблем.

Стратегия в современном понимании – это набор решений, который включает выбор позиции организации на рынке, определение источников информации получения преимуществ перед конкурентами, разработку бизнес-концепции и создания систем приращения стоимости, работающих на цели организации.

Выбор позиции на рынке зависит от:

- лидерства руководства;
- умения организации приспособиться к рынку;
- умения активно формировать рынок “под себя”;
- сохранения за собой права действовать.

Исходя из анализа реальной ситуации на рынке научно-технических услуг в рамках Объединенной Двигателестроительной Корпорации (ОДК) РФ, руководство института строит свою стратегию на основе умения быстро приспособиться к рынку, перестроить свою политику, в том числе и политику в области качества, при этом активно продвигая свои услуги и свою продукцию на рынке. Причем, для получения конкурентных преимуществ на рынке, организация использует передовые методы работы (технологии), структурные преимущества, а также глубокое понимание тенденций развития отрасли.

Активное управление развитием стратегии в рамках системы менеджмента качества (СМК) организации предполагает мониторинг, умение уловить тенденции отрасли, рынка, оценить уровни возможных рисков и своевременно отреагировать на них путем

разработки и совершенствования Политики и планов тактических действий.

В этой связи следует сказать, что именно первый руководитель как “отец-основатель”, как лидер формирует первые систематизирующие документы, определяющие генеральное предназначение организации – Миссию, Видение – образ организации и путь – стратегию, по которому она должна двигаться, включая ноу-хау.

Чтобы свести к минимуму возможность неудачи при реализации нашей стратегии и политики в области качества, руководством организации реализуется процесс риск-менеджмента. Именно исходя из задачи минимизации риска в достижении стратегических целей и провозглашенной Политики в области качества, в институте параллельно развивается несколько научных направлений:

- исследование, разработка и изготовление оборудования для бесперебойного питания промышленных объектов и имитационных систем энергообеспечения узлов и агрегатов летательных аппаратов;

- исследование и разработка технологических процессов, методологии и средств обеспечения производства серийных и перспективных ГТД;

- исследование и разработка специализированного оборудования для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД);

- исследование и разработка технологических процессов и специализированного оборудования для производства гибких трубопроводных систем (гибких трубопроводов);

- исследование и создание научных основ технологии, специального оборудования и средств контроля для изготовления деталей газотурбинных двигателей из композиционных материалов.

Это позволяет повысить устойчивость организации, когда относительные неудачи по одному направлению компенсируются в другом.

Также устойчивому положению института на рынке услуг способствует реализация наших принципов (стратегии) за счет:

- оперативного учета внешнего и внутреннего контекста организации;

- гибкой адаптации к условиям рынка и требованиям потребителей;

- обеспечения высокой компетентности наших специалистов и др.

Следует отметить еще один аспект процесса разработки и реализации стратегии организации – инвестиционный. В нашем случае, институт для решения этой задачи инвестировал свой собственный потенциал и свое собственное время – время своих специалистов, не оплаченное нашими потребителями в чистом виде. При этом усилия специалистов были направлены на решение задач в порядке их приоритета, а сами усилия стимулировались и поощрялись согласно принятой в организации процедуре мотивации.

Чтобы предлагаемая стратегия заработала, была воспринята коллективом НИИТ, в ее разработке принимали участие ведущие специалисты организации, чьи интересы она будет отражать и на чьи плечи ляжет в дальнейшем ответственность за ее реализацию. Для этого каждое из направлений института предложило свое видение стратегии, а затем, используя метод ”мозгового штурма”, и были сформулированы указанные принципы стратегии и их приоритетность. Причем, всем участникам этого процесса абсолютно ясно, что это не разовое действие, а первый шаг на пути постоянного улучшения общего менеджмента организации. Этот путь предусматривает мониторинг, измерения (если возможно) и анализ полученных данных.

Задача менеджмента организации, в данном случае, заключается в том, чтобы стратегия была не только разработана, а в том, чтобы она была работоспособна, совпадала с личными стратегиями (целями) специалистов и “тянула” организацию наверх к ее идеалу. В этом случае и вероятность достижения поставленной цели организации будет выше [2].

Роль менеджмента организации в управлении стратегией состоит также и в том, чтобы решить, как минимум, две следующие задачи: разработать внутрифирменную политику, в частности, в области качества, и установить процедуру мониторинга и оценки результативности системы менеджмента, реализующей стратегию организации.

Обе эти задачи успешно решаются путем реализации одного из принципов нашей стратегии: создание и внедрение системы

менеджмента качества, отвечающей требованиям международного стандарта ИСО 9001:2008.

Очевидна взаимосвязь между миссией, конкретизированной в видении и стратегии, и корпоративной культурой (системой ценностей в организации). Именно от ее уровня зависит точная формулировка, миссии, видения, стратегии и далее – Политики и целей организации в области качества. Причем, к их формулировке первый руководитель как лидер, который приводит свою команду к успеху, должен лично отнестись с максимальным вниманием, ибо «если не знаешь, куда идти, ни одна из дорог не приведет к цели».

Чтобы стратегия организации на самом деле была успешной, она должна отражать как новые направления деятельности, ориентированные на потребителя и других заинтересованных сторон, так и внутренние ключевые процессы. То есть основная идея, заложенная в стратегию, заключается в том, каким образом организации добиться конкурентных преимуществ с помощью своих отличительных характеристик, чтобы наши услуги – научно-техническая продукция и услуги были более востребованы, чем услуги, предлагаемые конкурентами [3].

Чтобы стать более востребованными на рынке услуг, мы из числа возможных для себя (для нашей стратегии) принципов отобрали следующие основные направления развития и приоритеты:

1. Обеспечение развития и воспитание кадров высшей квалификации.

2. Достижение максимальной эффективности и высокого научно-технического уровня выполняемых НИОКР и обеспечение удовлетворенности потребителей.

3. Создание и внедрение современных научных знаний, технологий и инноваций в двигателестроении (машиностроении).

4. Создание современной материальной и информационно-технической базы, необходимой для эффективного ведения НИОКР.

5. Привлечение к решению поставленных задач научного и технологического потенциала отрасли.

6. Сочетание фундаментальных и прикладных исследований по всем направлениям деятельности.

7. Совершенствование управления научной и исследовательской деятельностью на основе принципов менеджмента качества.

Исходя из пирамиды целеполагания (см. рис. 1), одним из элементов реализации стратегии организации является Политика в области качества, которая, в свою очередь, является основой для установления целей организации и её подразделений.

Для того чтобы Политика в области качества стала действенным инструментом руководства по реализации стратегии, она доведена до сведения всего персонала организации, а основные положения Политики, цели и задачи, стоящие перед институтом в области качества, разъяснены сотрудникам на занятиях по основам менеджмента качества. Только в этом случае можно рассчитывать на поддержку со стороны персонала и его эффективное вовлечение в процесс достижения поставленных целей.

Политика организации, отражающая намерения и основные направления деятельности в области качества, сформулированная руководством института, приведена ниже.

Политика
в области качества ОАО «НИИТ»

– Высшая цель Политики ОАО «НИИТ» – уважение к Потребителю и удовлетворение его стремления приобрести продукцию с гарантированно высокими научно-техническими и потребительскими свойствами.

– Коллектив ОАО «НИИТ» видит свою главную задачу в закреплении и расширении своего присутствия на рынке сбыта научно-технической продукции и услуг, машиностроительной отрасли, гарантии полного удовлетворения потребностей Потребителя, с оптимизацией затрат и получением устойчивой прибыли.

o Политика в области качества реализуется каждым работником ОАО «НИИТ» от рабочего до генерального директора на всех этапах – от проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ до выпуска научно-технической продукции, путем неукоснительного выполнения всех требований Потребителя и действующих нормативных документов системы менеджмента качества, удовлетворяющей нормам МС ИСО 9001.

– При этом ОАО «НИИТ» гарантирует выполнение поставленной цели путем:

o обеспечения стабильного и высокого качества научно-технической продукции и услуг, которые отвечают требованиям потребителя и нормативной документации;

o постоянного совершенствования технологии и организации работ, связанных с обеспечением качества на всех стадиях выпуска научно-технической продукции;

o приоритетности в планировании, финансировании и материальном обеспечении всех работ, связанных с обеспечением качеством;

o установления долгосрочных взаимоотношений с партнерами на основе взаимопонимания и взаимовыгодного сотрудничества;

o создания условий и стимулов для постоянного повышения компетентности работников всех категорий;

o создания в институте рабочего климата, основанного на доверии, доброжелательности и совершенствовании производственных отношений, вовлечении и мотивации персонала в деятельность по обеспечению качества;

o соответствия СМК ОАО «НИИТ» требованиям МС ИСО 9001 и стандартов организации.

– Каждый работник несет ответственность за качество своей работы.

– Руководство ОАО «НИИТ» берет на себя ответственность за выделение ресурсов, необходимых для создания и непрерывного совершенствования системы менеджмента качества и повышения результативности.

Четко сформулированные и реализуемые стратегия и Политика организации в области качества являются залогом эффективного функционирования системы менеджмента организации.

Действенным “инструментом”, позволяющим руководству института ”держать руку на пульсе”, оценивать текущие риски и управлять ими, является постоянный мониторинг СМК, анализ результатов деятельности организации по всем направлениям заявленной стратегии и практика проведения “стратегических диалогов” с руководителями НИО института.

При этом автоматически реализуются и такие основные принципы менеджмента, как:

- ориентация на потребителя;
- лидерство руководства;
- вовлечение персонала;
- системный подход;
- непрерывное улучшение;
- принятие решений на основе фактов
- и др.

Реализация принципов, стратегии и политики организации в области качества в НИИТ дают возможность достичь значительного повышения эффективности выполнения НИОКР:

- снижение числа ошибок и уровня дефектности за счет предупреждения их появления;

- повышение удовлетворенности потребителей за счет мониторинга и постоянной обратной связи с потребителем;

- значительное сокращение внутрипроизводственных затрат за счет грамотного применения ”инструментов менеджмента”;

- повышение вовлеченности и ответственности персонала за качество и т.д.

Степень реализации стратегии, Политики и целей в области качества и зрелости системы менеджмента постоянно находится под контролем руководства института, что дает возможность оценивать уровень достижения целей организации и оперативно намечать пути улучшения, определять ресурсы, необходимые для дальнейшей реализации принятой стратегии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заянчковский Ю. И., Коновалов С. Н., Логинов В. А. Создание и сертификация системы менеджмента качества НИИ–залог успеха на рынке // Наука – производству/ НИИТ, Уфа, 2003.

2. Заянчковский Ю. И. Некоторые аспекты создания системы качественного менеджмента на основе стандартов ИСО// Наука–производству / НИИТ, Уфа, 2011.

3. Григорьев Л. Ю., Корышев И. И. Стратегия компании и цели в области качества // Методы менеджмента качества, №7, 2009.

УДК 658.562

Ю. И. Заянчковский (ЦКС “БАСК”)

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД – ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В ОРГАНИЗАЦИИ

Стратегия инновационного развития и устойчивого успеха организации предполагает функционирование системы менеджмента качества (СМК) на основе процессного подхода, гарантирующего удовлетворение потребителя за счет повышения качества и новизны продукции и повышение эффективности процессов создания продукции. В Руководстве ИСО 72:2001 [1] процессный подход определен в качестве базового инструмента при создании системы эффективного менеджмента, а в стандарте ИСО 9001:2008 [2] процессный подход сформулирован, как: «Применение внутри организации системы процессов совместно с идентификацией и взаимодействием этих процессов, а также их менеджмент, направленный на получение желаемого результата». Определение самого процесса согласно ИСО 9000-2005: «Процесс – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, преобразующих «входы» в «выходы».

Создание любого продукта всегда осуществляется через взаимодействия цепочки (сети) взаимосвязанных процессов. Поэтому в организации необходимо разработать свой оптимальный вариант процессно-ориентированной на потребителя системы

менеджмента, обеспечивающей управление процессами и их совершенствование на всех уровнях.

Главная проблема менеджмента на этом пути – превратить деятельность функционально разрозненных структурных подразделений во взаимосвязанные процессы (рис. 1).

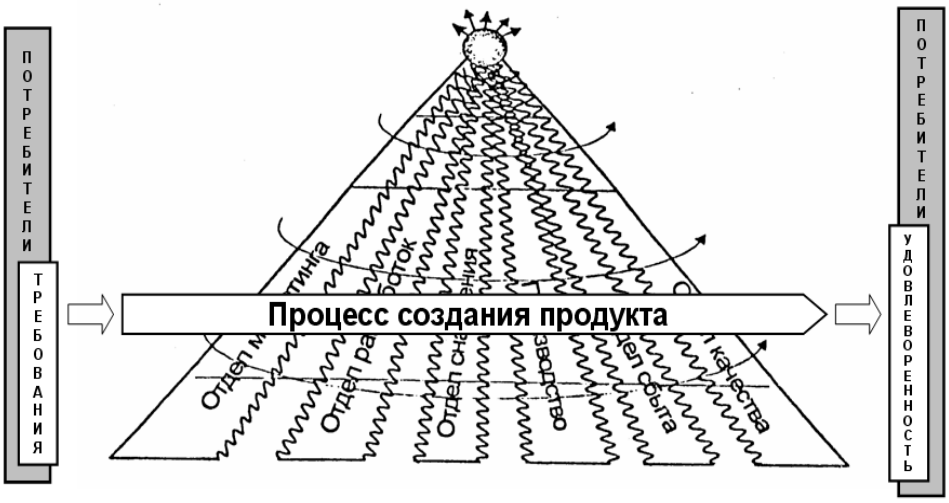


Рис. 1. Процесс создания продукта

Свидетельством процессно-ориентированной направленности системы менеджмента организации служит:

- горизонтальный менеджмент, пересекающий барьеры между функциональными единицами (см. рис. 1) и нацеливающий их усилия на главные цели организации, в т.ч. на повышение добавленной ценности и удовлетворение конечного потребителя;
- понимание сути и цели процессов работниками организации;
- измеримость критериев и целей процессов;
- управление процессами и вовлечение работников в достижение целей процессов;
- улучшение процессов.

В стандартах ИСО не существует единого для всех случаев перечня процессов, поэтому руководству организации, исходя из Политики и целей в области качества, необходимо осуществить выбор приоритетных для организации процессов, их документальное оформление (описание) и обеспечение соответствующего управления выбранными процессами. Необходимые рекомендации по применению данного подхода приведены в «Руководстве по концепции и использованию процессного подхода для систем менеджмента» (документ ISO/TC 176/SC2/N544R3 от 15.10.2008 г.) [3].

Руководству для реализации ключевых моментов по внедрению процессного подхода в организации необходимо:

- сформировать стратегические цели и показатели деятельности организации, ориентированные на потребителя;
- проанализировать цепочку создания ценностей;
- определить процессы, в т.ч. аутсорсинговые, необходимые для достижения поставленных целей;
- определить схему видов деятельности и взаимодействия процессов (модель СМК) и их место в новой структуре организации, ориентированной на процессы;
- определить приоритеты по процессам и технологии их реализации;
- установить однозначную систему лидерства, распределения полномочий и ответственности по процессам и внутри процессов;
- определить необходимую степень документированности и управляемости процессов;

- определить показатели (критерии) эффективности процессов и методики их измерения;

- осуществлять мониторинг и реализовать улучшения процессов.

При этом руководитель должен решить ряд следующих практических вопросов, связанных:

- с выделением видов деятельности, управляемых как процессы (критерии выделения, назначение и передача ответственности владельцам процессов, необходимость аутсорсинга);

- с организацией чёткого и согласованного взаимодействия (интерфейсов) видов деятельности и процессов, руководителей и исполнителей по процессам на основе принципа «поставщик-потребитель» по внутритехнологической цепочке;

- с определением количественных критериев, гарантирующих эффективность процессов;

- с определением необходимых ресурсов и информации, в т.ч. для проведения мониторинга процессов;

- с определением методов, средств изменения, мониторинга и управления (кто, что, где, когда, как, …) процессов;

- с непрерывным улучшением (кто, что, когда, как, …) процессов.

Здесь важно отметить, что структура (сеть) процессов, как правило, является первичной и более важной относительно организационной структуры [4]. **Сначала необходимо определить, какие процессы необходимы организации, затем – какие именно**

сотрудники требуются для реализации этих процессов и как их лучше сгруппировать в структурные единицы.

На практике любой процесс всегда является составным звеном в ряду других процессов производства. При этом необходимо четкое согласование выходов предшествующего процесса со входом последующего, т.е. реализуется важный принцип процессного мышления – ориентация не только на внешнего, но и на внутреннего по технологической цепочке потребителя.

Преимуществом процессного подхода является непрерывность управления, которое он обеспечивает по отношению к связям между отдельными процессами внутри системы, а также по отношению к комбинации этих процессов и их взаимодействию.

Установление последовательностью и взаимодействием взаимосвязанных процессов является ни чем иным, как системным подходом к менеджменту.

Алгоритм реализации процессного подхода в организации приведен в работе [5]. Сколько и какие виды деятельности следует рассматривать в качестве системных процессов, управляемых и улучшаемых согласно п. 4.1 ИСО 9001, каждая организация решает сама, исходя из своих конкретных целей и задач. Отправным моментом в этом случае может служить схема взаимодействия видов деятельности и процессов системы менеджмента (рис. 2), предложенная в [4].

Типичные для СМК процессы:

- процессы менеджмента организации (стратегическое планирование, коммуникации, риск-менеджмент, обеспечение наличия ресурсов, анализ со стороны руководства и другое);

- процессы создания продукции (все процессы, которые создают запланированные организацией результаты относительно качества продукции, процессов и пр.);

- процессы менеджмента ресурсов (управление персоналом, инфраструктурой, производственной средой, информационными потоками).

Возможный вариант представления схемы взаимодействия видов деятельности и процессов (модель СМК) приведен на рис. 2.

В качестве критериев для выбора процессов могут служить:

- влияние конкретного процесса на качество продукции;

- значимость данного процесса для достижения целей организации;

- добавленная (потребительская) ценность процесса;

- влияние на риск и степень (не)удовлетворенности потребителя;

- наличие требований к ключевым характеристикам продукции на выходе процесса или к самому процессу и т.д.

Следующим важным моментом реализации процессного подхода является описание выбранных процессов.

Грамотно составленное описание процесса служит основой для его реализации и последующего улучшения и является «настольной книгой» ответственного за процесс – владельца процесса.

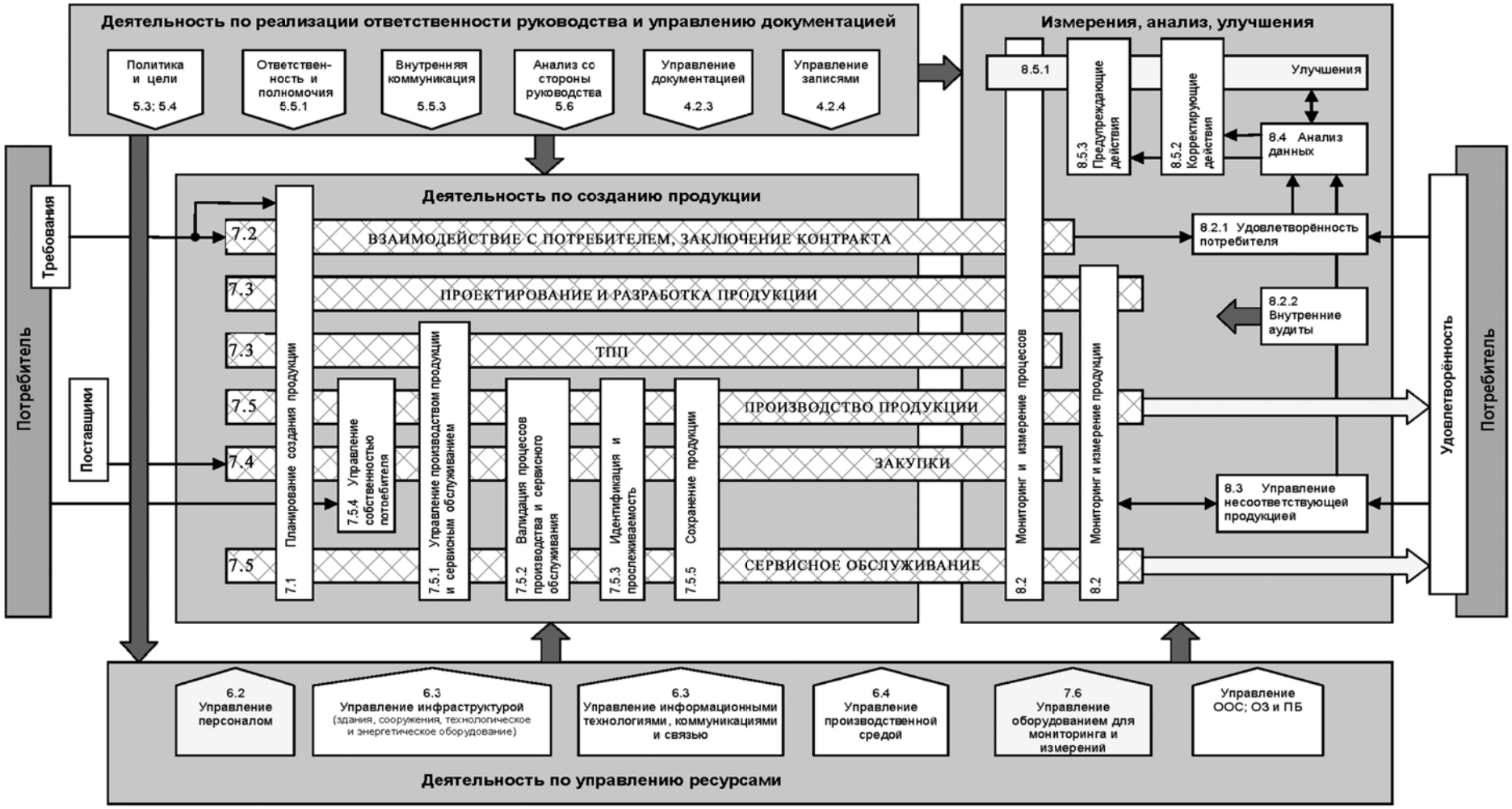


Рис. 2. Схема взаимодействия видов деятельности и процессов СМК

По требованиям стандартов ИСО для описания процессов предусмотрен лишь один обязательный документ – руководство по качеству (РК).

Однако, как правило, описание процессов оформляется отдельными документами.

При оформлении схем взаимодействия и описания процессов могут использоваться различные «инструменты»:

- текстовые документы (карты, паспорта и т.п.);
- диаграммы потоков и блок-схемы, алгоритмы;
- матричные диаграммы;
- семейство методологий функционального моделирования: IDEF0, DFD или ARIS TOOLS, Business Studio 3.6 и др.

Сопоставление различных «инструментов» описания процессов приведено в работе [6]. Описание (документирование) процессов строится исходя из требований п. 4.1 и п. 4.2.1 стандарта ИСО 9001.

Выбор объема, вида и глубины детализации описания процесса (документирование) определяется разработчиком СМК совместно с ответственным за процесс. Критерием здесь является уровень описания, достаточный и удобный для понимания и управления выполняемых операций всеми участниками процесса.

Документы должны быть лаконичными наглядными, составлены в расчете на уровень компетентности пользователя.

Одной из форм описания процесса может быть, например, «паспорт процесса» (карта, регламент процесса и т.п.), примерное содержание которого приводится ниже.

Паспорт процесса №____

_____

наименование процесса

1. Владелец процесса.
2. Цели процесса.
3. Краткое описание процесса.
4. Область применения.
5. Нормативные ссылки.
6. Термины, определения и сокращения.
7. Участники процесса.
8. Соисполнители процесса.
9. Описание процесса.

9.1. Входные потоки процесса и их поставщики.
9.2. Выходные потоки процесса и их потребители.
9.3. Управляющие воздействия.
9.4. Ресурсы.
9.4.1. Персонал.
9.4.2. Инфраструктура.
9.4.3. Производственная среда.

10. Показатели качества (критерии) процесса.
11. Управление (регулирование) процессом.

11.1. Методы и средства мониторинга изменения показателей процесса.
11.2. Анализ, оценка результативности процесса владельцем, действия по регулированию и улучшению процесса.

12. Виды деятельности и ответственность в рамках процесса/подпроцесса.
13. Взаимодействия участников и соисполнителей процесса.
14. Обязанности, ответственность и полномочия владельца процесса.

14.1. Обязанности владельца процесса.
14.2. Полномочия владельца процесса.
14.3. Ответственность владельца процесса.
14.4. Отчет владельца процесса.

15. Изменения, учёт, хранение и рассылка паспорта процесса.

Правила начертания диаграмм функциональных моделей отражены в Р50.1.028.2001 и имеют средства инструментальной программной поддержки. Например, пакет прикладных программ IDEFO, «VISION» и т.п.

Оптимальным вариантом оформления является сочетание текстовой, табличной и/или графической формы описания процесса. Пример возможного оформления первых девяти пунктов паспорта процесса «Технологическая подготовка процесса производства» приведен на рис. 3.

Управляющие воздействия							
Поставщик	Высшее руководство	Технический отдел	ОМК	ПДО,ПЭО	ОТиЗ	Отдел ОЗиТБ	Отдел экологии
Документ	Бюджет предприятия, ОРД (приказы, распоряжения и т.п)	Внешние НД: ГОСТ, ОСТ, ТУ и т.п.	Внутренние НД: СТП СМК, инструкции СМК и т.п.	Паны, графики: - по плодготовке производства - по производству и др.	Положения о подразделениях, ДИ, МРПО и пр.	Законы и норм. акты, инструкции по охране здоровья и безопасности труда	Законы и норм. акты по экологическому менеджменту

Поставщик	Входы
ПДО	Оперативные планы ТПП
ОГК	Исходная КД
ОП	Исходная Технологическая документация
ОГМех ОГМетр	Инфраструктура: - здания, сооружения - технологическое оборудование - технологическая оснастка - ОИ, ИО
ОГМех	Производственная среда
ОМТС, ОВК	Сырье и материалы
ОМТС ОК ОГМех ОГМетр ООТиПБ	Информация о: - сырье и материалах; - персонале производства Паспорта на: - обрудование - ОИ,ИО - рабочие места
ПЭО	Финансы

Процесс “Подготовка производства”

Выходы	Потребители
Верификационный и валидарированный комплект КД	Производственные подразделения
Откорректированные ТП и ТР	Производство
Утвержденные нормативы	Производство
Подготовленные здания и сооружения, отвечающие требованиям ТП	Производство
Подготовленные оборудование и технологическая оснастка, утвержденные графиком ППР	Производство
Подготовленный и аттестованный персонал	Производство
Производственная среда, отвечающая требованиям ТД и НД	Производство
Сырье, материалы, отвечающие установленным требованиям с сопроводительной документацией	Производство
Опытная партия продукции	Одтел сбыта
Отходы и ЗВ	Согласно договора со специализированной организацией
Информация о: - качестве продукции - качестве ТПП;; - качестве процесса; - компетентности персонала	Производство
Отчет о готовности производства к выпуску продукции	Производство

	Персонал ОТК, ОГТ, ПДО, ПЭО, ОТК, ОТиЗ, ООТиПБ, ОМТС, ОК	Оборудование, инструмент, оснастка	Электрооборудование, связь, коммуникации и пр.	ОИ и ИО	Производственная среда	Финансы
Поставщики	ОК	ОГМех	ОГЭ	ОГметр	ОТиЗ	ПЭО
Ресурсы						

Рис. 3. Схема процесса «Технологическая подготовка производства»

Как уже отмечалось, главная задача менеджмента отдельного процесса заключается в планировании, управлении и постоянном повышении его результативности и эффективности. Все это является обязанностью владельца процесса и его команды.

Основные задачи владельца процесса:

- определить границы процесса (по правилу Парето – 80% объема работы по преобразованию входа в выход должны выполняться в данном процессе);
- формирование целей и критериев процесса (по возможности, измеримых);
- проектирование потока процесса для достижения намеченных целей, идентификация специальных характеристик продукции и процесса;
- мониторинг, оценка и последующие улучшения процесса;
- введение в практику менеджмента процесса цикла PDCA (планируй – делай – контролируй – улучшай) и статистических методов, как инструментов непрерывного улучшения;
- распределение основных функций внутри команды и организация командной работы по улучшению процесса;
- вовлечение всех участников процесса в достижение целей и создание процедуры обмена информацией по вопросам результативности процесса внутри команды и в рамках СМК;
- защита интересов процесса при его пересечении с работой функциональных подразделений;

- оценка возможных рисков и последствий для потребителей и других заинтересованных сторон в случае недостижения целей процесса.

Вариант распределения функций внутри команды по процессу приведен ниже.

Владелец процесса – лидер команды, должностное лицо, осуществляющее стратегическое руководство процессом, и которое имеет в своем распоряжении персонал, инфраструктуру, программное и аппаратное обеспечение, информацию о процессе, управляет ходом процесса и его совершенствованием, несет ответственность за результаты и эффективность процесса, за отчетность по процессу.

Ответственный исполнитель, менеджер процесса – лицо, которое развертывает цели процесса на его составляющие среди исполнителей, определяет соответствие критериев и фактических показателей, проводит оперативное управление процессом, организует мониторинг, измерения и регулирование процесса и его изменение (при необходимости), обеспечивает владельца процесса оперативной информацией о состоянии процесса.

Аналитик процесса – лицо, которое осуществляет сбор и статистический анализ данных, ведет записи по процессу, оценку результативности процесса по всем его показателям (критериям), готовит сведения о состоянии процесса и предложения по его совершенствованию.

Поскольку реально управлять можно тем, что можно измерить, то фактором, в значительной степени влияющим на эффективность

функционирования и управления процессом, является установление измеримых показателей процесса и методик их оценки.

Подходы к выбору показателей процесса:

- адекватность, полнота и объективность;
- периодичность сбора и обработки данных;
- трудозатраты на сбор и обработку, отнесенные к ценности информации;
- охват качественных и количественных сторон процесса.

Исходя из требований п. 4.1 ИСО 9001 возможные показатели (критерии) процесса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества (критерии) процесса

Обозначения	Наименование данных	Установленное (измеримое) значение	Документ, устанавливающий требования к показателям	Методы и средства монито-ринга
Д1	Показатели результативности/эффективности процесса			
Д 1.1. Д 1.2. Д 1.3. Д 1.4. Д 1.5.	Производительность Себестоимость Безопасность Экологичность Энергоемкость			
Д2	Показатели качества продукции на выходе процесса			
Д 2.1. Д 2.2. Д 2.3. Д 2.5.	Уровень дефективности Значение ключевых характеристик Экологичность продукции Сдача с первого предъявления			
Д3	Показатели удовлетворенности потребителей процесса			
Д 3.1.	Рекламация			
Д 3.2.	Претензии от внутренних потребителей			

Далее владелец процесса организует работу команды по управлению процессом – обеспечение заданных характеристик (критериев) процесса и его дальнейшее улучшение.

Помнить, что **TEAM** (анг. – команда) также означает: «**T**ogether **E**veryone **A**ctieves **M**ore» – Вместе Каждый Достигает Большего.

Алгоритм управления процессом представлен на рис. 4.

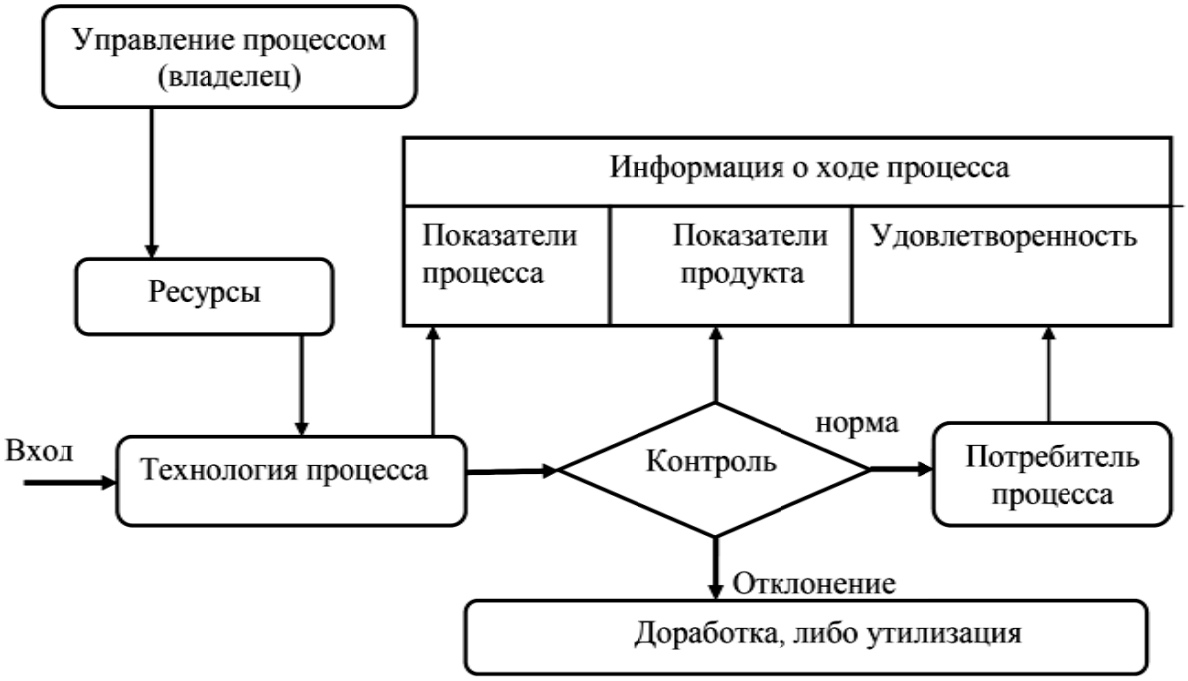


Рис. 4. Управление процессом

Для повышения эффективности управления процессом должны быть однозначно определены точки контроля (получение количественных) данных и значения параметров, характеризующих требуемое состояние процесса в этих точках.

Данные, получаемые в результате мониторинга, систематически (1 раз в месяц) обобщаются аналитиком процесса и заносятся в таблицу отчета по результативности процесса.

Пример формы отчета владельца процесса приводится ниже.

Отчет владельца процесса _____
наименование
по результатам мониторинга процесса за ____кв. 20__г.

Обозна-чения	Наимено-вание данных	Установленное значение	Фактически достигнутое значение				Оценка результативности
				I	II	р.	
Д1 Показатели результативности/эффективности процесса							
Д2 Показатели качества продукции на выходе процесса							
Д3 Показатели удовлетворенности потребителей процесса							

Примечание: графы 1, 2, 3 и значения показателей Дj берутся из паспорта процесса (см. табл. 1).

Количественная оценка интегральной результативности процесса рассчитывается как:

$$R_{\Sigma} = \left(\frac{\sum Д1j\%}{k} + \frac{\sum Д2j\%}{m} + \frac{\sum Д3j\%}{n} \right) / 3 = ___\%,$$

где Д1j, Д2j, Д3j – количественные показатели, определяемые либо прямым путем, как среднеарифметическое:

$$\frac{\text{фактическое значение} \times 100\%}{\text{установленное значение}},$$

либо – как субъективная оценка владельца процесса (если показатель не имеет количественной оценки);

k – число частных показателей Д1; *m* – число частных показателей Д2; *n* – число частных показателей Д3.

При $R_{\Sigma} \geq 95\%$ – процесс результативен, целесообразны улучшения;

$R_{\sum}$=85%–95% – процесс условно результативен, требуются улучшения и предупреждающие действия (при этом не должно быть частных показателей с оценкой «не результативен»);

$R_{\sum}$≤85% – процесс не результативен, требуются корректирующие действия.

Далее владелец процесса должен сделать выводы по фактической результативности процесса и дать предложения по его улучшению.

Выводы по приемлемости показателей процесса владелец процесса принимает на основании количественных данных интегральной оценки $R_{\sum}$ результативности процесса за отчетный период. Причем, если какой-либо частный показатель Дj «провалился», то, несмотря на высокий общий показатель $R_{\sum}$, делается вывод о не результативности процесса в целом. И, безусловно, в отчете в любом случае должны быть предложены мероприятия по улучшению процесса.

Кроме того, целесообразность количественной оценки $R_{\sum}$ обусловлена также необходимостью сравнения показателей результативности различных процессов СМК для их улучшения, начиная с наиболее «слабых звеньев».

Более того, важным аспектом менеджмента процессов является перенос основного внимания владельца процесса и его команды с допускового подхода к статистическому управлению качеством продукции на обеспечение стабильности процессов и уменьшение их вариации [7].

Реализация рассмотренного подхода к управлению процессами СМК позволяет организации решить как главную задачу-повышение эффективности организации в целом, так и следующие конкретные задачи:

- переход на программно-целевой метод управления, где объектом управления становятся бизнес-процессы, ориентированные на удовлетворение внутренних и внешних потребителей;
- перевод организации на «плоскую» процессно-ориентированную организационную структуру с малым количеством иерархических уровней и сокращением затрат на административно-управленческий персонал;
- развитие горизонтальных связей и укрепление межфункционального взаимодействия, повышающих гибкость и оперативность в принятии и выполнении решений;
- укрепление корпоративного и командного духа в организации за счет единства конечной цели для всех, принятия согласованных решений, мотивации и повышения ответственности каждого за принятое решение.

Но никакие заявления о «внедрении процессного подхода» не дадут реального эффекта, если в организации при этом «внедрении» ничего не изменяется ни в управлении, ни в структуре, ни в отношении к СМК и к процессному подходу со стороны руководства.

Проблемы, которые возникают при внедрении процессного подхода, чаще всего обусловлены следующими факторами:

- формальный подход к выбору процессов;
- отсутствие делегирования полномочий владельцам процессов;

- отсутствие вовлечения персонала и развития лидерства;
- отсутствие постоянно действующей системы обучения членов команд по процессам;
- отсутствие механизма мотивации качественного труда;
- проблемы измерения и анализа данных:
  - немотивированные и противоречивые показатели (измеримые критерии);
  - недостаточные знания в области сбора и анализа данных, статистических методов управления процессами;
  - отсутствие обучения сотрудников методам измерения и анализа данных;
  - данные измерений не принимаются руководством и владельцами процессов всерьез.

Критериями внедрения процессного подхода в организации являются:

- наличие описания и схемы взаимодействия видов деятельности и процессов (сети или карты процессов, модели СМК);
- назначение владельцев процессов;
- установление системы измеримых показателей результативности процессов;
- видимая деятельность каждого владельца процесса по циклу PDCA (планирование, деятельность, улучшения, отчетность и т.п.);
- система мотивации персонала за улучшения процессов;
- система анализа результативности и зрелости процессов со стороны владельцев процессов и высшего руководства, включая анализ рисков;

- регулярный анализ состава процессов, исходя из требований потребителей, направлений деятельности и стратегии организации.

Эффективность процессов в значительной степени зависит и от методически грамотного применения статистических методов при управлении качеством продукции и процессов [7].

Важным в процессном подходе к управлению организацией является не выстраивание «сквозных» межфункциональных процессов, а организация функционирования процессов в рамках СМК по принципу «поставщик-потребитель», ориентированному на потребителя (внутреннего и внешнего) и достижение целей организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. ИСО 72:2001 Руководящие положения для обеспечения и развития стандартов системы менеджмента.

2. ИСО 9001:2008 Системы менеджмента качества. Требования.

3. Руководство по концепции и использованию процессного подхода для систем менеджмента. Документ ISO/TC176/SC2/N544R3 от 15.10.2008.

4. Заянчковский Ю. И. Некоторые аспекты создания системы качественного менеджмента на основе стандартов ИСО // Наука – производству. Вып. 6/ ОАО НИИТ, Уфа, 2011.

5. Заянчковский Ю. И. Системы менеджмента качества по международным стандартам ИСО серии 9000. Теория и практика создания // Наука – производству. Вып. 2/ ОАО НИИТ, Уфа, 2003.

6. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004.

7. Заянчковский Ю. И. Управление процессами с применением статистических методов // Наука – производству. Вып. 4/ ОАО НИИТ, 2007.

УДК 334.012; 658.5

Ю. И. Заянчковский (ЦКС “БАСК”)

РИСК-МЕНЕДЖМЕНТ В СИСТЕМЕ ОБЩЕГО МЕНЕДЖМЕНТА ОРГАНИЗАЦИИ

Деятельность любой организации осуществляется в условиях воздействия на нее многих факторов и сопряжена с неопределенностями и многочисленными рисками, среди которых преобладают финансовые, производственные, кадровые, инфляционные риски в сфере управления и пр. Большинство рисков обусловлено чаще всего непредсказуемыми изменениями во внешней среде, слабым менеджментом, недостаточным уровнем технологии и, как следствие, низким качеством продукции.

Риски, воздействующие на организацию, могут иметь последствия общественного, экономического, экологического и технического характера, а также создать проблемы в области обеспечения безопасности. Неблагоприятному воздействию рисков может подвергаться социальная, культурная и политическая репутация организации.

Качественный уровень менеджмента при принятии управленческих решений определяющим образом влияет на последствия риска в деятельности организации.

Обеспечение стабильного и успешного функционирования организации требует создания системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности, т.е. создания и внедрения системы менеджмента рисков (СМР).

В определенной степени риск-менеджмент уже давно используется в отдельных системах менеджмента, как составная часть их требований. Например, в системе охраны окружающей среды по ИСО 14001, в системе охраны здоровья и обеспечения безопасности труда по OHSAS 18001 или в методике FMEA-анализа возможных отказов, вероятности их обнаружения и последствий от пропущенных дефектов для потребителя, которая широко применяется при разработке и постановке на производство новых видов продукции.

С целью оказания организациям помощи в системном и методически грамотном решении указанных и иных проблем международной организацией ИСО разработан и принят стандарт ИСО 31000:2009 «Риск-менеджмент. Принципы и руководство» [1], регламентирующий комплексное рассмотрение рисков всех направлений деятельности и всех подразделений организации. То есть, риск-менеджмент должен быть одной из основных функций высшего руководства и носить системный характер.

Главной задачей системы менеджмента риска является не исключение рисков, что в принципе невозможно, а управление ими на основе сбалансированного сочетания потенциальной выгоды и негативных последствий рисков и получение максимально возможной выгоды от складывающейся ситуации путем скоординированных действий по управлению рисками.

Риски могут иметь комплексный характер. Риск – это сочетание вероятности события и его последствий. Понимание комплексности рисков важно для выбора соответствующего метода управления

рисками и для выбора методик оценки риска. Примеры основных видов рисков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры основных видов рисков

Внутренние риски	Внешние риски
Стратегические риски: разработка и воплощение неверных бизнес-решений, неспособность управляющего аппарата принимать правильные решения с учетом изменений внешних факторов.	Политические риски: политическая нестабильность, изменение таможенной политики, риск географической нестабильности и государственного подчинения обязательствам.
Операционные риски: возникновение отклонений в информационных системах и системах внутреннего контроля, ошибки людей, недостаточность систем и средств контроля.	Регулировочные риски: риски тарифного и экологического регулирования в области безопасности, специфические налоговые риски, риски антимонопольного регулирования.
Технологические и технические риски: непреднамеренные сбои в работе технических систем, неверный выбор технологического оборудования, нарушения технологических процессов, нерегулярные профилактические работы и ремонт оборудования, потери в результате сбоев и поломок.	Рыночные риски: изменения стоимости капитала, риск влияния крупных транзакций на параметры рынка, финансово-экономические риски, изменения конъюнктуры рынка, цен на топливо и пр.

Система менеджмента риска, как один из компонентов системного менеджмента, подразумевает создание необходимой культуры и инфраструктуры бизнеса, предусматривающей внедрение процесса для гибкого и оперативного управления рисками.

Для этого руководство организации должно:

- определить временные рамки и стратегию внедрения СМР;
- разработать и применять политику риск-менеджмента;
- разработать и внедрить процесс риск-менеджмента;

• гарантировать соответствие принимаемых решений по результатам процесса риск-менеджмента;

• проводить ознакомительные и обучающие семинары по СМР для сотрудников;

• осуществлять коммуникацию по вопросам риск-менеджмента со всеми заинтересованными сторонами.

Основные этапы процесса риск-менеджмента согласно требованиям ИСО 31000 представлены на рис. 1.

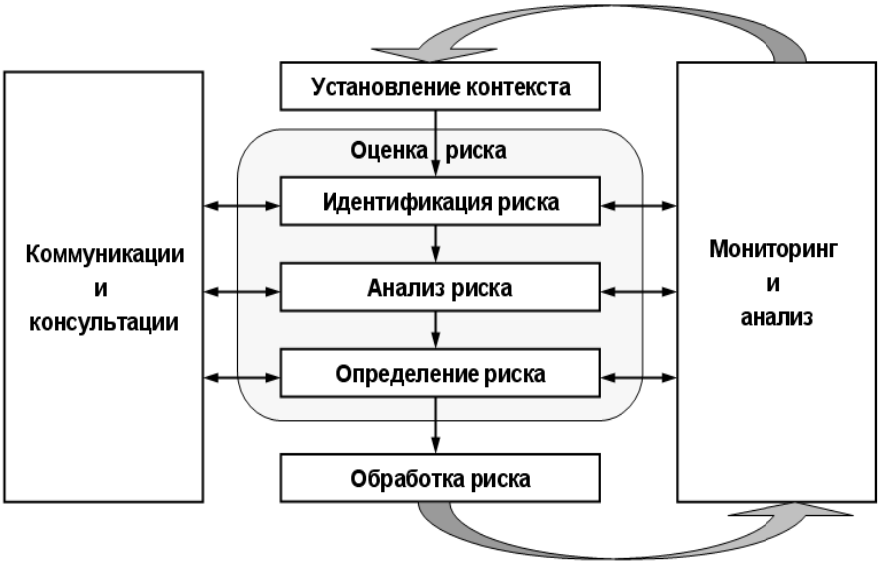


Рис. 1. Модель процесса риск-менеджмента

Структурные элементы (стадии), реализующие этапы процесса риск-менеджмента, приведены в табл. 2.

Причем, реализация всех указанных стадий процесса риск-менеджмента должна быть не разовым мероприятием, а повторяться циклически, т. е. стать объектом внимания высшего руководства и неотъемлемой частью системы общего менеджмента организации.

Таблица 2

Структурные элементы (стадии), реализующие этапы процесса риск-менеджмента

Стадия	Характеристика
1	2
1. Коммуникации и консультирование	На каждой стадии процесса риск-менеджмента необходимо взаимодействовать и проводить консультации как с внешними, так и с внутренними участниками этого процесса.
2. Определение контекста риск-менеджмента	Необходимо обозначить внешние характеристики предпринимательской среды, внутренние параметры организации, области потенциальных рисков, а также параметры риск-менеджмента, в которых будет реализоваться процесс. Должны быть определены требования к деятельности, на основании которых будут выявлены критерии рисков, а также структура и методы их анализа.
3. Идентификация рисков	Следует определить, где, когда, почему и как рисковые ситуации могут помешать, ослабить, задержать или благоприятствовать достижению запланированных результатов (целей).
4. Анализ рисков	Необходимо определить (количественно) последствия, вероятность возникновения и, следовательно, уровень риска, а также причины и факторы возникновения рисковых ситуаций. Подобный анализ должен учитывать масштаб потенциальных последствий и возможные пути их возникновения. При анализе рисков следует также выявить и оценить имеющиеся инструменты (модели и методы) контроля рисков.
5. Оценка рисков	Осуществляется сравнение уровня (числовых значений) риска, установленного в ходе анализа, с ранее установленными критериями. В соответствии с полученными данными и параметрами модели риск-менеджмента (см. стадию 1) определяется баланс между потенциальными выгодами и негативными последствиями. Это позволяет принимать решения о масштабе и характере рискового решения, управляющего воздействия на риск, а также устанавливать приоритетные направления деятельности, связанной с риск-менеджментом.

Окончание табл. 2

1	2
6. Принятие и реализация рискового решения (обработка риска)	Производится разработка и внедрение специализированных экономически целесообразных стратегий и планов мероприятий по модификации риска, цель которых – увеличение потенциальной выгоды и сокращение потенциальных издержек, возникающих впоследствии рисковых ситуаций, путем снижения вероятности и/или последствий риска.
7. Мониторинг и анализ	Необходимо проводить мониторинг и анализ эффективности всех этапов процесса управления рисками для постоянного улучшения деятельности. Результаты оформляются в виде отчета.

Оптимальной формой представления степени риска может служить матрица риска (RAM) (рис. 2), которая представляет две шкалы: последствия и вероятность риска и дает наглядное представление о рисковых зонах.

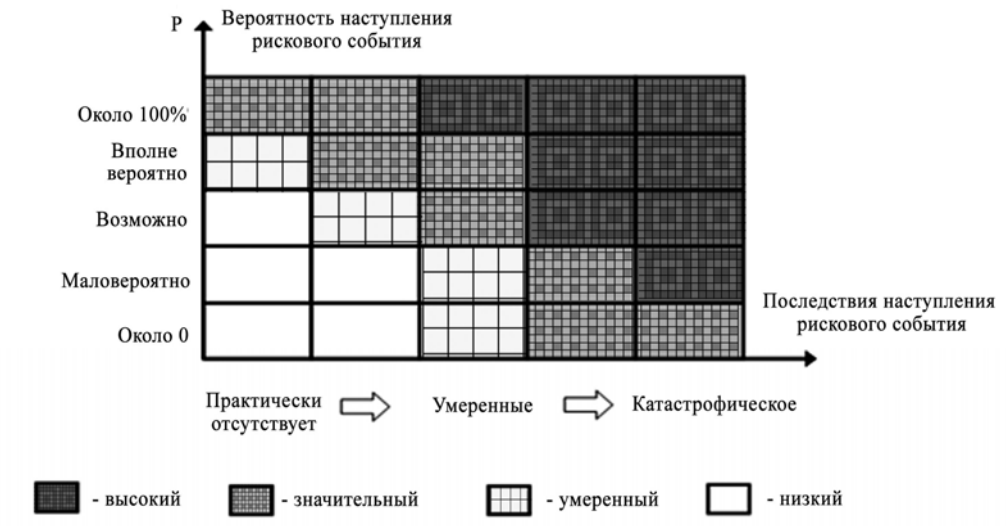


Рис. 2. Матрица анализа рисков (качественный анализ) – RAM

Количественная оценка степени может осуществляться по какой-либо из методик, приведенных в стандарте ИСО 31010 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» [2].

Критериями выбора конкретной методики могут быть:

- цели риск-менеджмента;
- потребности лиц, принимающих решения;
- тип и диапазон анализируемых рисков;
- потенциальная значимость последствий риска;
- потребность и обеспеченность квалифицированными экспертами, персоналом и иными ресурсами;
- наличие и качество информации и данных;
- наличие каких-либо обязательств и договоренностей.

По итогам оценивания рисков в организации формируются «Реестры уровней рисков» [3]. Возможная форма реестра приведена ниже.

Вид деятельности, процесс, операция	Значимость риска - W	Вероятность – P наступления рискового события	Показатель уровня риска R=W·P	Качественная характеристика уровня риска	Примечание

В простейшем виде показатель уровня (степени) риска: $R = W \cdot P$.

При 100-бальной системе оценок, если $0 \leq R \leq 2$ – риск незначительный, если $R > 2$ – риск значительный.

Исходя из результатов оценки уровня риска, осуществляется последующая процедура – обработка риска, включающая выбор и реализацию мер по снижению вероятности или последствий риска.

Чаще всего применяются следующие способы обработки риска:

Избежание (предупреждение, уклонение, митигация) риска путем принятия решения не начинать или не продолжать

деятельность, связанную с риском (не рисковать, если это возможно, и не рисковать большим ради малого, например, путем управления активами и пассивами).

Но: «Кто не рискует, тот не пьет шампанское».

Уменьшение (оптимизация) риска путем минимизации (устранения) негативных и/или максимальное использование позитивных последствий рисковых событий. Снижение риска за счет диверсификации, декомпозиции, распределение риска во времени или агрегирования риска и уменьшения вероятности наступления рисковых ситуаций с учетом критериев риска (технологических, финансовых, юридических, экологических, безопасности и др.).

Перенос (перераспределение, хеджирование) риска предусматривает разделение бремени потерь (или выгод) от риска, с другой стороны, путем передачи его (или части) тем лицам или организациям, которые лучше других могут контролировать риск (страхование, внешние заимствования, фьючерсы, аутсорсинг и др.).

Сохранение риска и принятие на себя страхового риска (бремени потерь или выгод от конкретного риска).

Вариант обработки риска (комбинации вариантов) выбирается на основе анализа затрат (ФСА) на обработку или устранение риска с учетом потенциальной выгоды от реализации возможных вариантов обработки.

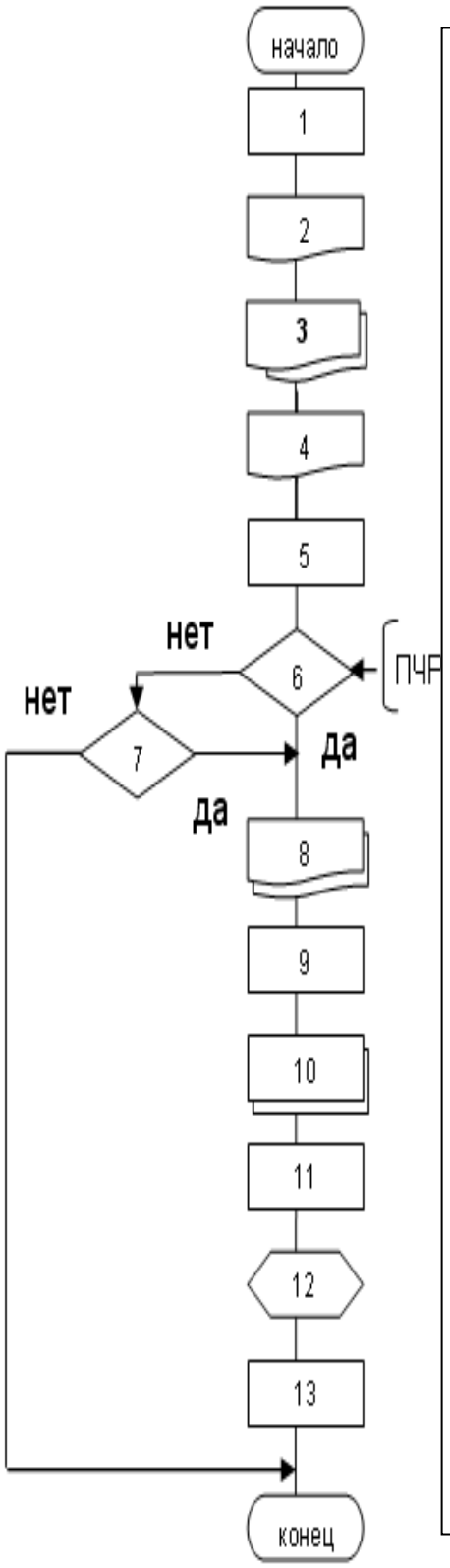
При этом следует иметь в виду, что *потери от отсутствия в организации риск-менеджмента могут быть и, как правило, бывают, несоизмеримо большими, чем затраты на его осуществление.*

Общий порядок идентификации рисков, на примере рисков, связанных с воздействием на окружающую среду (экологические аспекты) и опасностями для здоровья и безопасности труда, приведен в алгоритмическом виде на рис. 3.

Важно помнить, что неотъемлемой частью любой системы менеджмента, в т.ч. и риск-менеджмента, является мониторинг и анализ, результаты которого должны быть включены в общий анализ функционирования системы менеджмента организации и служить её улучшению. Данные мониторинга и анализа рисков должны документироваться.

Ответственность и основные функции персонала в системе менеджмента риска представлены на рис. 4.

Применение риск-менеджмента, согласно требованиям стандарта ИСО 31000, обеспечивает со стороны лиц, принимающих решения, и других ответственных сторон лучшее понимание характера выявленных рисков, их потенциального воздействия на достижение целей организации, а также уверенность руководства в адекватности и эффективности существующих средств управления рисками и организацией в целом [4].



1. Определение видов деятельности, технологий и производств с целью выявления экологических факторов, опасностей и рисков.

2. Идентификация экологических факторов, опасностей и рисков.

3. Составление исходного перечня возможных экологических аспектов (ЭА), реестра опасностей и рисков.

4. Установление критериев оценки воздействия экологических факторов, опасностей и рисков.

5. Расчет значимости (последствий), вероятности риска и уровня риска – приоритетного числа риска (ПЧР) по всем ЭА, опасностям и рискам.

6. Сопоставление результирующего уровня экологических аспектов, опасностей и рисков с установленным порогом риска – определение уровня значимости риска.

7. Анализ критичности ожидаемых частных показателей приоритетного числа риска.

8. Составление перечня (реестра) значимых ЭА и реестра значительных опасностей и рисков.

9. Определение последствий от воздействия значимых ЭА и значительных опасностей и рисков.

10. Разработка, согласование и утверждение целей и мероприятий по снижению уровня риска (обработка риска).

11. Реализация планов и мероприятий по снижению уровня риска до приемлемого уровня.

12 Мониторинг выполнения мероприятий по снижению уровня риска.

13. Периодический пересмотр перечня и критических значений рисков в области ООС, ОЗиОБТ. Анализ, оценка и документирование результатов управления рисками.

Рис. 3. Общий порядок управления рисками

Рис. 4. Участники процесса риск-менеджмента и их функции

Таким образом, внедрение системы менеджмента риска, как неотъемлемой части корпоративной системы менеджмента, позволяет обеспечить стабильное и устойчивое развитие организации, повысить обоснованность принятия решений в рискованных ситуациях и улучшить финансовое положение за счет осуществления всех видов деятельности в управляемых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. ИСО 31000:2009 «Риск-менеджмент. Принципы и руководство».
2. ИСО 31010 «Менеджмент риска. Методы оценки риска».
3. Свиткин М. З. Формирование системы менеджмента риска компании// Методы менеджмента качества. 2010. №2.
4. Представитель руководства по вопросам качества в организации. Менеджер качества// Методическое пособие для руководителей и специалистов/ ООО «ЦКС «БаСК», 2012.

УДК 331.13; 331.021.811

Ж. М. Кадырова (ОАО НИИТ), Н. А. Сухова (УГАТУ)

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРУДОЁМКОСТИ

Процесс управления производственным процессом представляет собой непрерывную разработку управленческих решений и применение их на практике. От эффективности разработки этих решений в значительной степени зависит успех дела. Одним из факторов, который может быть достаточно интересным с точки зрения анализа состояния производственного процесса, является трудоёмкость.

Трудоемкость продукции является очень важным комплексным показателем, который обобщает затраты труда в процессе производственной деятельности предприятия и его подразделений в существующих экономических отношениях. На самой первой стадии – стадии создания проекта какого-либо нового изделия весьма сложной задачей является определение трудоёмкости. Такое происходит в силу того, что технология еще не разработана, и нормирования операций ещё не проводилось. Потребность в анализе и прогнозировании трудоемкости возникает и не только на стадии перспективных проектов, а также на стадии существующего производства. Единого универсального метода прогнозирования не существует. В связи с огромным разнообразием прогнозируемых ситуаций имеется и большое разнообразие методов прогнозирования.

В данной статье предлагается разграничение методов прогнозирования трудоемкости по степени формализации (рис. 1) [1].

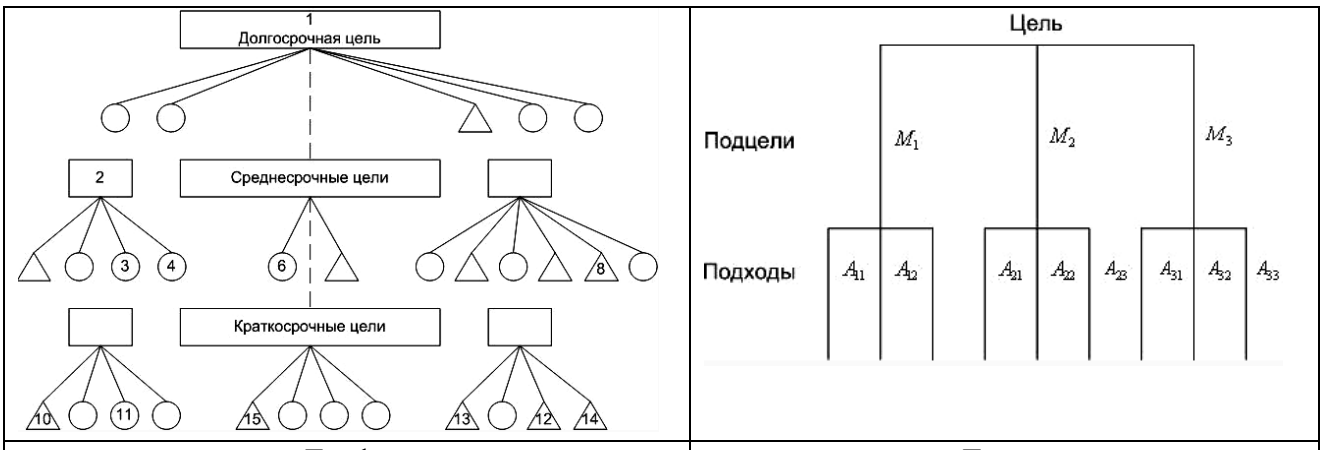
Количественные (формализованные) методы представляют собой формализованное описание исследуемого процесса (объекта) в виде математических зависимостей и отношений. Среди них различают системно-структурные, экстраполяционные, математические и ассоциативные методы прогнозирования.

Системно-структурные методы предполагают, с одной стороны, рассмотрение системы в качестве динамически развивающегося целого, а с другой, – расчленение системы на составляющие структурные элементы и рассмотрение их во взаимодействии. Схемы таких видов системно-структурных методов, как графы целей и дерево решений, представлены на рис. 2.

Этапы системно-структурных методов:

- Формулировка глобальных целей и ориентировочных количественных оценок средств, необходимых для достижения подцелей.
- Составление уточненного списка промежуточных целей, которые указывают отношения подчиненности, подцели второго уровня.
- Построение графов, ветвей или уровней.
- Построение прогнозного графа, ветвей, уровней, для чего рассчитываются числовые характеристики исполнения целей с использованием математической логики и теории вероятности.

Рис. 1. Классификация методов прогнозирования



Графы целей	Дерево целей

Рис. 2. Схемы системно-структурных методов

Экстраполяция основана на анализе сложившихся в прошлом и настоящем закономерностей развития изучаемого экономического явления и распространения их на будущее. Предполагается, что основные соотношения, пропорции и темпы роста, характерные для данного явления, с большой степенью вероятности без существенных изменений могут иметь место в перспективе [2].

Этапы методов экстраполяции:

- Предварительная обработка и преобразование исходных данных с целью проверки их «качества» для облегчения выбора оптимального вида функций и выравнивания временного ряда, определения функций дифференциального роста, а также формального и логического анализа особенностей процесса.
- Выбор оптимального вида функции, описывающей эмпирический ряд.
- Расчет параметров выбранной экстраполяционной функции.
- Построение прогноза и анализ его адекватности по полученной на предыдущем этапе функции.

Следующая методика, позволяющая установить определенные количественные закономерности, характеризующие развитие – ***математическое моделирование***. Оно дает качественную оценку значимости отдельных показателей, отражающих воздействие различных факторов. Проанализируем последовательность и содержание этапов экономико-математического моделирования:

- Постановка экономической проблемы и ее качественный анализ. Выделение важнейших черт и свойств моделируемого объекта и абстрагирование от второстепенных; изучение структуры объекта и основных зависимостей, связывающих его элементы; формулирование гипотез (хотя бы предварительных), объясняющих поведение и развитие объекта.

- Подготовка исходной информации. Моделирование предъявляет жесткие требования к системе информации. В то же время реальные возможности получения информации ограничивают выбор моделей, предназначаемых для практического использования. При этом принимается во внимание не только принципиальная возможность подготовки информации (за определенные сроки), но и затраты на подготовку соответствующих информационных массивов. Эти затраты не должны превышать эффект от использования дополнительной информации.

- Построение математической модели. А именно формализации экономической проблемы, выражения ее в виде конкретных математических зависимостей и отношений (функций, уравнений, неравенств и т.д.).

- Математический анализ модели. Целью этого этапа является выяснение общих свойств модели. Здесь применяются чисто математические приемы исследования.
- Численное решение. Этот этап включает разработку алгоритмов для численного решения задачи, составления программ на ЭВМ и непосредственное проведение расчетов. Трудности этого этапа обусловлены, прежде всего, большой размерностью экономических задач, необходимостью обработки значительных массивов информации.
- Анализ численных результатов и их применение. На этом заключительном этапе цикла встает вопрос о правильности и полноте результатов моделирования, о степени практической применимости последних [3].

Ассоциативные методы выявляют факторы влияния и включают эту информацию в уравнения, которые можно использовать для прогнозирования. При построении модели ассоциативными методами можно выделить следующие основные этапы исследования:

- Формулировка проблемы.
- Выбор информационных характеристик объекта.
- Построение математической модели или нейросети функционирования системы.
- Составление и отладка программы для ЭВМ или нейросети, включая и разработку процедур моделирования различных случайных факторов.

- Планирование имитационных или нейросетевых экспериментов.
- Проведение экспериментов и обработка результатов исследования.

Существуют случаи, когда невозможно учесть влияние многих факторов из-за значительной сложности объекта прогнозирования, или наоборот, объект слишком прост и не требует проведения трудоемких расчетов. В таком случае применяются ***интуитивные (качественные) методы***, которые базируются на интуитивно-логическом мышлении. Они бывают индивидуальными и коллективными. Этапы интуитивных методов:

- Подготовка к разработке прогноза (формулировка задачи).
- Анализ ретроспективной информации, внутренних и внешних условий (поиск специалистов, информации, содержащиеся в информационных массивах, накопленных за два и более лет и т.д.).
- Определение наиболее вероятных вариантов развития внутренних и внешних условий.
- Проведение метода.
- Разработка альтернативных вариантов.
- Априорная и апостериорная оценка качества прогноза.
- Контроль хода реализации прогноза и корректировка прогноза.

Любая методика не является совершенной, в каждом подходе есть плюсы и минусы. В табл. 1 представлены преимущества и недостатки всех методов, рассмотренных выше.

Таблица 1

Преимущества и недостатки методов прогнозирования

Степень формализации	Метод	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4
Количественные	Системно-структурные	Наглядность, простота, визуализация при относительно небольшом количестве элементов системы. Низкие временные и стоимостные затраты.	Трудность интерпретации и наглядности при большом количестве причинно-следственных связей. Низкая точность.
	Экстраполяции	Относительная простота. Представляет собой учет опыта прошлого как действия объективных законов развития процесса.	Низкая точность и достоверность, вероятностный характер, невозможность применения в условиях изменчивой среды, при появлении новых влиятельных факторов.
	Математические	Применимы как на макро, так и на микроуровне. Учитывают такие характеристики поведения экономических систем, как изменчивость (динамичность), противоречивость поведения, тенденция к ухудшению характеристик, подверженность воздействию окружающей среды.	Невозможность адекватного оценивания в условиях недостаточности информации или плохого её «качества». Трудность выбора оптимального количества факторов в модели.
	Ассоциативные	Позволяют анализировать более широкий спектр задач. Существует возможность усложнения задачи. Реалистичность, высокая точность модели.	Достаточно сложные в построении и интерпретации. Большие временные и стоимостные затраты на программирование, отладку моделей и проведение экспериментов. Слабость средств моделирования. Отсутствие поддержки русского языка.
Качественные	Индивидуальные	Позволяет максимально использовать способности и знания каждого специалиста при слишком сложном или слишком простом объекте прогнозирования.	Малопригодны для прогнозирования наиболее общих стратегий из-за ограниченности знаний одного специалиста-эксперта о развитии смежных областей науки.

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Качественные	Коллективные	Позволяет более подробно и всесторонне увидеть картину в силу привлечения специалистов различного профиля.	Сильное влияние авторитетов на мнения большинства участников экспертизы, в трудности публичного отказа от своей точки зрения и в ряде других факторов психофизиологической совместимости.

Из всего вышеприведенного анализа существующих методов прогнозирования можно сделать вывод, что ни один из методов «в чистом виде» не может иметь максимально адекватную картину, потому что каждый метод имеет свои недостатки, которых нет у другого. Поэтому качественные методы целесообразно использовать в сочетании с количественными методами для повышения точности прогнозов. В прогнозировании существуют смешанные методы, которые являются комбинацией различных методов, рассмотренных выше. Разграничение методов прогнозирования по степени формализации является не единственным, но данный способ разграничения в нашем случае является наиболее подходящим именно для прогнозирования трудоемкости.

При современных условиях функционирования рыночной экономики, невозможно успешно управлять производством без эффективного прогнозирования его деятельности. От того, насколько прогнозирование будет точным, своевременным и соответствующим поставленным проблемам, будут зависеть, в конечном счете, работа и, как следствие, прибыли, получаемые предприятием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громова Н. М., Громова Н. И. Основы экономического прогнозирования: учеб. пособие. М.:// Академия Естествознания, 2006. Режим доступа: http://www.rae.ru/monographs/10
2. Жукова Е. Ф. Международные экономические отношения. М.: ООО // ИЗДАТЕЛЬСТВО ЮНИТИ-ДАНА, 1999. http://www.bibliotekar.ru
3. Бизнес-планирование и Информационные системы и технологии. Математическая поддержка подготовки принятия решений. Информационный бизнес-портал, 2012. Режим доступа: http://market-pages.ru/infteh/45.html

УДК 6658.5

В. В. Никитин, В. С. Теплов, А. А. Тормышев (ОАО УМПО)

ОРГАНИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ «БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА»

Актуальность темы проектов международной кооперации

В условиях глобализации Россия становится полноправным участником мирового рынка, где происходит международное разделение труда, усиление роли транснациональных компаний, активизация процессов международной кооперации и специализации в сферах производства и НИОКР, формируются интернациональные производственные комплексы и глобальные межфирменные сети. Развитие проектов международной кооперации (ПМК) является наиболее актуальным для нашей промышленности, которая работает в сложных условиях многономенклатурного производства и жесткой

конкуренции в секторе высоких технологий (производство авиационных двигателей является самым высокотехнологичным производством в мире). Международная промышленная кооперация не только позволяет получать новые конкурентные преимущества, экономить ресурсы, распределять риски, но и ускоряет продвижение предприятия на новые рынки, создает базу для привлечения инвестиций и освоение передового опыта развития производственной системы между участниками кооперации [1, 2].

На основе вышеуказанного, основной целью развития ПМК является повышение конкурентоспособности продукции и усиление своих конкурентных преимуществ на мировом рынке. Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих шагов во взаимодействии с успешными участниками мирового рынка:

1) субконтрактинг;

2) переработка давальческого сырья;

3) реализация совместных проектов;

4) совместное производство (на основе распределения программ, на основе специализации) в долгосрочной перспективе;

5) подготовка квалифицированных кадров и исследовательского персонала;

6) обмен научно-техническими достижениями, патентами и т.д.;

7) создание совместного предприятия по изготовлению деталей и узлов для авиационных двигателей.

Проблема. Однако в настоящий момент в российской системе управления проектами не существует механизма выбора организационного и производственного типа ПМК, который бы помог избежать ошибок на этапах реализации проектов с учетом практических особенностей в условиях российской промышленности, отличных от зарубежных. Принятый в системе управления проектов свод знаний Project Management Body of Knowledge (PMBOK) также основан на зарубежной теории управления [3].

Цель. Таким образом, целью исследования авторов является создание механизма для организации ПМК на базе существующих производственных и организационных структур промышленности России, но в соответствии с международными требованиями (одним из которых, в том числе, является освоение принципов «бережливого производства» и инструмента «точно в срок»), выставляемыми российским компаниям со стороны зарубежных партнеров.

План работ по ПМК

Работы по ПМК подразумевают создание организационного механизма реализации промышленной кооперации (табл. 1) и механизма определения формы производственной и организационной структуры проекта с последующим разделением на стадии реализации [4].

Таблица 1

Организационный механизм реализации проекта международной кооперации

Элементы	Итоговые документы	Исполнители
1. Оценка готовности предприятия к ПМК. Определение целей, вида и формы ПМК на основе анализа базовых требований зарубежного партнера	SWOT-анализ	Специалисты предприятия по внешнеэкономическим и маркетинговым вопросам
2. Поиск и выбор партнера	Справка на партнера	Руководители, специалисты предприятия по внешнеэкономическим и маркетинговым вопросам
3. Уточнение формы ПМК. Предварительная экспертиза международной промышленной кооперации	Отчет	Руководители предприятий-партнеров, специалисты предприятий-партнеров по финансовым и маркетинговым вопросам
4. Документальное оформление ПМК, распределение рисков и затрат между партнерами	Протоколы, соглашения (договоры) о международной промышленной кооперации	Руководители предприятий партнеров, специалисты предприятий-партнеров по финансовым, правовым и внешнеэкономическим вопросам
5. Подготовка к реализации международной промышленной кооперации: решение технико-экономических вопросов, организация работы персонала	Отчет о маркетинговых исследованиях, бизнес-план, акты, бюджеты и др.; приказ о создании рабочей группы, планы работ, отчеты	Руководители предприятий-партнеров, рабочие группы предприятий-партнеров, включающие специалистов по внешнеэкономическим, маркетинговым, правовым, производственным, финансовым вопросам, переводчика
6. Реализация международной промышленной кооперации	Статистические справки	Рабочие группы предприятий-партнеров, включающие специалистов всех уровней
7. Оценка эффективности между-народной промышленной кооперации	Отчет	Рабочие группы предприятий-партнеров, включающие специалистов по финансовым и внешнеэкономическим вопросам
8. Анализ результатов и выработка мер по повышению эффективности международной промышленной кооперации	План корректирующих мероприятий	Руководители предприятий-партнеров

В зависимости от факторов, влияющих на затраты по реализации проекта, предлагается определить механизм организации производственной структуры для рассматриваемого проекта (рис. 1-2). Для решения вопроса о размещении производства или организации специализированного участка, предметно ориентированного подразделения необходимо, прежде всего, учитывать два фактора:

1. Технологическая сложность (технологичность) готовой продукции (например, комплектующие или полуфабрикаты являются в большинстве случаев не столь сложными с технологической точки зрения продуктом, сколько агрегат или узел авиационного двигателя);
2. Производственная программа (сумма контракта) и прогнозируемый период времени проекта (с учетом стратегического развития и расширения выпускаемой продукции по проекту).

Рис. 1. Механизм определения производственной и организационной структуры проекта

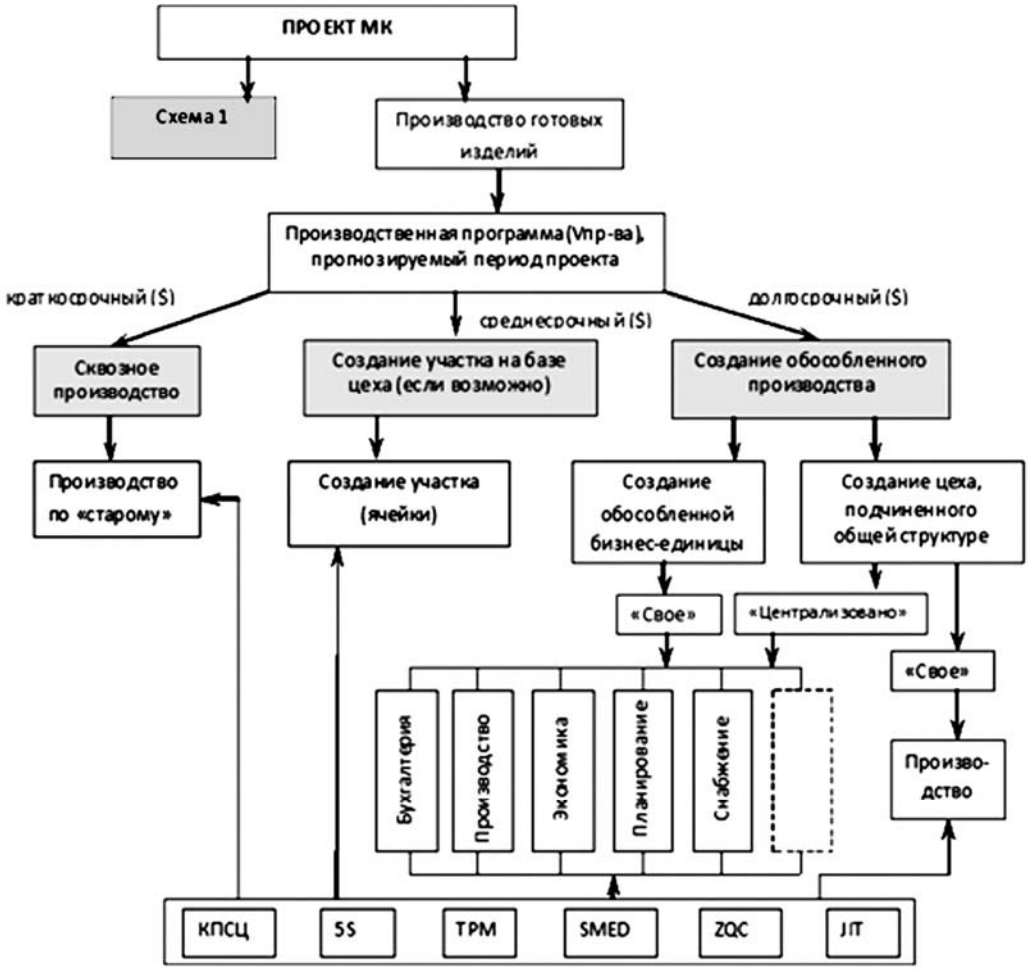


Рис. 2. Механизм определения производственной и организационной структуры проекта при производстве готовых изделий

Для того чтобы определить производственную структуру, сначала необходимо рассмотреть проект с точки зрения технологической сложности готового продукта:

1. В зависимости от технологической сложности (узлы в сборе или просто комплектующие) целесообразно рассматривать возможность организации сквозного производства для полуфабрикатов и комплектующих на основе специализации цехов. При данном варианте затраты на подготовку производства минимальны и не включают затраты на покупку нового оборудования.

2. Однако необходимо учесть коэффициент загрузки оборудования в цехе, к которому предполагается прикрепление новой номенклатуры. В случае невозможности закрепления номенклатуры за цехом, ввиду отсутствия свободных мощностей, необходимо рассмотреть два варианта развития проекта. Первый предусматривает покупку оборудования для производства деталей по проекту, второй – создание при многономенклатурном производстве обособленного подразделения. Выбор структуры производства представлен на рис. 2.

При производстве технологически сложных деталей (узлы, агрегаты) в зависимости от производственной программы (суммы контракта) и прогнозируемого периода времени проекта рассматриваются четыре варианта, в зависимости от вариабельности вышеуказанных факторов:

I. Если проект предполагает сотрудничество в краткосрочной перспективе, а производственная программа незначительная (определяется экономическими службами объединения), то не имеет целесообразности выделения отдельных производственных мощностей для производства номенклатуры под данный ПМК. То есть данную номенклатуру предполагается распределять по цехам, в соответствии с их специализацией. Следует учесть, что при данной форме организации проекта возникают сложности в отношении ведения объективного учета затрат. Существующая система учета не позволяет адекватно оценивать себестоимость изделий на уровне управления проектами.

II. В случае проекта, предполагающего по контракту сотрудничество в среднесрочной перспективе и наличия значительных планируемых объемов производства, целесообразна организация участка (ячейки) для производства закрепленной номенклатуры по проекту. В данном варианте возникает необходимость в дополнительных инвестициях в оборудование и подготовку участка (ячейки) помимо затрат на изготовление оснащения, обучения персонала, конструкторско-технологических разработок и др. Положительным моментом в организации отдельного участка, предназначенного для производства заказов для партнеров по кооперации, будет являться упрощение процесса отслеживания производства отдельных партий, сокращение межоперационных пролеживаний и, как итог, сокращение цикла производства и повышение качества.

III. Третий вариант проектов включает в себя план развития в долгосрочной перспективе, имеет обособленное и замкнутое производство (имеющее на «входе» поток сырья и материалов и обеспечивающее «выход» готовых узлов и агрегатов), но поддерживающие процессы (бухгалтерия, планирование, финансы, снабжение т.п.) остаются за объединением.

IV. Четвертый вариант проектов также рассчитан на долгосрочный план развития и подразумевает освоение производства нескольких семейств деталей для поставки в адрес партнера по ПМК. При таком проекте наиболее целесообразна организация дивизиона, специализирующегося на производстве для ПМК. Такой дивизион (или комплекс) должен представлять собой обособленную бизнес-

единицу, имеющую свои подразделения по планированию, ведению учета затрат и т.д. Каждая из этих бизнес-единиц должна отвечать за одно семейство деталей и иметь замкнутый и самодостаточный цикл производства (на примере автаркии) [5]. Данный вариант позволит упростить организационную структуру на уровне управления бизнес-единицей и выявить потери при производстве продукции, с целью их устранения [6].

Основным моментом для всех четырех форм проекта будет являться выстраивание структуры производства на принципах «бережливого производства», с включением в процессы таких инструментов как:

- **КПСЦ** (карта потока создания ценности) – отображение всех процессов и стадий производства, которые добавляют и не добавляют ценности конечному продукту, с целью сокращения процессов, не добавляющих ценность;

- **5S –** система организации рабочего места, которая позволяет значительно повысить производительность труда, эффективность и управляемость операционной зоны, улучшить корпоративную культуру и сохранить время;

- **TPM** (всеобщее обслуживание оборудования) – в основном служит улучшению качества оборудования, ориентировано на максимально эффективное использование благодаря всеобщей системе профилактического обслуживания;

- **SMED** – это набор теоретических и практических методов, которые позволяют сократить время операций наладки и переналадки оборудования до десяти минут;

- **ZQC** – инструмент повышения качества производственного процесса, который используется операторами на своих рабочих местах;

- **JIT** (производство продукции «точно в срок», с использованием инструмента «канбан») – наиболее распространенная в мире логистическая концепция. Основная идея концепции JIT заключается в следующем: если производственное расписание задано, то можно так организовать движение материальных потоков, что все материалы, компоненты и полуфабрикаты будут поступать в необходимом количестве, в нужное место и точно к назначенному сроку для производства, сборки или реализации готовой продукции.

После выбора формы производственной и организационной структуры проекта необходимо определить стадии реализации выбранной формы проекта (рис. 3-4).

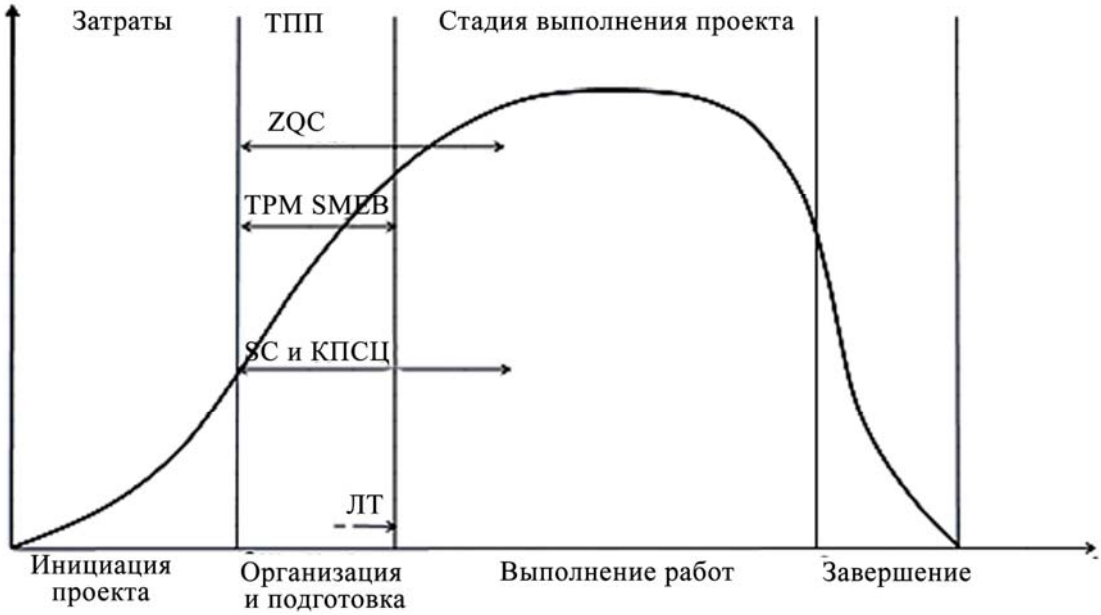


Рис. 3. Стадии реализации ПМК при организации обособленного производства

Проект, при котором предполагается организация обособленного производства, подразумевает на стадии разработки и подготовки включение инструментов «бережливого производства» в разрабатываемые технологические и производственные процессы, что позволит экономить ресурсы при освоении вышеуказанных инструментов и предотвратит возникновение потерь, так называемый «бережливый подход».

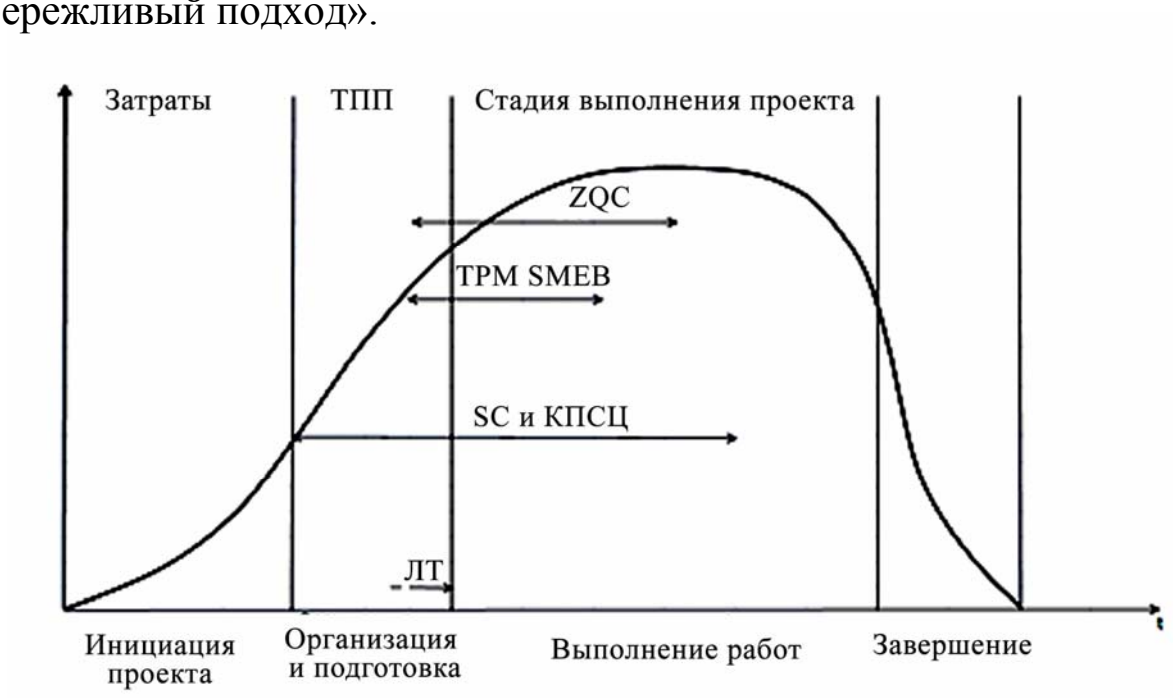


Рис. 4. Стадии реализации ПМК при организации участка и встраивания «сквозного» производства

В данном варианте освоение инструментов «бережливого производства» будет затруднено вследствие их встраивания в уже функционирующую систему, таким образом, из-за сокращенного периода ТПП произойдет сдвиг на графике вправо.

В свою очередь стадии разбиваются на пункты, требующие выполнения для перехода к следующей стадии реализации проекта:

1. Стадия инициации проекта:

- позиционирование компании на мировом рынке;

- поиск партнера и заключение контракта;

- анализ производственных возможностей по реализации проекта;

- разработка бизнес-плана ПМК (маркетинговый, производственный, финансовый, инвестиционный планы).

2. Организация и подготовка:

- разработка конструкторской и технологической документации (разработка технологического процесса и необходимого оснащения). На данном этапе встраивается инструмент «ZQC» при проектировании оснащения и приспособлений;

- расчет потребностей в оборудовании и его закупка, с учетом инструментов «бережливого производства» TPM и SMED, для обеспечения быстрого переключения с выпуска одного вида продукции на другой;

- анализ наличия «свободных» площадей для размещения производства под проект и согласование планировки рационального размещения оборудования в соответствии с принципами «бережливого производства» 5С и КПСЦ;

- анализ наличия трудовых ресурсов и организация рабочей группы по ПМК с предварительным обучением персонала принципам «бережливого производства» и ознакомлением с производственной системой партнера, с целью заимствования положительного опыта в производстве продукции.

3. Стадия выполнения проекта:

- производство опытной партии изделий;

- улучшение (или корректировка) условий производства, разработка оптимальных предложений по сокращению издержек;

- выход на производство серийной продукции.

4. Завершение проекта.

После определения алгоритма реализации ПМК и выполнения его стадий необходимо отделить опытную партию после начала ее производства от серийной, и по показателям экономической эффективности производства опытной партии провести анализ целесообразности изготовления номенклатуры ПМК серийно. В противном случае, на основе полученных данных разработать корректирующие мероприятия по снижению затрат при выходе на производство продукции серийно.

Вывод

Данный механизм с практической точки зрения направлен на облегчение принятия решения об организации производства по ПМК и типе организационной и производственной структуры проекта. То есть определить еще до начала этапа технологической подготовки производства наиболее эффективный тип организации с «вложением» в него принципов «бережливого производства».

С теоретической точки зрения данная работа авторов позволяет выделить и систематизировать тип организации ПМК в зависимости от заданных параметров ПМК, что до настоящего момента в российской системе управления проектами, в том числе на уровне свода знаний PMBOK не было сделано.

Встраивание «бережливого производства» в проект МК уже на стадии разработки бизнес-плана помогает не только выбрать правильную стратегию развития проекта, но и позволяет уже на стадии его реализации получить следующие преимущества по сравнению с классической системой производства:

- сокращение логистических издержек за счет рационального проектирования производственных участков и корпусов и размещения на них оборудования с учетом организации поточного производства (что позволит сократить лишнюю транспортировку ДСЕ до 15 раз);

- сокращение простоев оборудования за счет организации поточного производства и равномерного выравнивания производства (по различным примерам от 10 до 50 %);

- сокращение цикла производства за счет внедрения системы «точно в срок» на основе канбанов до 2-х раз;

- увеличение производительности оборудования и пропускной способности за счет оптимальной загрузки до 50% (в том числе и на основе применения теории ограничения системы (ТОС));

- сокращение складских помещений за счет снижения уровня НЗП и запасов до 2-х раз;

- повышение качества выпускаемой продукции;

- более короткие сроки поставки продукции и, как следствие, более высокая удовлетворенность заказчика (партнера).

ЛИТЕРАТУРА

1. Джеффри К. Лайкер «Дао Тойота». М. 2006.
2. Грейсон Д. мл., О'Делл К. Американский менеджмент на пороге XXI века: Пер. с англ. М., 2001. С. 20.
3. Там же. С. 42.
4. Попов А. В. Теория и организация американского менеджмента. М., 2001. С. 14.
5. Тейлор Ф. У. Принципы научного управления. М. 2005. С. 10.
6. Хойер В. Как делать бизнес в Европе. М, 2000. С. 69.

УДК 658.588

М. П. ГАЛИМОВА (УГАТУ)

ИННОВАЦИОННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ АКТИВАМИ (НА ПРИМЕРЕ ТОиР)

Сегодня функциональная стратегия технического обслуживания и ремонтов оборудования является ключевой стратегией управления производственными активами промышленного предприятия, позволяющей на основе эффективного выполнения физических функций и оптимизации затрат на их реализацию, повысить стоимость предприятия и укрепить его конкурентные позиции в стратегической перспективе.

Традиционно, повышение надежности работы оборудования прямо связано с объемом затрат на ее обеспечение. Эффективность системы техническим обслуживанием и ремонтом оборудования

(ТОиР) оценивалась по величине предотвращенного ущерба от простоев и аварий. Такой подход к управлению привел к тому, что сегодня вспомогательные и обслуживающие функции являются дорогостоящими и неэффективными. Анализ показывает, что затраты, связанные с ТОиР в промышленности, составляют от 10 до 15% в структуре себестоимости, при этом уровень производительности труда в ремонтных подразделениях отстает в 3–5 раз от уровня основных цехов [1].

Выявлено, что негативно влияют на рентабельность производства:

- избыточность оборудования в сфере технического обслуживания и ремонта, где занято более трети станочного парка предприятий, а средства, затрачиваемые на ремонт оборудования за время его эксплуатации, превышают стоимость нового оборудования более чем в 5-6 раз;

- избыточность вспомогательного и обслуживающего персонала, их удельный вес в структуре работающих предприятия составляет от 25 до 40%;

- нерациональная структура инвестиций в активы, когда ежегодные затраты на капитальный ремонт промышленного оборудования достигают 25–30% инвестиций, из них 30% приходилось на ремонт техники, эксплуатируемой за пределами нормативного срока службы. С учетом затрат на текущий ремонт их суммарный объем составляет 50–60% валовых капитальных вложений;

- избыточность запасов материально-технических ресурсов на ТОиР и страховых запасов готовой продукции на случай срыва поставок.

Исследования показывают, что удельные затраты на ТОиР значительно превосходят мировой уровень, достигая в отраслях материального производства до 10% от стоимости основных фондов, в то время как в США аналогичный показатель не превышает 2,5%, в Японии – 1,2%, в Германии – 3%.

Данные негативные тенденции усиливаются и связаны:

- с высоким уровнем износа оборудования и соответственно с высоким уровнем его аварийности и простоев;

- с высоким уровнем технической сложности вновь вводимого оборудования, в том числе и иностранного производства. Так, увеличение на 1% категории сложности оборудования приводит к росту затрат на неплановые и аварийные ремонты в среднем на 8–10%;

- с низким уровнем технико-эксплуатационных показателей оборудования, обусловленные его конструктивными и технологическими характеристиками. Улучшение этих показателей еще на стадии проектирования на 25% позволяет уменьшить объем ремонтных работ в процессе эксплуатации на 40–45%. Повышение срока службы металлорежущего оборудования до первого капитального ремонта до 7–9 лет позволяет при существующих темпах обновления станочного парка осуществлять не более 1-2 капитальных ремонтов за весь срок службы оборудования.

Специалисты утверждают, что 1/3 роста затрат на ТОиР закладывается еще на стадии проектирования [2];

- с ростом нарушений условий эксплуатации оборудования.

Ключевой причиной возникновения излишних и непроизводительных затрат на управление производственными активами является неэффективная система организации и управления ТОиР. Это привело к тому, что устойчивой тенденцией сегодня является опережение роста затрат на ремонт по сравнению с темпами обновления основных фондов, с темпами роста выпуска продукции, что тормозит инновационное развитие промышленного предприятия, тормозит внедрение высоких технологий.

В ходе исследования выявлены следующие проблемы в организации системы ТОиР на промышленных предприятиях:

- темпы обновления основных фондов ремонтных подразделений отстают существенно от темпов развития основных цехов, так как финансирование оснащения и обновления осуществляется по остаточному принципу;

- технический уровень, уровень инновационности технологий и оборудования низкий из-за традиционно сложившейся практики оснащать вспомогательные и обслуживающего цеха отслужившим в основных цехах оборудованием и технологиями;

- растущая диспропорция между темпами роста затрат на обеспечение надежности оборудования и темпами роста требуемого уровня его качества из-за использования устаревших технологий ТОиР и неразвитости эффективных методов и средств технической

диагностики оборудования для уточнения сроков вывода оборудования в капремонт;

- неравномерная загрузка оборудования ремонтных цехов, длительный производственный цикл из-за игнорирования принципов рациональной организации производственных процессов – параллельности, прямоточности, пропорциональности, гибкости, ритмичности, непрерывности;

- дорогостоящая, нерентабельная система планово-предупредительных ремонтов (ППР), не соответствующая современным требованиям обеспечения надежности высокотехнологичного оборудования – оперативности, гибкости, экономичности;

- устаревшая нормативная база ППР, ее несоответствие техническому уровню вновь вводимого отечественного оборудования, невозможность ее интеграции с нормативной базой для оборудования иностранного производства;

- избыточные страховые запасы ресурсов вследствие неточных оценок риска выхода из строя оборудования и оценок тяжести ущерба;

- высокий уровень рекламаций и претензий потребителей – основных цехов по качеству работ по ТОиР. Так, нарушение регламента технического обслуживания увеличивает потребность в запасных частях в 1,5–2,5 раза;

- высокий уровень текучести кадров, недостаточный уровень квалификации из-за неэффективной системы мотивации персонала ремонтных подразделений;

- разбалансировка производственных и экономических целей системы ТОиР, несоответствие стратегическим целям развития предприятия и другие.

Эти проблемы являются следствием утраты компетенций в области управления системой ТОиР. Очевидно, что в современных условиях, эффективность технического обслуживания определяется не объемом ресурсов, а способностью менеджмента компетентно ими управлять.

Таким образом, перед руководством промышленных компаний стоит важная задача в области организации технического обслуживания и ремонтов – максимизация надежности работы оборудования при минимизации затрат на содержание. Решение этой задачи требует оптимизации программы ТОиР на основе использования таких современных методов управления производственными активами, как:

- ремонт по техническому состоянию оборудования;
- совмещение системы ППР с ремонтом по состоянию;
- обслуживание, ориентированное на надежность – RCM;
- планирование на основе оценки рисков – RBM;
- оценка экономической эффективности воздействий на оборудование – NPV, IRR, PI, DPB;
- контроль общей эффективности оборудования (OEE), фондоотдачи, использования мощностей;
- концепция процессного управления (BPM).

Ориентируясь на минимальные затраты, предприятия сегодня отказываются от системы планово-предупредительных ремонтов (ППР), которая основывается на таких принципах, как:

- чем старше оборудование, тем выше вероятность поломки;
- накопленная статистика позволяет рассчитать среднее время работы оборудования – нормы периодичности ремонтов;
- планирование основано на упреждающем профилактическом воздействии.

Из этих принципов вытекают и недостатки: усредненные и устаревшие нормативы; большая трудоёмкость профилактических работ; значительная численность ремонтного персонала; нет гарантии безотказной работы оборудования.

Обслуживание по техническому состоянию базируется на следующих положениях:

- отказы оборудования возникают из-за дефектов, а не срока работы;
- большинство дефектов имеют свои диагностические параметры;
- контроль и прогноз изменения параметров позволяет прогнозировать возможные технические неисправности;
- для каждого контролируемого параметра прописаны «критические» точки, при достижении которых требуется принятие ремонтных воздействий (расчет критической даты).

Таким образом, переход с ППР на ремонты по состоянию позволяет:

- увеличить межремонтный ресурс;

- сократить объем ремонтных работ;
- значительно снизить стоимость обслуживания активов.

Но полный отказ от ППР может повлечь возникновение проблем, связанных с особо важным технологическим оборудованием с очень высоким риском выхода из строя из-за невозможности точно оценить его техническое состояние. В связи с этим, совершенствование системы ТОиР требует оптимального совмещения системы ППР с ремонтом по состоянию.

Модель выбора оптимальной системы сочетания ППР с обслуживанием по техническому состоянию (ОТС) представлена в табл. 1 [7].

Таблица 1

Совмещение системы ППР с обслуживанием по техническому состоянию

Система ТОиР	Особо важное технологическое оборудование (лимитирующее, повышенной опасности, не имеющее резервов)	Прочее технологическое оборудование (при наличии резервов)	Вспомогательное оборудование
Объект	ППР	ППР	ОТС
Сроки	ППР	ОТС	ОТС
Объем работ	ОТС	ОТС	ОТС

В качестве эффективного инструмента оптимизации затрат и повышения эффективности ТОиР менеджмент промышленных предприятий также рассматривает аутсорсинг этих функций. Такую практику активно применяют зарубежные компании – более 50%

компаний используют аутсорсинг в производстве, более 40% – в обслуживании оборудования. В российской практике менее 10% применяют аутсорсинг в целях обеспечения ТОиР [3]. Согласно теории кризисов развития компании по Грейнеру [4], рост доходности компании начинается с выделения и усиления специализированных подразделений, с развитием компетенций в специальных функциональных областях. С этих позиций, аутсорсинг является инструментом оптимизации компетенций организации, и, как следствие, ведет к минимизации затрат и к росту качества выполнения функции.

Как и любое управленческое решение, аутсорсинг оценивается с точки зрения уровня риска и возможностей (табл. 2). Побуждающей причиной внедрения аутсорсинга является необходимость качественного выполнения специальных функций.

Для оценки целесообразности использования аутсорсинга в западной практике часто используют следующую схему, разработанную компанией «Price Waterhouse Coopers» [4, 6] (табл. 3).

Оценка важности является прерогативой руководства предприятия. Действие «Реорганизовать» предполагает возможность в краткосрочном периоде отдать функцию на аутсорсинг, а в долгосрочном периоде – возврат под контроль предприятия. Действие «Необходимо обсуждать» предполагает множество решений: продажа, расширение и предоставление услуг другим организациям, аутсорсинг, расширение профиля.

В российской практике используется также матрица Е. Митрофановой, опирающейся на критерии качества и стоимости (табл. 4) [4, 5, 6].

Таблица 2

Возможности и риски аутсорсинга *

Возможности	Риски
1. Фокусирование на основном виде деятельности. 2. Доступ к внешним ресурсам и фондам, которыми не располагает предприятие. 3. Снижение себестоимости функций, передаваемых на аутсорсинг. 4. Снижение рисков за счет коллективных инвестиций. 5. Повышение качества выполнения функции. 6. Отсутствие необходимости иметь в наличии мобилизационные активы, инвестировать во второстепенные направления деятельности. 7. Минимизация зависимости от субъективных причин приостановки бизнес-процессов (болезнь сотрудников, конфликт). 8. Повышение производительности труда за счет концентрации на главных направлениях и более эффективного использования живого труда. 9. Привлечение «коллективного» интеллекта, изучение и трансляция передового опыта. 10. Диверсификация риска. 11. Доступ к новейшим технологиям.	1. Потеря контроля над переданными функциями. 2. Утрата компетенций вследствие их длительного невоспроизводства. 3. Проблема координации участников процесса создания ценности. 4.Утечка информации, увеличение затрат на обеспечение информационной безопасности. 5.Снижение качества функции при недобросовестности аутсорсера. 6.Появление зависимости от партнера, особенно если ему переданы важные функции или функции, связанные с оборотом денежных средств. 7. Усложнение логистических процессов и рост логистических издержек. 8. Социальная напряженность и открытое сопротивление персонала, передаваемого на сторону. 9. Ущерб имиджу. 10. Угроза отрыва руководящего звена от бизнес-практики. 11. Ограничение возможностей для обучения и роста своих специалистов 12. Использование поставщиком устаревших технологий, списывание старых основных средств и т. п.

*Обобщено на основе [2–6].

Таблица 3

Модель анализа аутсорсинга по критериям «Стратегическая важность – Конкурентная важность»

Тип операций	Стратегическая (высокая важность)	Нестратегическая (низкая важность)
Конкурентная (высокая важность)	Оставить, как есть. Улучшать. Развивать.	Реорганизовать. Необходимо обсуждать
Неконкурентная (высокая важность)	Реорганизовать	Аутсорсинг

Таблица 4

Модель анализа аутсорсинга по критериям «Качество – Стоимость»

Тип операций	**Высокая стоимость**	**Равная стоимость**	**Низкая стоимость**
Высокое качество	Развитие или аутсорсинг	Развитие	Выделение из бизнес-модели
Равное качество	Аутсорсинг	Развитие или аутсорсинг	Развитие
Низкое качество	Аутсорсинг	Аутсорсинг	Развитие или аутсорсинг

Оценка стоимости качества функции определяется как отношение стоимости и качества функции внутри предприятия к аналогичной услуге на рынке. В результате матрица делится на 9 сегментов, каждому из которых соответствует одно из четырех решений:

1) аутсорсинг – отказ от услуг собственных подразделений и приобретение их на рынке;

2) развитие – совершенствование бизнес-функции в сторону повышения качества услуг или снижения себестоимости;

3) развитие или аутсорсинг – вариант, при котором возможны оба решения;

4) выделение – бизнес-функция является конкурентоспособной и может быть выделена в отдельный бизнес для получения дохода.

Для принятия обоснованного решения требуется детализация оценок. Такая детализация применяется в модели Д. Хлебникова [5] – оценка по двум основным факторам и трем уровням по критериям стратегической важности компетенции и уровнем компетенции по сравнению с предлагаемой на рынке (табл. 5).

Таблица 5

Матрица аутсорсинга Д. Хлебникова

Тип операций	Конкурентоспособность и компетентность		
	Хуже	Также	Лучше
Стратегическая важность высокая	Учиться. Развивать компетенции. Сотрудничать, вступать в альянсы с лидерами в отрасли.	Развивать компетенции и инвестировать в персонал.	Защищать компетенции и активы. Выделять в самостоятельный бизнес.
Стратегическая важность средняя	Сокращать. Покупать услуги у лидера отрасли. Аутсорсинг.	Детализировать анализ. Переходить на другое поле.	Выделить дочернее зависимое общество. Диверси-фицировать.
Стратегическая важность низкая	Ликвидировать. Покупать услуги у лидера отрасли Аутсорсинг.	Ликвидировать. Покупать на рынке. Аутсорсинг.	Выделить дочернее зависимое общество. Развивать бизнес.

В отношении ТОиР можно применить различные схемы аутсорсинга:

1) частичный аутсорсинг, при котором функции технического учета, и планирования ремонтов сохраняется на предприятии, а функции исполнения ремонтов передаются на аутсорсинг;

2) полный аутсорсинг, при котором все функции передаются на сторону;

3) полный аутсорсинг в дочернее зависимое общество с превращением в инжиниринговую бизнес-единицу, при котором на аутсорсинг передаются и инжиниринговые функции предприятия (табл. 6).

Таблица 6

Схема распределения функциональной ответственности ТОиР

Функции ТОиР	Собственные силы		Частичный аутсорсинг		Полный аутсорсинг		Создание инжиниринговой бизнес-единицы	
	П	А	П	А	П	А	П	А
Координация	+		+		+		+	
Технический учет	+		+			+		+
Обоснование и планирование	+		+			+		+
Исполнение	+		-	+		+		+
Инжиниринг	+		+		+			+

П – предприятие, А – аутсорсер.

Таким образом, использование инновационных инструментов реализации функциональной стратегии технического обслуживания и ремонтов оборудования промышленного предприятия позволит повысить эффективность управления производственными активами

за счет повышения качества выполнения функций, за счет оптимизации затрат. В стратегической перспективе это приведет к росту стоимости предприятия и укрепления его конкурентных позиций в инновационной экономике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Погорелова Л. В. Ремонтное производство – как фактор интенсификации производства /www.cfin.ru/

2. Кондратьев В. В., Кушнарев А. В. Управление производством. Операционные улучшения: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2010.

3. Кондратьев В. В., Мухатдинов Н. Х. Управление производством. Техническое обслуживание и ремонты оборудования: учеб. пособие. – М.: ИНФРА – М, 2010.

4. Иванов И. Н. Организация производства на промышленном предприятии: учебник.– М.: ИНФРА − М, 2009.

5. Митрофанова Е.П. Как оптимизировать бизнес-модель компании (www.cfin.ru).

6. Шабаловская Т. В., Петрушкин С. И. Матрица аутсорсинга на основе зависимости уровня сервисного подразделения нефтегазовой компании и стадий развития сервисного рынка (www.markgroup.ru).

7. Корпоративные системы «Галактика» (www.toro.galaktika.ru).

УДК 658.5

Н. А. Сухова (УГАТУ),

А. С. Семенов, Ж. М. Кадырова (ОАО НИИТ)

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА

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 технического перевооружения и технологического переоснащения 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 исследований в области управления техническим перевооружением на основе использования

технологического аудита еще недостаточно. Проблемы технического перевооружения и технологического аудита 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», наличие различных трактовок 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 его проведения.

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 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.

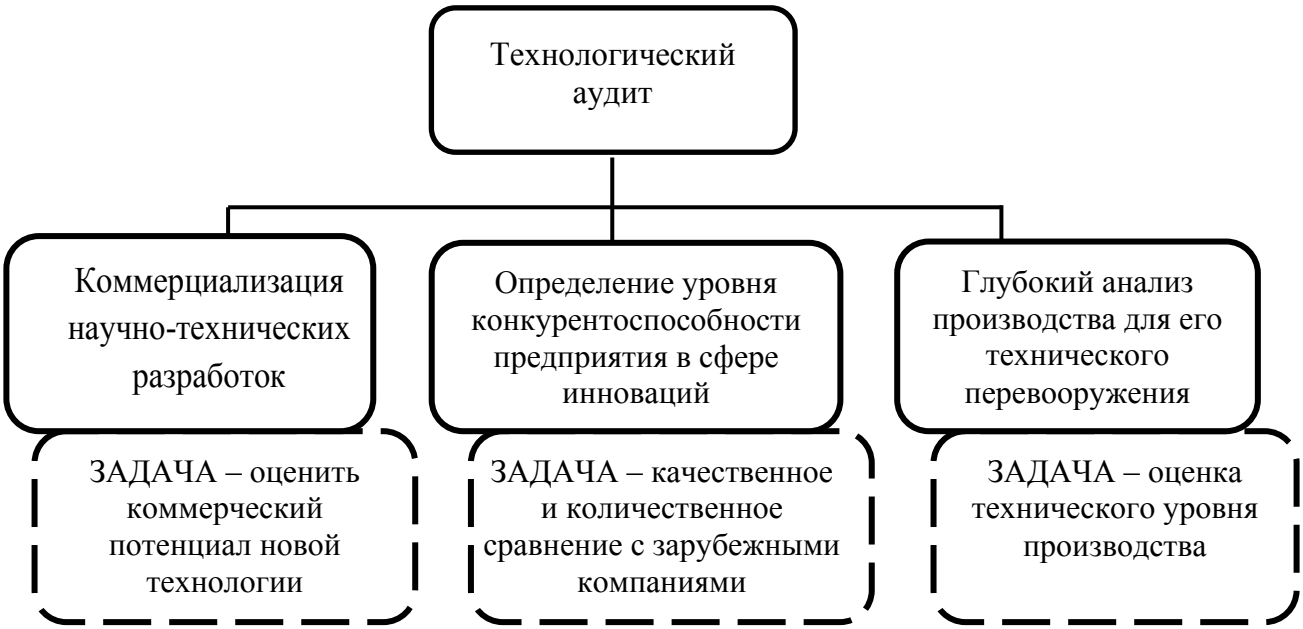


Рис. 1. Варианты трактовок понятия технологический аудит

При проведении технологического аудита с целью оценки конкурентоспособности предприятия в сфере инноваций рассчитываются показатели финансирования и результативности НИОКР, технологического лидерства, эффективности инновационной деятельности, 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.

В данном контексте под технологическим аудитом понимается независимая экспертная оценка эффективности организации производства и его потенциала, а также выработка рекомендаций по увеличению данной эффективности.

При проведении технологического аудита с целью определения технического уровня и разработки мероприятий по повышению эффективности производственной системы решаются следующие задачи:

- определение научно-технического уровня производства и оценка его влияния на результаты работы;
- оценка степени эффективности организации труда и управления производством;
- поиск резервов и возможностей совершенствования, повышения организационно-технического уровня;
- установление соответствия происходящих изменений требованиям перспективного развития предприятия, потребностям рынка, конкурентным возможностям;
- выявление уровня предприятия по критерию конкурентоспособности и др.

Понимание технологического аудита как ряда процедур, представляющих собой проверку технологических методов, и приемов, используемых в организации с целью оценки их производительности и эффективности и нацеленных на повышение

технико-экономических показателей действующего предприятия, является на сегодняшний день более востребованным и важным для развития производства.

Опубликованные на сегодняшний день работы по технологическому аудиту не дают системной методики, позволяющей осуществить глубокий анализ производства для его технического перевооружения.

В данной работе рассматриваются методические особенности проведения технологического аудита производства, основанного на оценке технического уровня по трем группам аналитических показателей: показатели состояния организационно-технического уровня производства, показатели объема внедрения и показатели экономической эффективности его совершенствования.

Первая группа показателей характеризует качество и прогрессивность продукции, состояние техники и технологии, организации производства, труда и управления.

Вторая группа показателей характеризует величину внедрения прогрессивных элементов производства.

Третья группа показателей (производительность труда, фондоотдача, материалоотдача, оборачиваемость оборотных средств, рентабельность) дает комплексную характеристику экономического уровня производства и экономической эффективности повышения организационно-технического уровня производства.

Предлагаемый методический инструментарий определения технического уровня производства включает в себя три этапа.

На первом этапе производятся расчеты показателей, сгруппированных в три группы аналитических показателей: показатели состояния организационно-технического уровня производства, показатели объема внедрения и показатели экономической эффективности его совершенствования. Оценка каждого объекта исследования при определении технического уровня производства производится с помощью группового показателя, расчет которого осуществляется как среднегеометрическая величина из частных (аналитических) показателей.

На втором этапе рассчитываются обобщающие интегральные показатели, характеризующие достигнутый уровень развития производства по каждой из групп. Для получения интегральных оценок исходные величины каждого из показателей приведены к сопоставимому виду, пригодному для сравнения, с использованием метода балльных оценок.

Обобщающая оценка технического производства производится с помощью интегрального показателя, расчет которого осуществляется как среднегеометрическая величина из частных (аналитических) показателей.

На основании полученных обобщающих интегральных показателей строится графическое представление технического уровня производства в виде радарной диаграммы как по объектам исследования (рис. 2), так и в целом по производству.

На третьем этапе создается трехмерная модель оценки технического уровня производства (рис. 3).

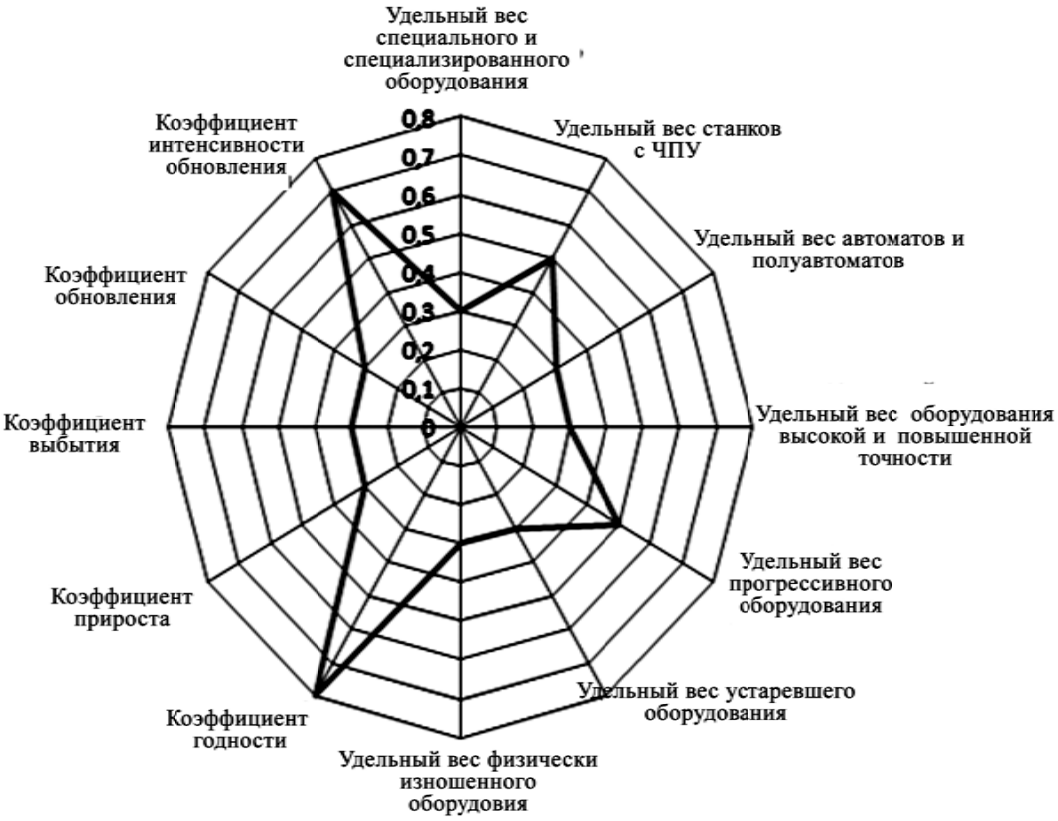


Рис. 2. Профиль технического уровня оборудования

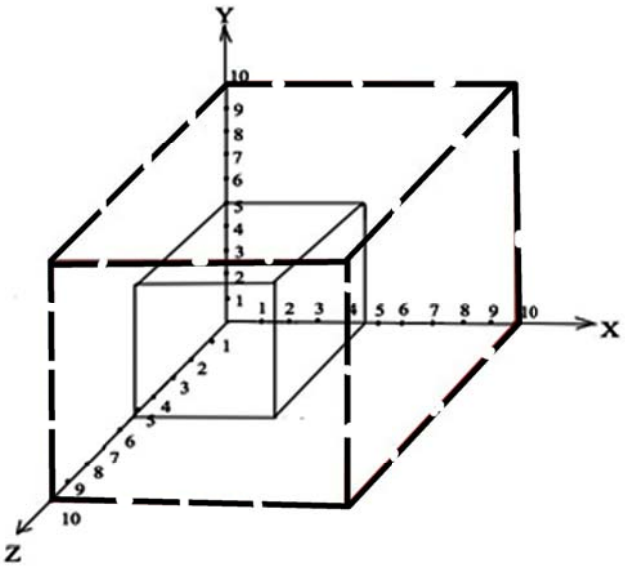


Рис. 3. Трехмерная модель оценки технического уровня производства

Пунктиром заполнено поле нормативного значения, т.е. то состояние, к которому предприятие должно стремиться. Параллелепипед внутри поля нормативного значения показывает реальное состояние технического уровня производства в конкретный момент времени.

По осям расположены поля следующих значений:

X – интегральные значения технико-организационного уровня производства;

Y – интегральные значения объема внедрения;

Z – интегральные значения экономической эффективности повышения организационно-технического уровня производства.

Оценка технического уровня производства служит основой для разработки перспективных планов развития производства, а также позволяет подготовить предложения в проект технологического перевооружения предприятия.

Предлагаемая методика отличается фокусировкой внимания на усиление сильных сторон предприятия, нацеленностью на положительный результат и возможностью решения нескольких задач одновременно, позволяет вскрыть внутренние резервы предприятия с целью поддержания конкурентоспособности предприятия и его развития.

Раздел II

ТЕХНОЛОГИЯ АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

УДК 629.45

Н. А. Сухова (УГАТУ), А. С. Семенов (ОАО НИИТ)

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

В развитии экономики страны значительную роль играет машиностроение. Одной из наукоемких отраслей машиностроения, требующей постоянного внедрения перспективных технологий, является производство газотурбинных двигателей.

Вновь проектируемый газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой сложное изделие, узлы которого будут работать в экстремальных условиях: агрессивная среда, высокие температуры, вибрации, высокий уровень механических напряжений. Сложность проектируемых деталей и узлов требует развития технологий литейного, сварочного, механического и других производств.

Наиболее актуальными, в ближайшей перспективе, являются технологии, отраженные на рис. 1 и рис. 2.

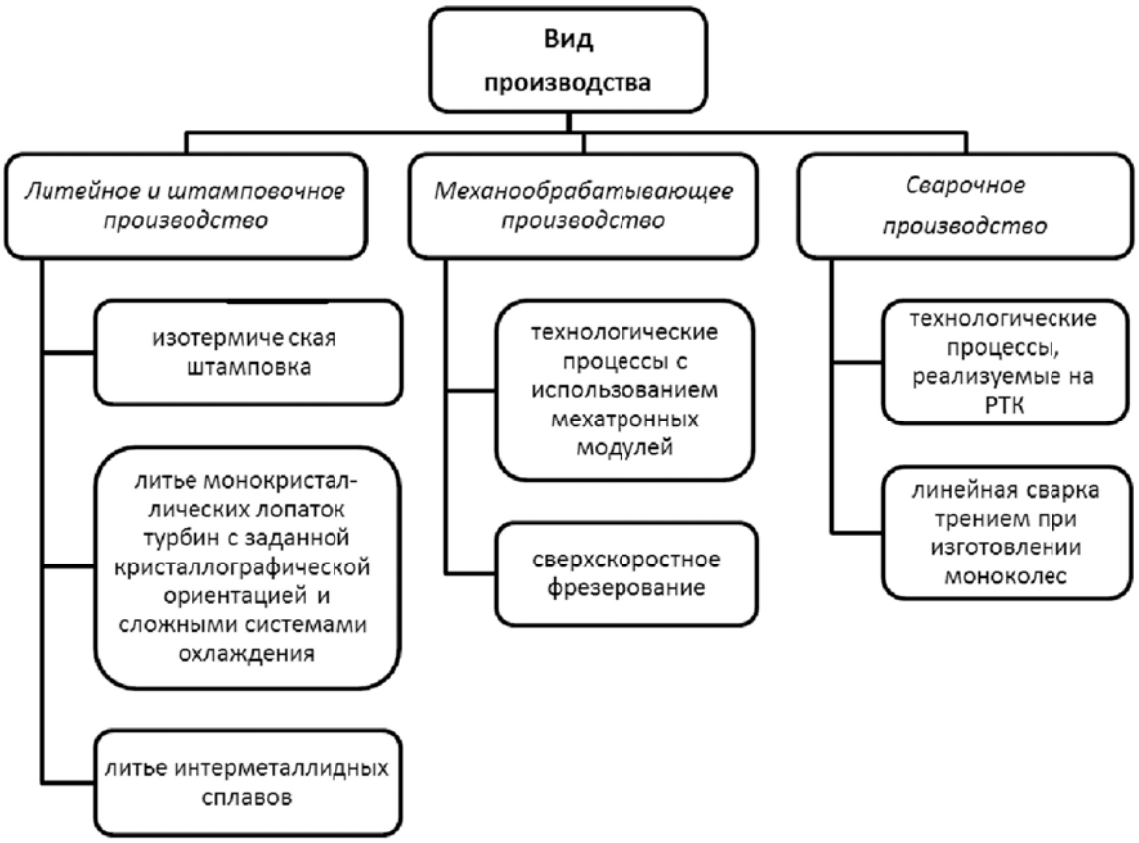


Рис. 1. Перспективные технологии по виду производства

Рис. 2. Перспективные технологии по способу упрочнения и защиты поверхностей

С целью уменьшения нормы расхода материала и снижения трудоемкости последующей механической обработки, эффективным способом в штамповочном производстве является изотермическое деформирование. Высокотемпературным изотермическим

деформированием из легированных сталей, титановых и жаропрочных сплавов можно получать заготовки разнообразных конфигураций. Особенности изотермического деформирования обусловливают область его применения:

• для малопластичных металлов, не поддающихся обработке давлением в обычных условиях, и штамповки заготовок;

• для деталей с элементами небольшой толщины (высокие и узкие ребра, тонкие полотна), которые в обычных условиях можно получить только с большими напусками;

• при требованиях повышенной точности, особенно для деталей из дорогостоящих материалов;

• для крупногабаритных деталей, требующих в обычных условиях оборудования повышенной мощности;

• для изделий, к качеству и надежности которых предъявляются повышенные требования.

Технология изотермической штамповки позволяет исключить сварные соединения в деталях, повысить ресурс эксплуатации, снизить объем механической обработки.

Точность заготовок, полученных в изотермических условиях, значительно повышается в результате уменьшения:

• упругих деформаций системы пресс-штамп из-за снижения сопротивления деформированию штампуемого металла и усилия штамповки;

• колебаний температуры деформации (следовательно, большей стабильности геометрических размеров штампованных заготовок);

• толщины дефектного слоя и улучшения качества поверхности заготовки в результате меньшего взаимодействия металла с окружающей средой при снижении температуры деформации и использовании эффективных защитно-смазочных стеклянных покрытий;

• остаточных напряжений в объеме штампованной заготовки, что уменьшает ее коробление при остывании и термообработке и улучшает качество.

В изотермических условиях штампуют заготовки с небольшими штамповочными уклонами или без них, с резкими перепадами сечений, малыми радиусами переходов и припусками на механическую обработку.

Основные преимущества процесса:

• повышение пластичности металла, возможность деформирования малопластичных материалов или получение больших деформаций для обычных материалов;

• возможность получения параметра шероховатости поверхности заготовок Rz – 2,0–3,2 мкм, точности до 11-го, 12-го квалитетов;

• улучшение структуры, повышение механических свойств и качества металла;

• уменьшение или полное устранение припусков, снижение трудоемкости механической обработки на 25–60 %;

• повышение КИМ до 0,3–0,6;

• уменьшение усилия деформирования в 5–10 раз.

К недостаткам изотермической штамповки относятся:

• большие трудоемкость изготовления и стоимость штамповой оснастки;

• низкая производительность процесса;

• усложнение технологического процесса за счет применения стеклянных смазочных материалов, необходимость дополнительного оборудования для их нанесения и удаления [1].

Детали, полученные изотермическим деформированием, представлены на рис. 3 [2].

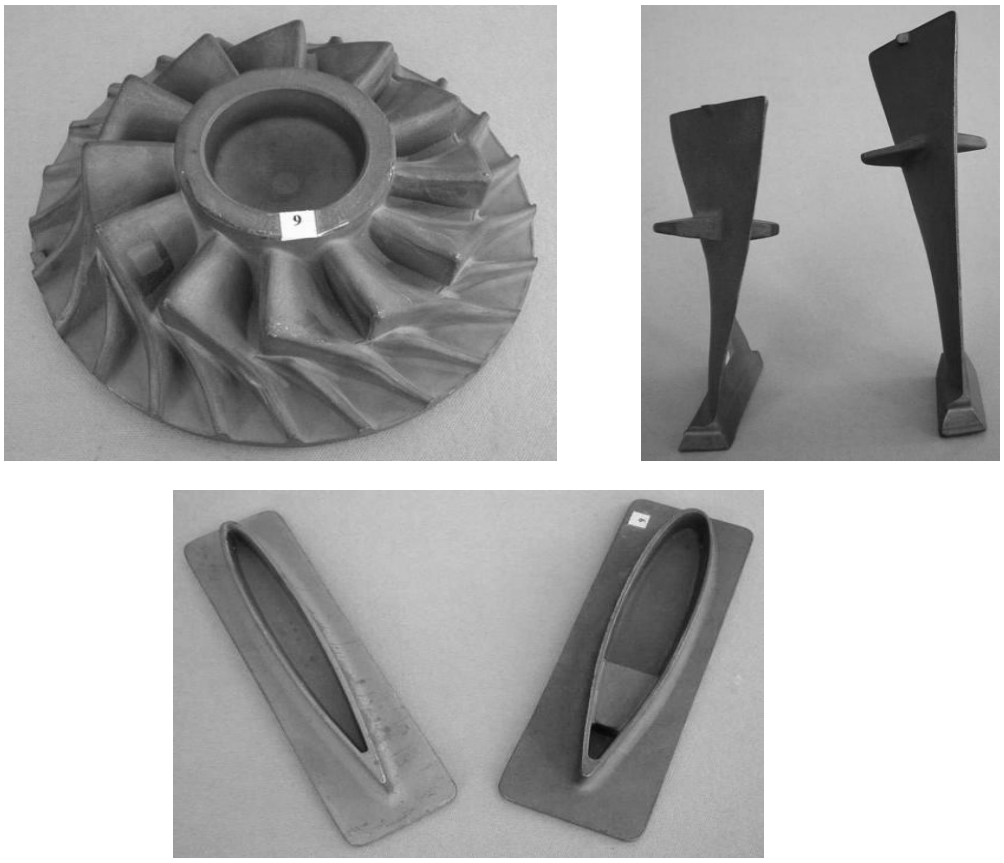


Рис. 3. Диск с лезвиями, лопатки компрессора ГТД и фланцы, полученные изотермическим деформированием

Применение лёгких жаропрочных и жаростойких интерметаллидов на основе титана и алюминия позволит снизить вес конструкции сопловых аппаратов, а интерметаллидные никелевые сплавы, применяемые при изготовлении рабочих лопаток турбин, обеспечат работу при высоких температурах с высоким сопротивлением окислению.

В сравнении с традиционными металлическими материалами, интерметаллидные сплавы обладают уникальным комплексом свойств. К ним относятся:

- высокие удельные прочностные свойства и упругие модули, сохраняющиеся до высоких температур;
- высокие жаропрочность и сопротивление ползучести;
- высокое сопротивление окислению и горению.

К недостаткам интерметаллидных сплавов можно отнести:

- хрупкость при нормальной температуре;
- низкую технологическую пластичность;
- высокий разброс механических свойств;
- низкую механическую обрабатываемость [3].

Повышение требований к производительности и надежности установок в механообрабатывающей отрасли, а также к качеству выпускаемой продукции, обуславливает необходимость применения новых подходов к проектированию механического оборудования. Одним из способов решения этой задачи является использование принципиально новых технических решений разработки этих устройств с позиции мехатроники.

Применение мехатронных систем позволит заменить функции, традиционно выполняемые механическими элементами системы, на электронные и компьютерные блоки.

Главными преимуществами мехатронных систем являются:

- способность выполнять сложные движения за счет применения методов адаптивного и интеллектуального управления;

- конструктивная компактность модулей;

- исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации, упрощение кинематических цепей и, следовательно, высокая точность и улучшенные динамические характеристики машин и модулей;

- возможность объединения мехатронных модулей в сложные мехатронные системы и комплексы, допускающие быструю реконфигурацию;

- относительно низкая стоимость установки, настройки и обслуживания системы благодаря модульности конструкции, унификации аппаратных и программных платформ [4].

С точки зрения повышения производительности обработки труднообрабатываемых материалов и деталей сложной формы актуальным является использование метода сверхскоростного фрезерования.

Метод сверхскоростного фрезерования даёт возможность снизить тепловое и силовое воздействие на заготовку, изменяет характер стружкообразования и формирования обработанной поверхности детали, снижает шероховатость поверхности и

повышает точность, позволяет уменьшить припуски на обработку нежестких деталей.

Использование роботизированного технологического комплекса в сварочном производстве позволяет оптимизировать производственные процессы, сделать труд человека менее рутинным и более безопасным, повысить качество выпускаемой продукции за счет высокой точности выполняемых операций, выполнять сварку всех швов в наиболее удобном пространственном положении.

РТК предъявляют специфические требования к технологии изготовления изделия: необходима высокая точность всех заготовок узла, стабильность положения сварного соединения в пространстве и высокое качество сварочных материалов. Возможность использования РТК определяется размерами и формой их рабочего пространства, точностью позиционирования, скоростью перемещения, числом степеней подвижности инструмента, особенностями управления [5].

Некоторые материалы или сочетания материалов являются проблемными с точки зрения обычной сварки. На поверхности стыка могут образовываться интерметаллические соединения, либо в прилежащих участках появляются трещины, что не позволяет использовать сваренные детали при высоких нагрузках. В ряде случаев проблема может быть решена применением процессов сварки трением. К их достоинствам, в дополнение к решению вопросов, связанных с расплавлением и застыванием материала, можно отнести минимальный нагрев и очень короткое время обработки.

Наиболее перспективной разновидностью сварки трением, при производстве нового ГТД, является линейная сварка трением.

Линейная сварка трением позволит изготовить неразъемное монолитное соединение диска с лопаткой из разных материалов. Также данная технология позволит повысить ремонтопригодность моноколеса (рис. 4).

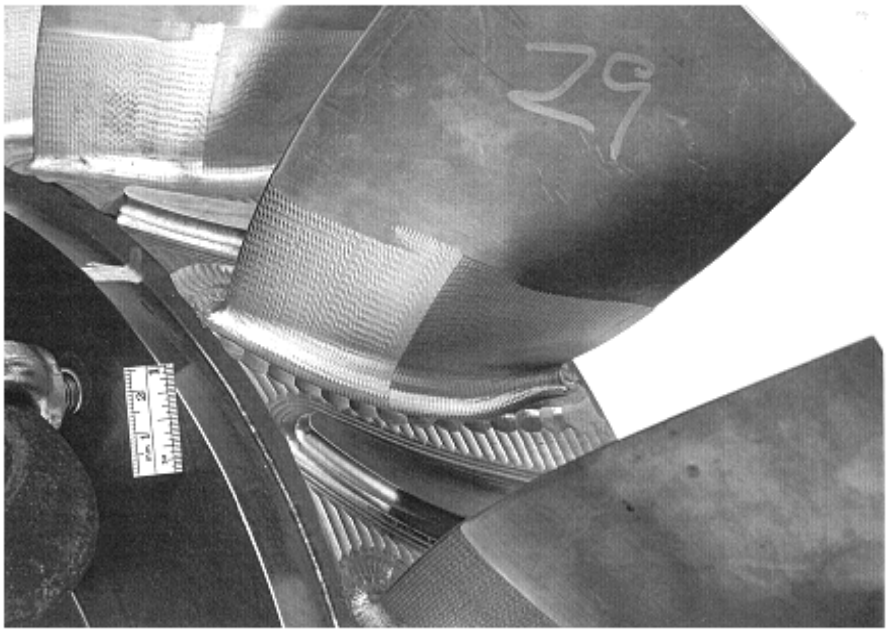


Рис. 4. Моноколесо, изготовленное методом линейной сварки трением

В связи с растущими требованиями к вновь разрабатываемым ГТД по увеличению КПД по топливу, снижению выброса NOx и роста мощности и тяги, остро стоит вопрос применения термобарьерных покрытий с целью защиты деталей камеры сгорания, лопаток и сопловых аппаратов газовой турбины. Термобарьерные покрытия (ТБП), обладающие низкой теплопроводностью, позволят повысить температуру рабочего газа на входе в турбину, снизить температуру стенки лопатки и уменьшить расход газа, используемого для охлаждения.

Система ТБП состоит из четырех компонентов – каждый имеет заметно отличающиеся физические, тепловые и механические свойства, создавая по существу комплексную структуру. Изделие с ТБП должно выдержать высокую температуру, ее цикличное изменение и, как следствие, напряженное состояние.

Комбинация различных материалов и требуемых эксплуатационных условий делает ТБП более сложными, чем любая другая система покрытия. Четыре слоя в современной системе ТБП сделаны из различных материалов со специфическими свойствами и функциями:

- основной сплав (непосредственно материал изделия);
- связующее покрытие;
- термически выращенный оксид (TGO);
- керамическое поверхностное покрытие.

Основной сплав – суперсплав на основе никеля или кобальта – материал, который охлаждается воздухом изнутри или через внутренние полые каналы, таким образом, устанавливая температурный градиент поперек стенки изделия.

Связующее покрытие – устойчивый против окисления металлический слой, с толщиной 75–150 мкм, он по существу диктует адгезию ТБП. Покрытие связи обычно сделано из NiCrAlY, или NiCoCrAlY, и нанесено плазменным напылением или электроннолучевыми методами физического осаждения из паров (EB-PVD). Другой вариант покрытия связи сделан из алюминидов Ni и Pt и наносится гальванически с диффузионным алитированием или химическим осаждением из паров.

Поверхностные покрытия связи (MCrAlY) по сравнению с диффузионными покрытиями (алюминиды Ni и Pt) позволяют получить большую независимость от основного сплава и гибкость при проектировании свойств связующего покрытия.

Керамическое поверхностное покрытие – это слой, обеспечивающий теплоизоляцию, состоит из ZrO_2, стабилизированного Y_2O_3. ZrO_2-Y_2O_3 (YSZ), обладает комплексом свойств, которые делают этот материал наилучшим выбором для поверхностного покрытия. Он имеет один из самых низких из всех керамик коэффициентов теплопроводности при повышенной температуре (2,3 Вт/мК при 1000°С для полностью плотного материала) из-за высокой концентрации точечных дефектов (вакансии кислорода и замещенные атомы растворенного вещества), которые рассеивают теплопроводящие фононы.

YSZ также имеет высокий коэффициент теплового расширения ($11x10^{-6}$ C^{-1}), который помогает уменьшить напряжения, являющиеся результатом рассогласования терморасширения между керамическим покрытием и основным металлом изделия ($14x10^{-6}$ C^{-1}).

YSZ имеет относительно низкую плотность (6,4 мг/см^3), что является важным при рассмотрении паразитного веса во вращающихся изделиях. Он имеет твердость 14 ГПа, что позволяет сопротивляться воздействию инородных предметов и эрозии. Покрытие YSZ имеет хорошую стойкость к атмосферной и высокотемпературной коррозии. Наконец, YSZ имеет температуру плавления (2700°С), что позволяет применять его при высокой температуре.

Перспективы дальнейшего развития ТБП можно охарактеризовать основными направлениями — поиск и разработка новых материалов, совершенствование архитектуры покрытий и совершенствование методов нанесения.

Таким образом, применение перспективных технологий позволит повысить качество деталей и узлов вновь разрабатываемого ГТД, улучшит их эксплуатационные показатели и ресурс, откроет дорогу для конструктивного совершенствования ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров П. А. Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ»
2. Электронный ресурс: http://www.imsp.ru. С. П. Павлинич, М. В. Зайцев. Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений. Вестник УГАТУ. Уфа: УГАТУ, 2011 г.
3. Электронный ресурс: http://www.intelhands.ru/ Е. П. Попов, Г. В. Письменный. Основы робототехники: Введение в специальность. Учеб. для вузов по спец. «Роботехнические системы и комплексы». – М.: Высш. шк., 1990. – 224 с.
4. Электронный ресурс: http://vniialmaz.ru
5. Новик Е. Электронный ресурс: http://www.plackart.com

УДК 620.22

Ю. Г. Быков, А. С. Ромашов (ФГУП «НПЦ «Салют»),
О. А. Базылева, Л. И. Рассохина (ФГУП «ВИАМ»)

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВКНА4-УР МОДИФИЦИРОВАННОГО В КОНСТРУКЦИИ ПЕРСПЕКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение

Первоочередной задачей авиационного двигателестроения является повышение КПД и ресурса работы двигателя, что обеспечивается повышением рабочих температур и снижением веса теплонагруженных деталей двигателя. Известны конструкторские и материаловедческие пути решения этой проблемы: создание новых жаропрочных сплавов, разработка технологий литья деталей из этих сплавов. Условия высокотемпературной работы, термоциклирование и знакопеременные нагрузки интенсифицируют диффузионные и усталостные процессы, которые приводят к деградации структуры и, следовательно, к снижению жаропрочности, пластичности и вязкости разрушения всех деталей, входящих в состав авиационных двигателей: от рабочих лопаток 1 ступени до деталей реактивного сопла и форсажной камеры.

В настоящее время в отечественном авиационном двигателестроении для изготовления деталей реактивного сопла, таких как «Проставка», «Надстворка», «Створка», широко используется жаропрочный никелевый сплав с поликристаллической структурой

ВЖЛ12У: плотность сплава 7,83 г/см^3, длительная прочность σ^{900}_{100} = 300 МПа, σ^{900}_{500} = 150МПа, σ^{1000}_{100} = 50МПа, который по своим характеристикам длительной жаропрочности при температурах 900 и 1000°С не удовлетворяет поставленным задачам по созданию перспективного двигателя с увеличенным КПД.

В связи с этим возникла необходимость в жаропрочном сплаве для литья деталей с поликристаллической структурой с низкой плотностью и повышенными характеристиками длительной прочности.

Наиболее перспективными, по нашему мнению, являются сплавы семейства ВКНА. В табл. 1 приведены марка сплава; плотность сплава; кратковременная прочность и пластичность при комнатной температуре; пределы длительной прочности на базе 100 ч при температурах 900, 1100 и 1200°С, а также пределы выносливости на базе 2х10^7 при температурах 20, 900 и 1100°С [1]. Видно, что сплавы обладают высоким уровнем жаропрочности при температурах 1100 и 1200°С при относительно низкой плотности 7,840...8,105 г/см^3. При окислении в воздушной среде из-за повышенного содержания алюминия и присутствия хрома сплавы отличаются высокой жаростойкостью[2, 3, 4].

Сплав ВКНА-4У в монокристаллическом варианте опробован взамен сплава ЖС6У в качестве неохлаждаемых рабочих лопаток турбины. Это позволило повысить рабочую температуру на входе в турбину на 100°С и срок службы лопаток в 1.5...2 раза. Исследования микроструктуры и параметров кристаллических решеток γ'-фазы и γ-твердого раствора рабочих лопаток из сплава ВКНА-4У после

проведенных натурных испытаний в течение 2500 ч и 10000 циклов не выявили заметных изменений [5].

Таблица 1

Высокотемпературные жаропрочные литейные сплавы марки ВКНА [1]

Марка сплава	Структура отливок	Плотность, кг/м^3	Механические свойства при температурах, °С							
			20			900		1100		1200
			$\sigma_в$, МПа	δ, %	σ_{-1} $\cdot 2\cdot 10^7$, циклов МПа	σ_{100}, МПа	σ_{-1} $\cdot 2\cdot 10^7$, циклов МПа	σ_{100}, МПа	σ_{-1} $\cdot 2\cdot 10^7$, циклов МПа	σ_{100}, МПа
ВЖЛ12У	Поликристаллическая	7930	830	10		300		–	–	–
ВКНА-4	Поликристаллическая	7840	720	11.5	150	230	250	55	100	23
ВКНА-1В	Дендритная, столбчатая	7938	740	50	130	250	240	65	120	43
ВКНА-1ВУ	Монокристаллическая с КГО <111>	7847	1070	10	320	310	340	70	–	50
ВКНА-4У	Дендритная, столбчатая	7910	770	30	230	280	310	95	150	45
ВКНА-25	Монокристаллическая с КГО <111>	8104	1120	10	240	420	370	130	–	48

Для равноосного литья крупногабаритных изделий применяется сплав ВКНА-4УР мод., который позволяет повысить рабочую температуру до 1250°С и снизить вес конструкции на 7…10 %.

Для оценки возможности применения сплава ВКНА-4УР мод. в конструкции перспективного двигателя на ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» на серийных деталях была проведена апробация сплава. В качестве опытных деталей были выбраны детали надстворка (рис. 1) и проставка (рис. 2). Для изготовления моделей отливок использовались серийные модельные массы.

Рис. 1. Надстворка

Рис. 2. Проставка

Формирование керамического покрытия на модельных блоках производилось методом послойного нанесения огнеупорной суспензии и обсыпочного материала с последующей сушкой каждого слоя покрытия.

Рис. 3. Внешний вид керамических форм отливки проставка

Прокалка керамических форм перед заливкой производилась в электрических нагревательных печах. Температура прокалки форм 1080±20ºС. Время выдержки керамических форм при этих температурах 2…12ч. Внешний вид керамических форм перед прокалкой приведен на рис. 3.

Плавку сплава ВКНА-4УР модиф. и заливку форм проводили в вакуумной индукционной печи УППФ с форвакуумной камерой.

Операция ГИП

Целью данной операции является повышение плотности отливок, устранения мелких и уменьшения размеров крупных литейных пор в процессе воздействия на металл высокого давления при максимально возможной высокой, для конкретного сплава,

температуры. Операция ГИП была выполнена на газостате ФГУП «ВИАМ» по режиму ФГУП «ВИАМ», разработанному для деталей и узлов из сплава ВКНА-4УР модифицированного.

Заключение

Проведенные исследования по изучению технологичности сплава ВКНА-4УР мод. позволили определить оптимальные режимы литья деталей, газостатической обработки, механической обработки.

На основании проведенной работы, на промышленном оборудовании из сплава ВКНА-4УР модифицированного были изготовлены опытные партии деталей: надстворка и проставка. Установлена возможность получения качественных бездефектных отливок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А. Литейные конструкционные сплавы на основе никеля // Двигатель, 2011, №4, С. 22-24.
2. Бунтушкин В. П., Каблов Е. Н., Качанов Е. Б., Шалин Р. Е. Высокотемпературные конструкционные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // Научно-технический сборник «Авиационные материалы на рубеже XXI века», Москва, 1994.
3. Гринбер Б. А., Иванов М. А. Интерметаллиды Ni_3Al: микроструктура, деформационное поведение // Екатеринбург, 2002.
4. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением/ под научной редакцией академика РАН, профессора Е. Н. Каблова и доктора физ.-мат. наук, профессора Ю. Р. Колобова // МИСиС издательский дом. Москва, 2008.

5. Поварова К. Б., Казанская В.П. Бунтушкин, Базылева О.А. и др. Термостабильность структуры сплава на основе Ni_3Al и его применение в рабочих лопатках малоразмерных ГТД // Металлы, №3, 2003г.

УДК 621.791.3

В. А. Поклад (ФГУП «НПЦ «Салют»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖ 172 В ЦЕЛЬНОСВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ БАРАБАНА КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для создания перспективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения и наземных энергетических установок необходимо решение крупных конструкторских, технологических и материаловедческих проблем. Одной из этих проблем является разработка технологии создания сварной конструкции барабанов компрессоров высокого давления (КВД). Сварная конструкция КВД позволит повысить его продольную жесткость, а следовательно, увеличить сопротивление вибрациям, отказаться от болтового соединения дисков, что даёт возможность существенно снизить массу КВД за счёт сварки дисков по ободной части. Если для компрессора низкого давления такая задача решена за счёт свариваемости применяемых материалов дисков – титановых сплавов, то для компрессоров высокого давления данная проблема требует своего решения. Используемый в настоящее для дисков КВД

сплав ЭП741НП является несвариваемым из-за высокого содержания γ'-образующих элементов – алюминия и титана. Поэтому, для получения цельносварного ротора КВД был предложен новый жаропрочный никелевый сплав ВЖ 172.

Так как для сварки роторных конструкций ГТД с целью снижения остаточных напряжений и деформаций традиционно применяется способ электроннолучевой сварки (ЭЛС), то в работе исследовалась свариваемость сплава ВЖ172 методом ЭЛС. Сварку проводили в двух состояниях: закаленном и состаренном. При этом ЭЛС проводилась при разных скоростях сварки: 10 м/ч, 20 м/ч и 30 м/ч.

Все исследования, проведенные на образцах сплава ВЖ172, сваренных ЭЛС, приведены в сводной табл. 1.

Опыт №1. Состояние образцов перед ЭЛС: закалка 1060ºС±10 ºС, в течение 10 минут, охлаждение на воздухе.

Образец №1. Скорость сварки 20 м/ч, ток сварки 12 мА, ускоряющее напряжение 60 kV.

Образец №1. Скорость сварки 20 м/ч, ток сварки 12 мА, ускоряющее напряжение 60 kV.

Образец №2. Скорость сварки 30 м/ч, ток сварки 13 мА, ускоряющее напряжение 60 kV.

Таблица 1

Исследования образцов сплава ВЖ172 сваренных ЭЛС

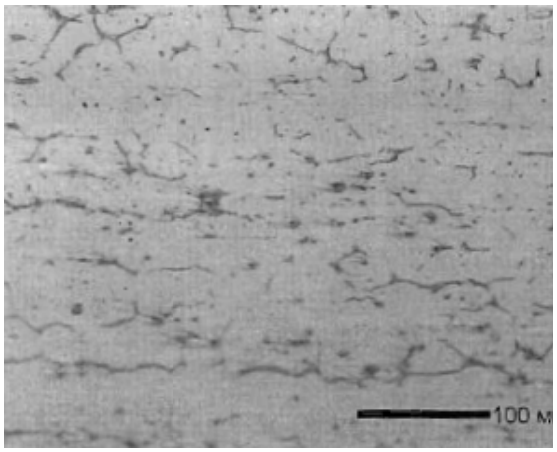
№ опыта	№ образца	Термообработка перед ЭЛС	Режим ЭЛС
1	1	Закалка	12 мА, 60 kV, 20 м/ч
	2		13 мА, 60 kV, 30 м/ч
2	3	Закалка + старение	10 мА, 60 kV, 10 м/ч
	4		12 мА, 60 kV, 20 м/ч
	5		13 мА, 60 kV, 30 м/ч

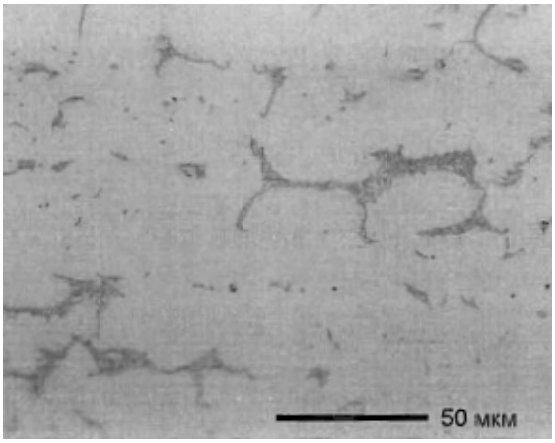
Электронно-лучевая сварка проведена на установке ЭЛУ-20.

Металлографическим исследованием микрошлифов, изготовленных в поперечном сечении сварных швов, установлено отсутствие трещин в шве и околошовной зоне.

Характерные микроструктуры основного материала, зоны термического влияния (ЗТВ) и литой зоны сварных образцов приведены на рис. 1 и 2.

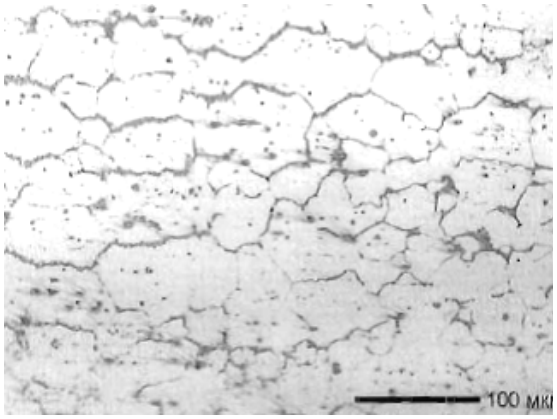
Как видно из рис. 1 и 2, на образцах №1 и №2 после проведенной закалки наблюдается формирование в основном материале полиэдрических зерен с выделением по границам зерен интерметаллидной фазы. Строчечные выделения раздроблены, но сохраняют ориентацию вдоль направления деформации. В ЗТВ наблюдаются полиэдрические зерна, по границам зерен имеются выделения интерметаллидной фазы. В литой зоне наблюдается выраженное дендритное строение.

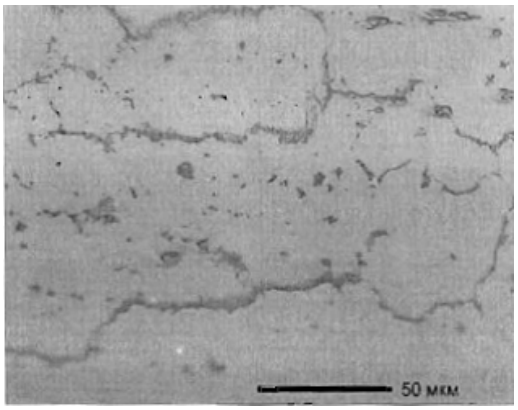




×200 ×500

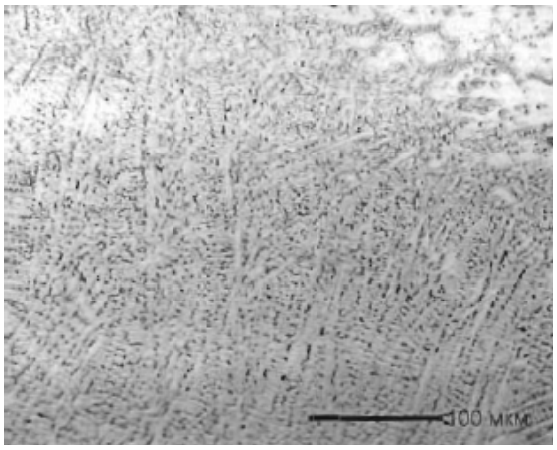
а – основной материал

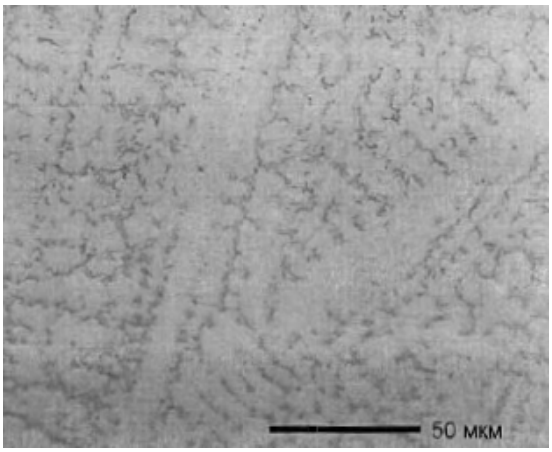




×200 ×500

б – ЗТВ

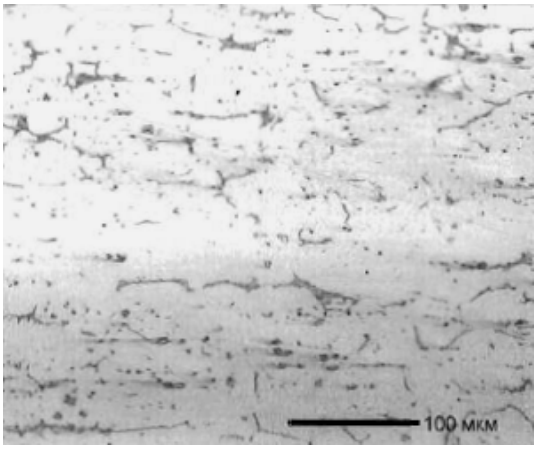


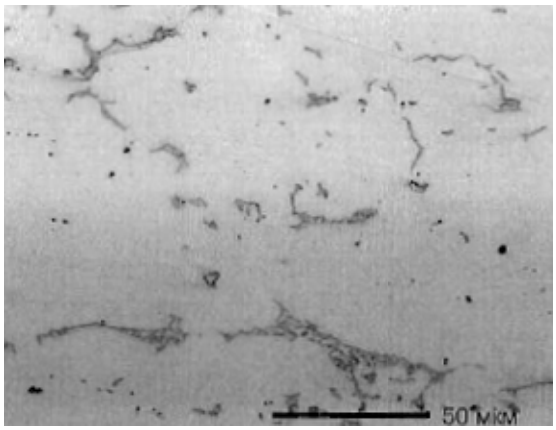


×200 ×500

в – литая зона

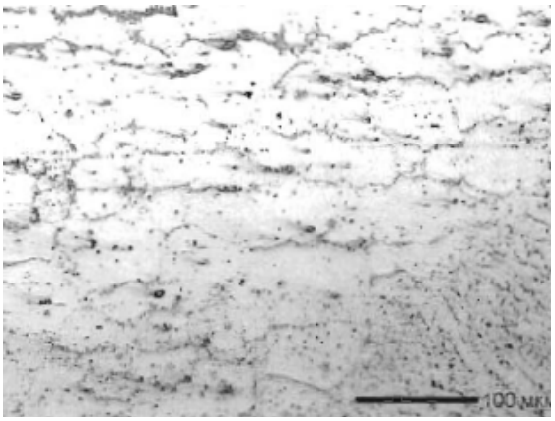
Рис. 1. Микроструктура материала образца № 1

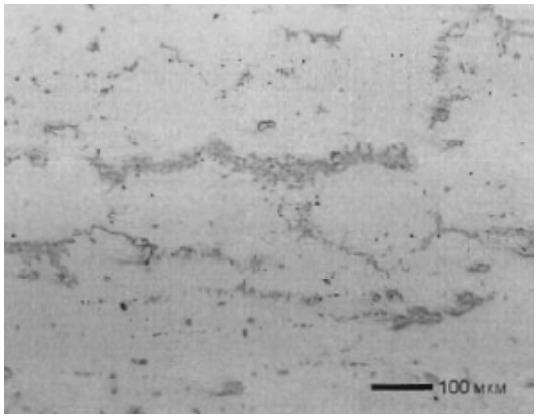




×200 ×500

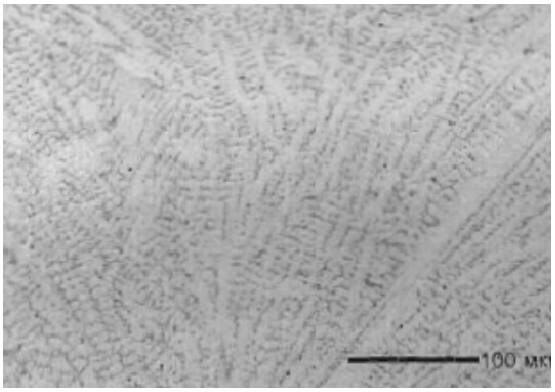
а – основной материал

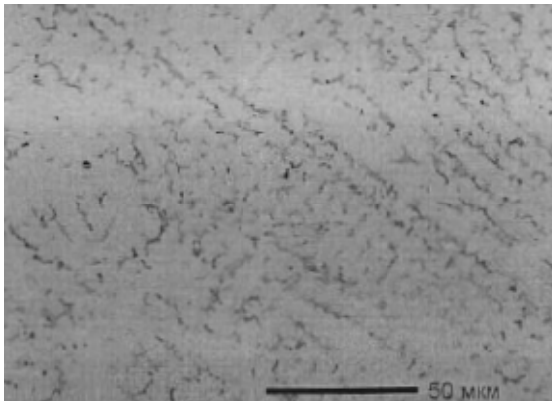




×200 ×500

б – ЗТВ





×200 ×500

в – литая зона

Рис. 2. Микроструктура материала образца № 2

Опыт №2. Состояние образцов перед ЭЛС: закалка 1060ºС±10ºС, в течение 10 минут, охлаждение на воздухе. После закалки проведено старение по режиму: 900ºС, 3 часа выдержки, охлаждение на воздухе + 840ºС, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе + 760ºС, выдержка 10 часов, охлаждение на воздухе.

Режимы ЭЛС:

Образец № 3. Скорость сварки 10 м/ч, ток сварки 10 мА, ускоряющее напряжение 60 kV.

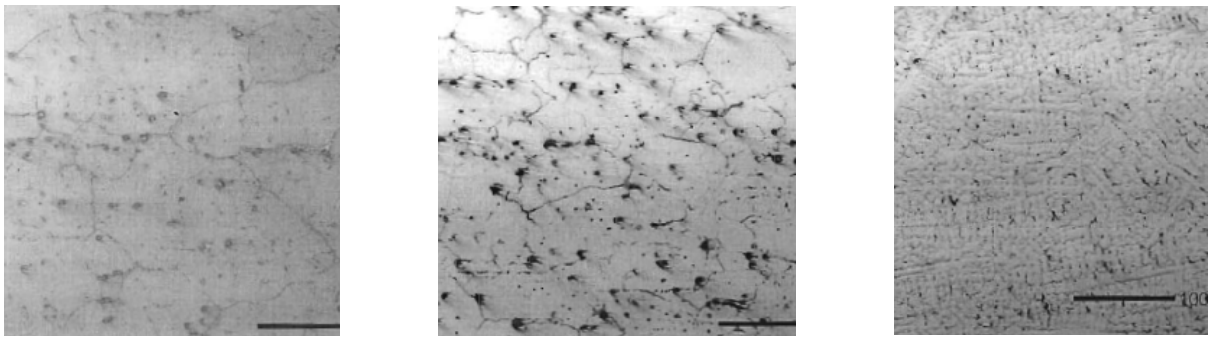
Образец № 4. Скорость сварки 20 м/ч, ток сварки 12 мА, ускоряющее напряжение 60 kV.

Образец № 5. Скорость сварки 30 м/ч, ток сварки 13 мА, ускоряющее напряжение 60 kV.

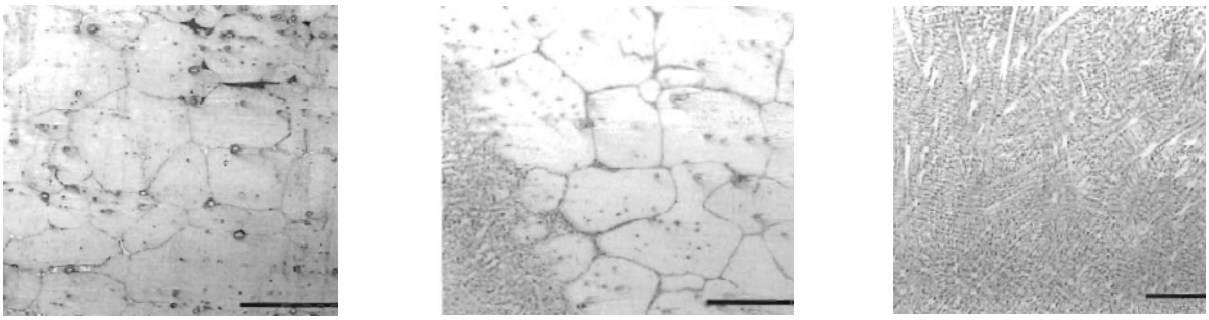
Металлографическим исследованием микрошлифов, изготовленных в поперечном сечении сварных швов, установлено отсутствие трещин в шве и околошовной зоне. Характерные микроструктуры материала сварных образцов приведены на рис. 3.

На образцах № 3, 4, 5 после проведенного старения в основном материале полиэдрическое зерно полностью сформировано.

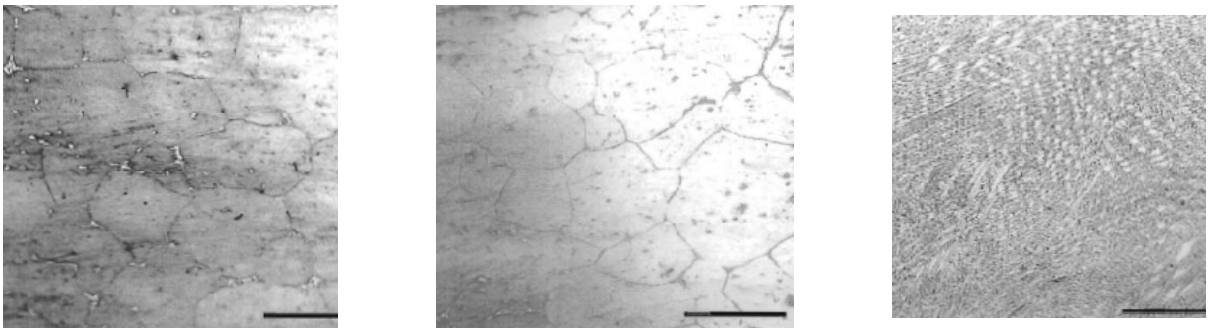
Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что сплав ВЖ172 удовлетворительно сваривается электронно-лучевой сваркой в закаленном и в закаленном и состаренном состояниях. Трещин в сварном шве и в зоне термического влияния после электронно-лучевой сварки в диапазоне скоростей 10–30 м/ч не выявлено, что позволяет рекомендовать продолжить работы в этом направлении.



а – образец № 3



б – образец № 4



в – образец № 5

Рис. 3. Микроструктура сварных образцов (×200): основной материал, ЗТВ, литая зона (слева направо)

УДК 621.7

С. В. Морозов, Н. С. Квятковский (ФГУП «НПЦ «Салют»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНИИ ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РАСКАТКИ ДИСКОВ АЛРД-1200

Производство двигателей ГТД является одной из наукоёмких отраслей машиностроения. Сложность задач современного авиа-двигателестроения обусловлена как трудностью обработки материалов деталей ГТД, сложностью их формы, так и высокими требованиями к точности и шероховатости поверхностей деталей. Развитие авиадвигателестроения невозможно без применения высокотехнологичных методов обработки, разработки точного высокопроизводительного и высокоскоростного оборудования и внедрения современных инновационных технологий.

Изготовление дисков ГТД из титановых и никелевых жаропрочных сплавов широкой номенклатуры на новом специализированном раскатном стане позволит изготавливать диски с высокой точностью и производительностью, с заданным уровнем структуры и свойств материала.

Основные сведения о стане АЛРД-1200

Опытно-промышленный стан для раскатки дисков с ЧПУ модели АЛРД-1200 предназначен для получения осесимметричных деталей типа дисков из титановых сплавов методом раскатки в режиме сверхпластичности [1].

На стане АЛРД-1200 возможно формообразование осесимметричных деталей типа дисков. В основу технологического процесса положен метод раскатки в режиме сверхпластичности. Сущность метода заключается в том, что нагретую заготовку в виде шайбы с подготовленной ультрамелкозернистой структурой деформируют в изотермических условиях двумя или одной парой обжимных роликов, установленных диаметрально противоположно и перемещающимися по эквидистантным траекториям. Большое значение на качество получаемых заготовок оказывает контроль технологического режима раскатки, который обеспечивает система управления.

Система управления

Раскатной стан АЛРД-1200 имеет специфический принцип действия и конструкцию, поэтому в первую очередь необходимо создать специализированное программное обеспечение управления технологическим процессом раскатки, а также соответствующее аппаратное и программное обеспечение компьютерного управления процессом со съемом всех текущих параметров (координат, положений и усилий) исполнительных механизмов стана.

Основу системы управления (рис.1) составляют индустриальные промышленные компьютеры, одновременно служащие как пульт управления и обеспечивающие ввод, обработку информации со всех датчиков.

Питание основных электродвигателей (вращение шпинделей и роликов, координатные перемещения роликов, а также перемещение манипулятора) осуществляется через электроприводы – преобразователи частоты, обеспечивающие плавное изменение скорости вращения, в широких пределах. Задание скорости вращения и контроль её фактического значения, а также координаты (для координатных перемещений роликов) выполняют микропроцессорные, программируемые, терминальные контроллеры сервопривода. Каждый контроллер располагается в непосредственной близости от управляемого им привода.

Управление контроллером и, в конечном итоге, приводом, осуществляется посредством сетевого интерфейса. При этом все контроллеры соединены двухпроводным витым кабелем, параллельно, а каждый контроллер имеет свой уникальный сетевой адрес.

Управление гидросистемой стана, печами и «гребёнками» подогрева и регламентированного охлаждения, зажимом и поворотом манипулятора осуществляется сетью модулей удалённого сбора данных. Команды на включение/выключение исполнительных органов передаются по сети, через модули удалённого сбора данных.

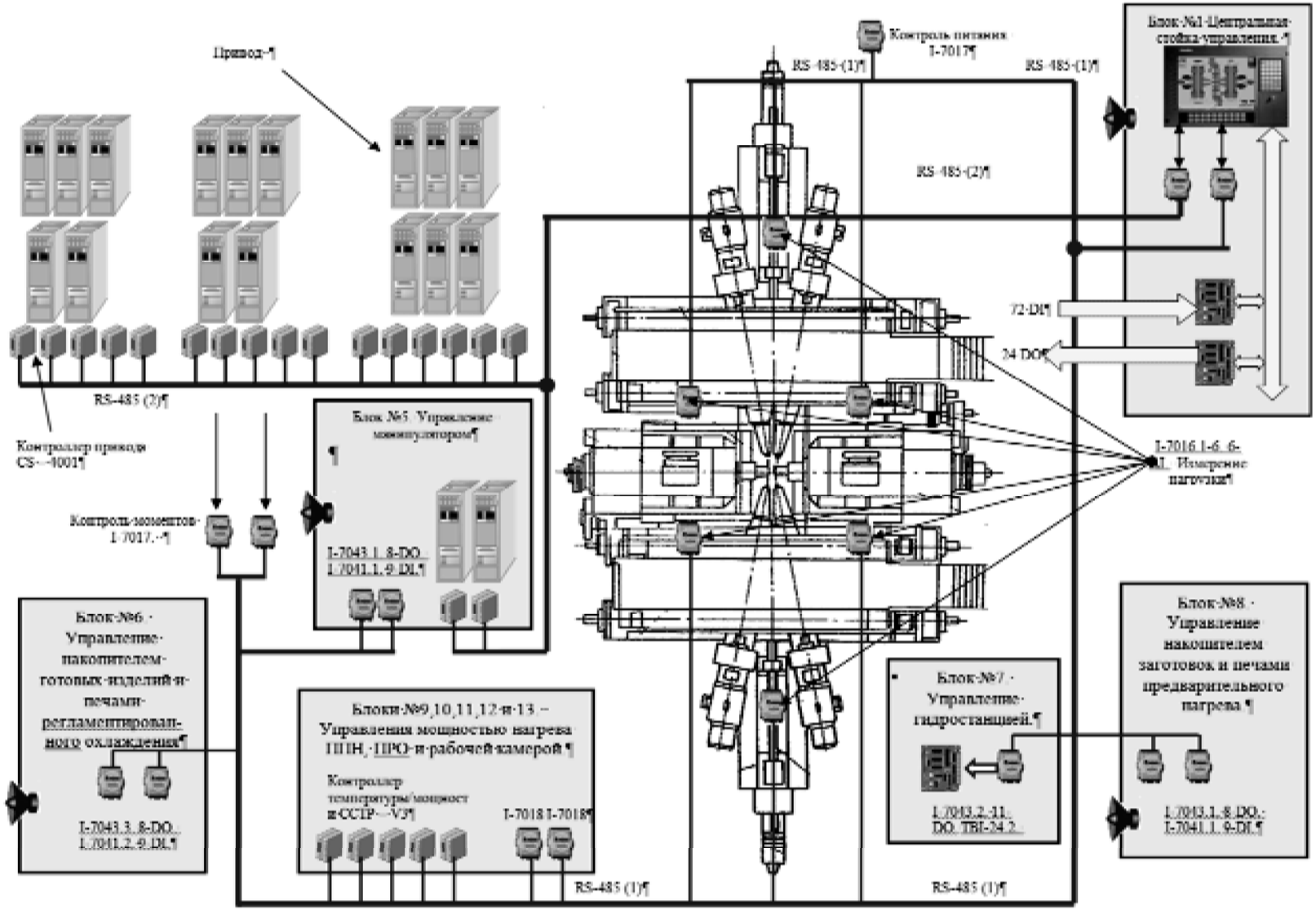


Рис. 1. Блок-схема системы управления раскатного стана АЛРД-1200

Каждый модуль имеет 16 выходов, и через электромагнитное реле может управлять различными устройствами. Ввод данных о текущих нагрузках на роликах производится от тензодатчиков. Данные о температуре в рабочей камере, на роликах и подшипниках поступают в систему от соответствующих термопар.

Система управления и контроля положением пинолей [2]

Большое значение для получения качественной детали имеет точное позиционирование заготовки, в процессе изотермической раскатки. Для повышения точности была разработана система управления и контроля положения пиноли (рис. 2).

Блок управления перемещением и контроля положения упорной пиноли и прижимной пиноли оснащен датчиком 1 положения прижимной пиноли и модулем управления 5. Для определения момента касания раскатных роликов заготовки блок управления перемещением оснащен гидрораспределителем 2, который обеспечивает выравнивание давления в полостях гидроцилиндров 4.

Координата положения заготовки детали отслеживается датчиком 3 положения упорной пиноли. При рассогласовании заданного положения упорной пиноли, гидрораспределитель 2 обеспечивает выравнивание её положения, а также удерживает заданную позицию, несмотря на воздействие внешних факторов (усилие поджима, реакцию прокатных валков с роликами и т.п.). Точность удержания ± одна дискрета датчика положения.

Момент касания приводных раскатных роликов заготовки определяется по перемещению пиноли прижимного цилиндра от воздействия на нее раскатных роликов, что фиксируется датчиком положения 1, после чего приводные прокатные валки с роликами отводят в исходную точку начала раскатки.

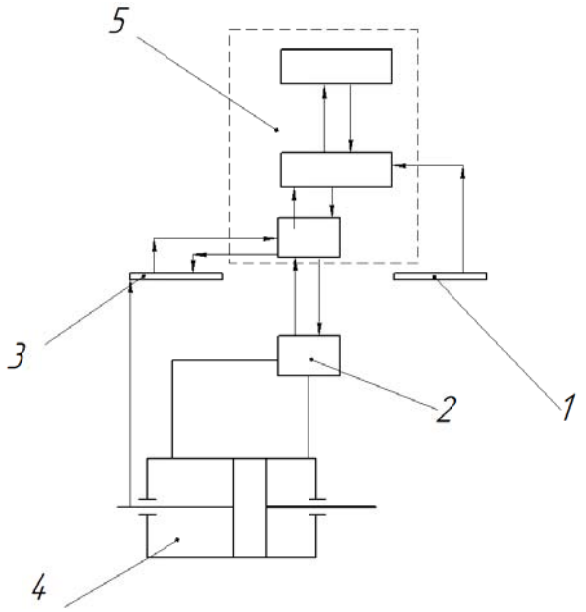


Рис. 2. Блок-схема системы управления и контроля положением пиноли

Заключение

1. Разработка и внедрение системы управления позволит получать детали с минимальными припусками и исключить возможность брака.
2. Контроль положения прижимной пиноли в процессе раскатки позволит управлять процессом внедрения пинолей в заготовку и повысить стабильность технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. А., Морозов В. В., Морозов С. В. Автоматическая линия для изотермической раскатки заготовок дисков газотурбинных двигателей// Заготовительные производства в машиностроении, 2012. № 5 С. 26 – 28.
2. Патент РФ. № 75164 МПК B21H1/00 Стан для изготовления осесимметричных деталей/ В. В. Морозов, В. А. Гейкин, И. А. Бурлаков, С. В. Морозов и др.// Опубликовано 27.07.2008. Бюл. №21.

УДК 621.923

И. С. Ковалев, В. Л. Юрьев (ОАО НИИТ)

АЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ TIAL

Сплавы на основе TiAl являются перспективными материалами для замены традиционных жаропрочных сталей и сплавов для деталей двигателей авиационной и автомобильной промышленностей. Это объясняется их привлекательной комбинацией свойств: хорошее соотношение предела прочности к плотности, огнеупорность, сопротивление окислению при рабочих температурах, высокий модуль упругости, сохранение прочности при рабочих температурах и достаточно высокое сопротивление ползучести. Однако у этих сплавов имеются недостатки, затрудняющие их обработку – высокая твердость и хрупкость при

комнатной температуре, которые приводят к их низкой обрабатываемости резанием.

Сплавы на основе TiAl также имеют другие недостатки: низкую пластичность при комнатной температуре (удлинение на разрыв колеблется от 0,3 до 3%), низкую теплопроводность, высокую химическую активность со многими инструментальными материалами. Другими особенностями, препятствующими обработке резанием, являются чувствительность материала к скорости деформации (высокая степень поверхностного упрочнения), и наличие абразивных частиц в микроструктуре сплавов, которые способствуют ускоренному износу инструмента.

Как заявляют авторы [1, 2, 3], достижение минимальных повреждений обработанной поверхности деталей из сплавов TiAl возможно при обработке шлифованием. При шлифовании сплавов на основе TiAl соответствующими кругами и при верно подобранных режимах резания достигается поверхность без трещин, снижение глубины деформации пластинчатой структуры до 5 мкм и ограничение глубины увеличения микротвердости до 100 мкм [3].

Автором [4] выполнено исследование по обрабатываемости интерметаллидов титана шлифованием. Обработке подвергались алюминиды титана с дуплексной ($\gamma+\alpha_2$)-структурой и полной ламельной γ-структурой. При обработке сплавов на основе TiAl с дуплексной структурой алмазным кругом была получена удовлетворительная величина удельного съема материала при высоком отношении объема снятого материала с обрабатываемой детали к объему изношенной части круга. Больший удельный съем

приводил к неэкономному износу инструмента. Круги из карбида кремния так же, как и алмазные, позволяют произвести обработку без образования трещин на поверхности материала, но имеют большую степень износа. При шлифовании корундовыми кругами выявлено, что в связи с их низкой удельной теплопроводностью, обработка алюминидов титана не представляется возможной вследствие возникновения прижогов и трещин на обработанной поверхности. Кроме того, сильный износ круга усложняет получение точности обработки как размерной, так и пространственной.

Рассматривая класс труднообрабатываемых материалов на предмет схожести их недостатков при обработке резанием с недостатками сплавов на основе TiAl, можно отметить следующие материалы, выделенные по признакам в группы:

- низкая пластичность, твердость и хрупкость при комнатной температуре: керамика, керметы, жаропрочные литейные сплавы, высокопрочные стали, твердые сплавы;

- низкая теплопроводность, наличие абразивных частиц в микроструктуре сплавов (карбиды, нитриды, оксиды): титановые сплавы, твердые сплавы, жаропрочные сплавы;

- высокая степень поверхностного упрочнения: титановые сплавы, жаропрочные сплавы;

- высокая химическая активность: жаропрочные сплавы, титановые сплавы.

Таким образом, анализируя условия и рекомендации по обработке вышеприведенных материалов, можно определить возможности и условия обработки сплавов на основе TiAl.

Автором [5] были проведены работы по исследованию шлифования труднообрабатываемых жаропрочных сплавов и их составляющих (титана, молибдена, вольфрама) алмазными кругами. Основным инструментом при обработке таких материалов, как жаропрочные, тугоплавкие и титановые сплавы и стали являлись круги из электрокорунда и карбида кремния. Эти круги при шлифовании (особенно сложного профиля) быстро теряют размер и профиль, засаливаются и поэтому требуют частой правки, что усложняет и удорожает технологический процесс. В настоящее время для обработки труднообрабатываемых материалов находит широкое распространение инструмент на металлической и керамической связках, в котором в качестве режущих зерен выступают естественный или синтетический алмазы, а также кубический нитрид бора.

Сравнение эффективности алмазного и абразивного шлифования жаропрочных сталей и сплавов показывает, что при алмазном шлифовании стоимость обработки выше, чем при обработке кругами из электрокорунда и карбида кремния. Однако точность обработки, качество обработанной поверхности при шлифовании жаропрочных, тугоплавких и титановых сплавов и сталей алмазными кругами выше. Алмазные круги для обработки вышеуказанных сплавов и сталей следует применять при незначительном припуске и высокой точности обрабатываемых деталей [5].

При оптимальных условиях алмазного шлифования температура резания значительно ниже, чем при обработке кругами из обычных

абразивных материалов [6]. Меньшая теплонапряженность процесса способствует снижению отрицательных изменений в поверхностном слое обрабатываемого материала – прижогов, микротрещин и структурных изменений. Также при алмазном шлифовании фазовые превращения в поверхностном слое практически отсутствуют. Сравнение шероховатости обработанной поверхности при оптимальных и равных условиях обработки алмазными и абразивными кругами показывает, что после алмазной обработки шероховатость в 4–6 раз [6] меньше, чем при обработке абразивными кругами. При алмазном шлифовании труднообрабатываемых материалов в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения, в отличие от обычной абразивной обработки или обработки лезвийным инструментом, при которых под влиянием механического фактора в определенных областях формируются растягивающие напряжения. Однако наряду со сжимающими формируются растягивающие напряжения в зоне контакта задней поверхности зерна при алмазном шлифовании, которые являются незначительными вследствие низкого коэффициента трения алмаза. Острые режущие кромки алмазных зерен обеспечивают чистый срез, существенно облегчая формирование и отделение стружки, что также снижает деформацию растяжения. В конечном итоге преимущественными являются остаточные напряжения сжатия, возникающие впереди алмазного зерна и ниже его плоскости. Эти особенности алмазной обработки можно объяснить геометрическими параметрами, физико-механическими свойствами алмаза и кинематикой резания.

Преимущества алмазного шлифования определяются, прежде всего, уникальными механическими, физическими, химическими и эксплуатационными свойствами алмазов, а также морфологическими особенностями кристаллов, более рациональными геометрическими параметрами и субмикрорельефом зерен по сравнению с обычными абразивами. Алмаз – самый твердый из всех известных и полученных искусственным путем материалов (98ГПа) [6], его твердость выше любых современных инструментальных материалов, в том числе в 3–4,5 раза выше твердости обычных традиционно применяемых абразивных материалов (табл. 1).

Именно благодаря высокой твердости алмазное зерно легко внедряется в обрабатываемый материал и разрушает его, обеспечивая высокопроизводительное резание (шлифование) самых твердых материалов. Также алмаз обладает низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, стабильно высокой режущей способностью. Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучава показали, что значительное превосходство твердости алмаза H_A, следовательно, и его износостойкости по сравнению с твердостью любого абразивного материала $H_м$, наблюдается не только при низкой, но и при высокой температуре T (рис. 1) [7].

Таблица 1

Отношение твердости абразивов к твердости некоторых материалов [6]

Абразив	Микро-твердость, Н, ГПа	Отношение твердости			
		ЭБ	КЗ	КБ	Алмаза
Карбид ванадия	11	2,00	3,18	3,99	9,10
Карбид хрома	17	1,30	2,06	2,76	5,85
Электрокорунд белый (ЭБ)	22	1,00	1,59	2,14	4,55
Карбид вольфрама	24	0,92	1,45	1,96	4,15
Окись алюминия (ЦМ-332)	29	0,76	1,20	1,62	3,45
Карбид титана	32	0,69	1,03	1,34	4,12
Карбид кремния зеленый (КЗ)	35	0,63	1,00	1,23	2,86
Карбид бора (КБ)	43	0,51	0,82	1,00	2,30
Алмаз	100	0,22	0,35	0,43	1,00

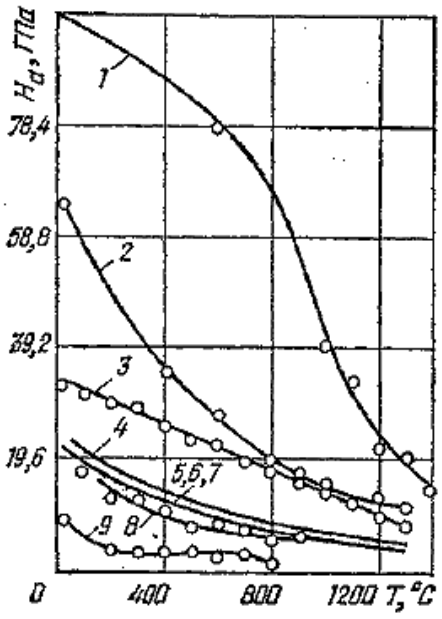


Рис. 1. Зависимость микротвердости от температуры для:

1 – алмаза; 2 – кубического нитрида бора (КНБ); 3 – КЗ; 4 – титанистого (3%) ЭБ; 5,6,7 – циркониевого (10%), хромистого и белого ЭБ; 8 – нормального ЭБ; 9 – циркониевого (60%) ЭБ

Анизотропия алмаза по твердости и другим механическим характеристикам (износостойкость и хрупкость), проявляющаяся по его основным кристаллографическим направлениям, является одной из основных причин высокой и стабильной режущей способности алмазного шлифовального инструмента.

В отличие от других абразивных материалов, алмаз, благодаря его высокой твердости, обладает очень низким коэффициентом трения, не превышающим 0,05–0,20 [6], причем коэффициент трения алмаза по стали в 1,3–1,5 раза меньше, чем у ЭБ и КЗ [6]. Низкий коэффициент трения – весьма важное преимущество алмаза, так как работа трения является главным источником тепловыделения. Благодаря этому при алмазном шлифовании уменьшается составляющая силы трения, что способствует снижению теплонапряженности процесса шлифования и усилий резания. Снижение теплонапряженности процесса позволяет получить высокое качество поверхностного слоя изделия без фазовых и структурных изменений, интенсифицировать процесс обработки и уменьшить влияние скорости скольжения как теплового фактора, а небольшие усилия резания способствуют повышению износостойкости алмазного инструмента и улучшению качества обработки. Другим важным преимуществом алмазов является их высокие температуро- и теплопроводность и низкая теплоемкость. Благодаря этому свойству теплота, выделяемая в процессе шлифования, не аккумулируется на режущей кромке зерна, а быстро отводится вглубь зерна, что способствует уменьшению температуры

в зоне резания. В связи с чем, меньше нагревается как алмазное зерно, так и обрабатываемая поверхность.

Учитывая вышесказанное, можно отметить, что применение алмазного шлифования для обработки сплавов на основе TiAl, имеющих низкую теплопроводность, высокую твердость и хрупкость, которые в свою очередь приводят в процессе обработки к возникновению не только микро-, но и макротрещин на обработанной поверхности, а также прижогов (зон термического повреждения) [2, 8], является привлекательным с точки зрения повышения стойкости инструмента, которая в свою очередь может привести к увеличению производительности обработки данных сплавов, не приводя к ухудшению качества обработанной поверхности.

Наличие и сохранение на алмазах прочных адсорбированных пленок, разделяющих поверхности контакта алмаз-обрабатываемый материал, препятствуют схватыванию, снижают адгезионную составляющую силы трения и, тем самым, повышают эффективность алмазного шлифования. В связи с этим, очень важно при работе алмазными кругами выбирать такие СОТС и применять такие способы подвода их в зону резания, чтобы на рабочей поверхности шлифовального инструмента постоянно образовывались адсорбционные пленки, и не возникала адгезия между алмазом, компонентами связки круга и обрабатываемыми материалами. Более того, из-за низкой удельной теплопроводности алюминидов титана и высоких температур в зоне резания выбор СОТС также является важным аспектом. Охлаждающий смазочный материал должен подаваться в направлении вращения шлифовального круга.

Использование СОТС на масляной основе влечет за собой риск мгновенного сгорания воздушной смеси вследствие высокой реакционной способности горячей стружки. Поэтому автором [4] предлагается использование эмульсии при шлифовании данного материала.

Преимущества алмазного шлифования определяются также эксплуатационными характеристиками алмазов: маркой, формой, размером и износостойкостью алмазных зерен, удельной поверхностью и абразивной способностью алмазных порошков. От формы, геометрии и состояния поверхности алмазного зерна зависят сечение срезаемой стружки, работа деформирования обрабатываемого материала и работа трения зерен и связки о поверхность изделия, силы резания и температура, а, следовательно, и износостойкость инструмента и основные закономерности формирования микрогеометрии режущей части инструмента – шероховатости поверхностей, радиуса округления и зазубренности режущей кромки.

Зерна алмазных порошков выгодно отличаются своей геометрией: по сравнению с зернами обычных абразивных материалов (КЗ, ЭБ) и кубического нитрида бора (эльбора, кубонита) зерна синтетических алмазов имеют значительно меньшие радиусы округления вершин, сильно развитые режущие кромки, число которых может быть 10–15 и более, меньшие значения углов выступов и большую их заостренность.

Кроме того, алмаз имеет более четко выраженные грани и ребра, являющиеся режущими кромками. Средние значения радиусов

округления кромок у алмазных зерен находятся в пределах 1–9 мкм, причем большее число вершин имеют радиусы в пределах 1 мкм. Поэтому алмазные зерна снимают стружки значительно меньшей толщины, чем зерна из обычных абразивов.

Такие геометрические параметры алмазных зерен в сочетании с другими свойствами оказывают большое влияние, прежде всего, на закономерности формирования микрогеометрии, структуры и физико-механических свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала, создают благоприятные условия для микрорезания, в том числе таких труднообрабатываемых инструментальных материалов, как спеченные вольфрамовые и безвольфрамовые твердые сплавы, минералокерамические сплавы, поликристаллические алмазы и нитрид бора, корунд, специальная керамика и др. Это позволяет при работе алмазным инструментом с меньшими силами и более низкими температурами резания производить съем обрабатываемого материала в основном срезанием, что приводит, в первую очередь, к уменьшению степени поверхностного упрочнения обрабатываемого материала.

Как правило, благодаря большому числу режущих кромок зерна синтетических алмазов, резание осуществляют не одной, а несколькими кромками, т. е. суммарная режущая кромка алмазного зерна больше, чем зерна КЗ и других абразивных материалов, что повышает режущую способность алмазного инструмента и снижает напряженность процесса шлифования.

Важную роль в процессах деформации, разрушения и формирования новых поверхностей при шлифовании, доводке и

других видах чистовой обработки играет не только микрогеометрия, но и субмикрогеометрия алмазных зерен. Благодаря микро- и субмикрогеометрии в сочетании с высоким модулем упругости алмазное зерно воздействует на обрабатываемый материал через меньшие контактные поверхности, чем зерна других абразивных материалов. Микро- и субмикровыступы алмазных зерен являются самостоятельными режущими элементами, снимающими стружки в 10–100 раз меньшей толщины по сравнению с толщиной основного режущего элемента, что при высокой остроте алмазных зерен позволяет снимать с изделия тончайшие слои материала с минимальными нагрузками на каждое алмазное зерно. Это является преимуществом алмазной обработки с точки зрения механизма удаления материала высокой твердости и хрупкости, таким, как сплав на основе TiAl. Механизм удаления материала может быть разделен на два типа: хрупкий и пластичный. В хрупком процессе удаление материала происходит через распространение и пересечение трещин, в то время как пластичный процесс характеризуется пластической деформацией материала в виде строгого образования стружки. Авторами [9] было замечено, что при шлифовании хрупких материалов стружка, сформированная пластической деформацией, достигалась при глубине резания меньше 1 мкм. Такой процесс формирования стружки может привести к отсутствию отрицательных результатов обработки, таких как макроскопическое распространение разрыва, формирование микротрещин, фазовое преобразование и высокая степень поверхностного упрочнения. Таким образом, можно сделать вывод о том, что глубина резания меньше 1 мкм может быть

достигнута при алмазном шлифовании микро- и субмикровыступами алмазных зерен.

Потенциальная абразивная способность режущего инструмента зависит от геометрии зерна и износостойкости самих режущих зерен, так как они в процессе работы подвергаются абразивному, диффузионному, адгезионному и другим видам износа, от способа обработки алмазных порошков, а также от обрабатываемого материала. По износостойкости алмаз превосходит все применяемые в технике абразивы. Причем износостойкость алмаза тем выше, чем тверже и хрупче обрабатываемый материал. Высокая размерная стойкость алмазного шлифовального инструмента позволяет обрабатывать изделия с наибольшей точностью.

Для обеспечения высокой работоспособности алмазного инструмента и высокого качества обрабатываемых изделий предпочтительно использование алмазного шлифования в случае низкой адгезии алмаза и обрабатываемого металла. Известно, что обычно между алмазом (углеродом) и металлами не возникает достаточно прочной связи, т.е. адгезия практически отсутствует, так как алмаз химически инертен.

Выводы

Таким образом, основные особенности и преимущества алмазного шлифования определяются, прежде всего, уникальными физико-механическими и химическими свойствами алмаза как инструментального материала по сравнению со свойствами обычных абразивов такими, как: исключительно высокой твердостью при

низкой и высокой температурах; малым коэффициентом трения; наивысшей жесткостью, большей и неодинаковой прочностью и хрупкостью; анизотропией свойств в различных кристаллографических направлениях и совершенной спайностью; высокими тепло- и температуропроводностью и низкой теплоемкостью, а также коэффициентом термического расширения; большими химической и термической стойкостями.

Указанные свойства, а также морфологические особенности кристаллов, такие как более выгодные геометрические параметры и субмикрорельеф зерен, обеспечивают высокие эксплуатационные показатели алмазов (режущую способность и износостойкость). В результате применения алмазов для обработки труднообрабатываемых материалов обеспечивается повышение производительности шлифования, качества и точности обработки, так как при работе алмазным инструментом формирование поверхностного слоя обрабатываемых изделий происходит при низких силе резания и температуре. Работоспособность алмазного инструмента, качество и особенности алмазной обработки в значительной степени зависят от химических, адгезионных, диффузионных и других особенностей взаимодействия алмаза с обрабатываемыми материалами и средами. Взаимодействие алмаза с металлами – одна из наиболее важных характеристик, определяющая основные технологические показатели процесса алмазного шлифования и износ алмаза, в связи с чем необходимо провести научные исследования по обрабатываемости алмазным шлифованием перспективных труднообрабатываемых материалов, таких как

сплавов на основе TiAl. Более того, данные по обработке таких материалов резанием, а именно шлифованием, в отечественной промышленности крайне немногочисленны, что сдерживает широкое применение этих сплавов в производстве. И зарубежный опыт в данном вопросе также не позволяет в полной мере оценить особенности этого вида обработки сплавов на основе TiAl.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mantle A.R., Aspinwall D.K. Surface integrity of a highspeed milled gamma titanium aluminide. // Mater Process Technol. 118:143, 2001–150.
2. Sharman A.R.C., Aspinwall D.K., Dewes R.C., Bowen P. Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide. // Wear 249, 2001 – p. 473-481.
3. Bentley S.A., Goh N.P., Aspinwall D.K. Reciprocating surface grinding of a gamma titanium aluminide intermetallic alloy // Proceedings of IMC 16/AMPT 99, Dublin, Ireland, 3–6 August 1999 – p. 427-435.
4. Fritz Klocke. Manufacturing Processes 2. Grinding, Honing, Lapping. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 – p. 433.
5. Коршунов Б. С. Алмазное шлифование. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 108 с.
6. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Раб А.Ф., Узунян М .Д. и.др. Основы алмазного шлифования. – Киев: Техника, 1978. – 192 с.
7. Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В. Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
8. Clemens H., Kestler H., Eberhardt N. and Knabl W. Gamma Titanium Aluminides 1999 (eds Y. - W. Kim D.M., Dimiduk and M.H. Loretto), TMS, Warrendale, PA , 1999 – p. 209.

9. Bifano T. G., Dow T. A., Scattergood R. O. Ductile-regime grinding: anew technology for machining brittle materials. // Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, May 1991 – p. 184-189.

УДК 621.9; 669.017

И. С. Ковалев, В. Л. Юрьев (ОАО НИИТ)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ TIAL

Введение

Повышение эксплуатационных характеристик изделий ведущих отраслей машиностроения, в частности двигателестроения, приводит к увеличению эффективности применяемых материалов. Концепция разработки новых двигателей основана на принципе повышения тяговой характеристики, что влечет за собой увеличение температуры рабочей зоны и уменьшение веса составных частей двигателя. Разработанные и используемые традиционные материалы за последние 50 лет приблизились к пределу их использования. Дальнейшее усовершенствование требует разработки и освоения новых классов материалов. Сплавы на основе интерметаллического соединения Ti-Al, благодаря их высокотемпературным свойствам, являются перспективными материалами для применения в промышленных отраслях, где к конструкционным материалам предъявляются высокие требования по прочности, жаро- и

коррозионостойкости, восприятию длительных циклических нагрузок и т.д. [1–3]. К этим свойствам относятся:

- высокий предел прочности и модуль упругости;
- высокая температура плавления;
- высокая стойкость против окисления до 900°С на воздухе и в продуктах сгорания топлив и в других агрессивных средах;
- высокая длительная прочность и сопротивление ползучести при температурах до 800-900°С;
- высокая трещиностойкость при температурах ниже температуры перехода из пластичного в хрупкое состояние (600-700°С);
- хорошая структурная стабильность;
- хорошая коррозионная стойкость;
- высокое сопротивление воспламенению (при сравнении с обычными сплавами титана).

Несмотря на их положительные свойства, существует ограничение широкого применения алюминидов титана из-за их высокой стоимости, т.е. основными областями применения этих материалов являются авиакосмическая и автомобильная промышленности [1–5]. Также к недостаткам этих материалов, ограничивающих их широкое применение, относятся сложность получения заготовок вследствие того, что интерметаллид титана TiAl сохраняет упорядоченную структуру до температуры плавления (~1450°С) [3, 6], и обладает недопустимо низкой пластичностью при температуре окружающей среды, и, как следствие, низким коэффициентом обрабатываемости ($k_{обр}$<0,08-0,10). Кроме того,

алюминиды титана TiAl и Ti_3Al при низких температурах являются хрупкими, что также сильно усложняет их механическую обработку. Все это ведет к неизбежному повышению как стоимости получения материала, так и стоимости последующей обработки. Учитывая вышесказанное и с учетом мировой практики использования TiAl, целесообразным является повышение точности заготовительного производства (точное литье, точные методы обработки давлением, порошковая металлургия) с целью уменьшения трудоемкой механической обработки и расхода материала «в стружку» с последующей финишной механической доработкой.

Физико-химические, механические и эксплуатационные свойства сплавов на основе TiAl

В системе Ti-Al образуются интерметаллиды Ti_3Al (α_2-фаза) и Ti-Al (γ-фаза), обладающие значительными областями гомогенности. Область гомогенности алюминида титана Ti_3Al при комнатной температуре простирается от 22 до 35% ат. и сохраняет упорядоченную структуру до температуры 1090°C [7]. Плотность алюминида Ti_3Al равна 4,20г/см^3. При комнатной температуре пластичность алюминида Ti_3Al ничтожно мала (δ<1%), что обусловлено особенностями его дислокационного строения и свойствами дислокаций [3, 8–10]. В процессе деформации происходит метастабильный сдвиг в локальных объемах, что приводит к скоплению дислокаций и зарождению микротрещин. Жаростойкость интерметаллида Ti_3Al не вполне удовлетворительна

при рабочих температурах, что обусловлено образованием при высоких температурах оксидной пленки TiO_2, а не защитной пленки Al_2O_3. Повышение пластичности Ti_3A1 возможно при легировании ниобием, однако к недостаткам сплавов типа Ti-Al-Nb следует отнести их довольно высокую плотность (4,6–5,5г/см^3), превышающую плотность титана.

Сплавы на основе TiAl разделяют на две группы: однофазные γ-сплавы с содержанием алюминия 50–52%; и двухфазные ($\gamma+\alpha_2$)-сплавы с содержанием 44–49% алюминия [7]. Содержание алюминия 46–48 % отвечает максимальной пластичности не только двойных, но и многокомпонентных сплавов [11]. Из-за высокого содержания алюминия плотность алюминида TiAl невелика (3,8 г/см^3). Сплавы со структурой как γ, так и $\alpha_2+\gamma$ называют γ-сплавами. Интерметаллид титана TiAl сохраняет упорядоченную структуру до температуры плавления (~1450°C) [3, 11]. Пластичность интерметаллида TiAl при температурах ниже 700°C также ничтожно мала ($\delta\approx0,5\%$), что обусловлено особенностями его дислокационного строения [3, 11, 12, 13].

Однофазные γ-сплавы так же, как и сплавы на основе Ti_3Al (α_2-сплавы) вряд ли найдут широкое промышленное применение, так как обладают невысокими технологическими свойствами. Во всем интервале температур до температуры плавления интерметаллид TiAl и Ti_3Al сохраняет упорядоченную структуру с ограниченными возможностями пластической деформации [11]. Двухфазные ($\gamma+\alpha_2$)-сплавы, напротив, можно нагреть до температур, при которых они обладают однофазной структурой, представленной

неупорядоченной α-фазой, и по этой причине удовлетворительно подвергаются процессам обработки давлением и литья.

Методы получения заготовок и механическая обработка сплавов на основе TiAl

К настоящему времени разработаны достаточно эффективные технологии заготовительного производства сплавов на основе γ-TiAl с применением традиционных методов получения полуфабрикатов, но с учетом особенных свойств упорядоченной интерметаллической фазы TiAl, таких как:

- ограниченная обрабатываемость даже при высоких температурах;
- ограниченная пластичность и восприимчивость к расслоению по плоскостям спайности, которые требуют определенного микроструктурного состояния и управления микроструктурных дефектов;
- существенная пластическая анизотропия;
- низкая дислокационная подвижность и трудность междислокационного скольжения;
- низкая температуропроводность;
- низкая подвижность по границам зерен, которая замедляет процесс рекристаллизации.

Во многом маршрут технологии обработки сплавов на основе γ-TiAl (рис. 1) подобен используемым технологиям для сплавов на основе никеля и традиционных титановых сплавов.

Рис. 1. Схема маршрута технологии обработки сплавов на основе γ-TiAl, используемая на PLANSEEAG [4]: ГИП – горячее изостатическое прессование; SPF – сверхпластическая формовка; DB – диффузионное покрытие

В рамках двух объединенных проектов, включающих Leistritz Turbinenkomponenten (Ремшайд, Германия, прежде Thyssen Umformtechnik), Rolls-RoyceDeutschland (Dahlewitz, Германия), GfE (Nürnberg, Германия) вместе с Исследовательским центром GKSS, была разработана полная технология изготовления лопаток компрессора высокого давления ГТД из различных сплавов на основе γ-TiAl [3]. Технологический маршрут (рис. 2) включает: трехступенчатый вакуумный электродуговой переплав (VAR), горячее изостатическое прессование слитка, консервацию, операцию горячей экструзии, аннигиляцию, разконсервацию, многоступенчатую

изотермическую штамповку, отжиг для снятия остаточных напряжений и окончательную механическую обработку, либо термообработку и механическую обработку после аннигиляции (без штамповки).

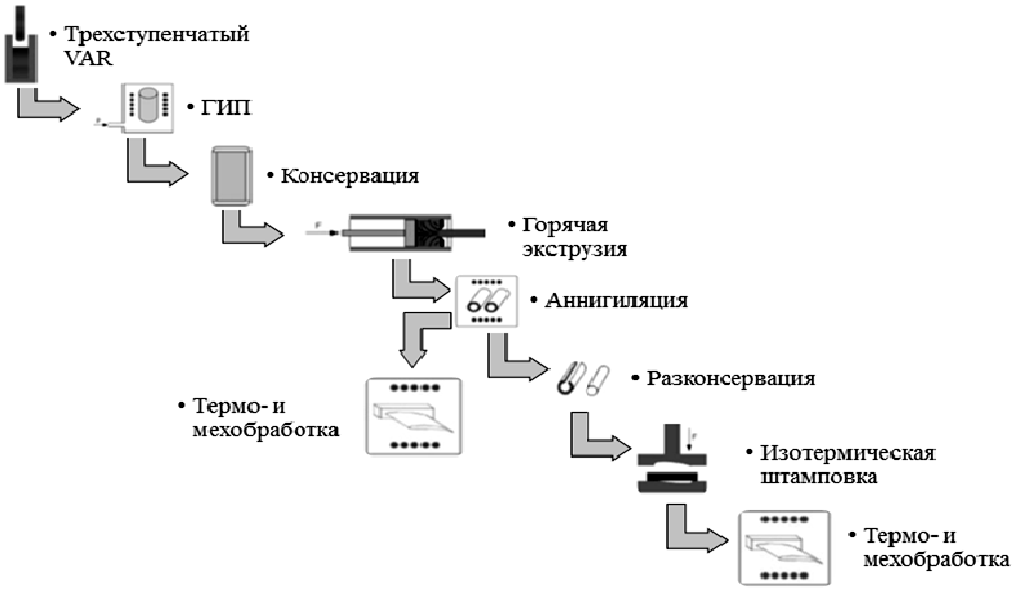


Рис. 2. Схема технологического маршрута изготовления лопаток компрессора высокого давления ГТД из различных сплавов на основе γ-TiAl

Несмотря на достаточно эффективные технологии заготовительного производства сплавов на основе γ-TiAl существует потребность в дальнейшем изучении этих сплавов, в том числе, по обрабатываемости резанием обычными и нетрадиционными способами, а также по оптимизации параметров процессов обработки (режимов резания) [14–16].

В общем, механическую обработку деталей из сплавов на основе TiAl возможно вести традиционными методами (фрезерование, сверление, шлифование), однако необходимо учитывать низкую пластичность и образование трещин на обработанной поверхности.

Проблемами, с которыми сталкиваются при обработке сплавов на основе γ-TiAl, являются скалывание режущих кромок инструмента (фрезерование), прижог обрабатываемой поверхности (шлифование) и локальные деформации вследствие «пережима» [17].

Сотрудниками University of Birmingham's Interdisciplinary Research Centre in Materials for High Performance Applications за последние десять лет проведено обширное исследование механической обрабатываемости различных интерметаллидов титана, включая Ti-48Al-2Mn-2Nb (48-2-2), Ti-45Al-2Mn-2Nb + 0,8% об.TiB2 (45-2-2-0.8), Ti-44Al-8Nb-1B (44-8-1) и Ti-44Al-4Nb-4Zr-0,2Si-0,3B (44-4-4) [16].

Исследования проводились в областях токарной обработки, сверления, шлифования, высокоскоростной обработки, фрезерования, ультразвуковой обработки и электроискровой обработки. Выявлено, что протекание процесса обработки TiAl по сравнению с обработкой обычных титановых сплавов имеет ряд существенных отличий, по крайней мере, для процессов резания, где в формообразовании участвует одна точка режущей кромки, независимо от выбранного типа инструмента. Износ инструмента даже при низких скоростях резания (< 50 м/мин.) характеризуется быстрым ростом рубца износа по задней поверхности, износом в виде лунки вблизи режущей кромки и наростом по передней и задней поверхностям [16]. В дополнении к этому, температура в зоне контакта и сила резания выше, чем при обработке обычных титановых сплавов. Все перечисленные выше факторы в объединении с меньшей площадью зоны контакта инструмент-стружка, значение которой на 50% ниже,

чем при обработке титанового сплава Ti–6Al–4V, приводят к образованию пластической деформации режущей кромки [16].

При обработке γ-TiAl были выявлены дефекты поверхностного слоя, типичные для обычных титановых сплавов, такие как микротрещины, нарушение структуры материала, зоны пластической деформации и зоны термического повреждения [16].

Изучение обработки точением сплавов на основе алюминидов титана авторами [18–20] показало, что обработанная поверхность содержала трещины до 40 мкм длиной и 10 мкм шириной, деформацию пластинчатой структуры, раздробленность частиц TiB_2, а также присутствие изменения микротвердости.

Проблемы, с которыми сталкивались исследователи при сверлении деталей из сплавов на основе TiAl, включают в себя сильную деформацию пластинчатой структуры на глубину до 100 мкм, большие радиальные трещины, длиной до 200 мкм, сильные разрывы материала при входе и выходе сверла [16].

Как отмечают авторы [16, 21], достижение минимальных повреждений обработанной поверхности деталей из сплавов TiAl возможно при шлифовании и высокоскоростной обработке. При шлифовании с использованием соответствующих кругов и режимов резания достигается поверхность без возникновения трещин, снижение глубины деформации пластинчатой структуры до 5 мкм и ограничение глубины увеличения микротвердости до 100 мкм [21].

Для достижения необходимой точности и качества поверхности при обработке сплавов на основе TiAl авторы [22] утверждают о необходимости применения алмазных шлифовальных кругов, причем

при низких скоростях резания и малой величине глубины резания. Как и при обработке других труднообрабатываемых материалов, целостность обработанного поверхностного слоя деталей из сплавов TiAl ухудшается при увеличении износа инструмента и сильном увеличении значений режимов обработки.

Выводы

Анализ информации отечественных и зарубежных источников показывает, что, несмотря на общий интерес к данному материалу как перспективному для применения в тяжело нагруженных условиях эксплуатации и довольно обширной проработки вопроса получения и заготовительной обработки этих материалов, нет однозначных данных по механической обработке, особенно финишной. Таким образом, дальнейшая работа будет направлена на изучение финишной механической обработки сплавов на основе TiAl. Исходя из рекомендаций зарубежного опыта, изучение будет происходить в области алмазного шлифования сплавов на основе TiAl.

ЛИТЕРАТУРА

1. Knippscheer S. and Frommeyer G. Intermetallic TiAl (Cr, Mo, Si) alloys for light weight engine parts. Structure, properties, and applications. // Advanced Engineering Materials, 1(3-4): 187–191, 1999.

2. Austin C. M., Kelly T. J., McAllister K. G., Chesnutt J. C. Aircraft engine applications for gamma titanium aluminide // M. V. Nathal, R. Darolia, C. T. Liu, P. L. Martin, D. B. Micacla, R. Wagner, M. Yamaguchi, (Eds.), TMS, Warrendale, PA, Struct. Intermetallics, 1997, p. 413–425.

3. Fritz Appel, Jonathan David Heaton Paul, Michael Oehring. Gamma Titanium Aluminide Alloys. Science and Technology – WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, 2011. – 739 p.

4. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. / Ed. by Leyens C. and Peters M. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003 – 513 p.

5. Dixon Chandley. Use of gamma titanium aluminide for automotive engine valves // Metallurgical Science and Technology, Vol. 18 (1), 2000. – pp. 8-11.

6. Имаев Р. М., Габидуллин И. Т., Салищев Г. А. Влияние температуры деформации на механические свойства интерметаллида Ti_3A1//Металлы. 1992. № 6. С. 73-79.

7. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys / Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. – ASM International. The Material Information Society, 1994. – 1176 p.

8. Ordered Intermetallics – Physical Metallurgy and Mechanical Behaviors. Eds. C.T. Liu et.al. – Kluwer Academic Publishers, 1992. –701 p.

9. Structural Intermetallics / Ed. R. Darolia, J.J. Lewandowski, C.T. Liu et.al. – TMS, Warrendale, PA, USA, 1993.

10. Корнилов И. И., Нартова Т. Т., Андреев О. Н. Структура и свойства алюминида Ti_3Al и некоторых сплавов на его основе // Строение, свойства и применение интерметаллидов. – М.: Наука, 1974. С. 194-197.

11. Ильин А. А., Колачёв Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. – М.: ВИЛС − МАТИ, 2009. – 520 с.

12. Lipsitt U. A., Shechtman D., Schafrik R. E. The plastic deformation of TiAl//Met. Trans. A. 1975. V. 6A. p. 1991-1998.

13. Гринберг Б. А., Антонова О. В., Инденбаум В. И. и др. Аномалии деформационных характеристик интерметаллида TiAl// ФММ. 1992. № 4. С. 24-32.

14. Aspinwall D. K., Dewes R. C., Mantle A. R. The machining of γ-TiAl intermetallic alloys. // Annals of the CIRP 54(1):99, 2005 –104.

15. Mantle A. R., Aspinwall D. K. Surface integrity of a highspeed milled gamma titanium aluminide // Mater Process Technol. 118:143, 2001–150.

16. Sharman A. R. C., Aspinwall D. K., Dewes R. C., Bowen P. Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide // Wear 249, 2001 – p. 473-481.

17. Clemens H., Kestler H., Eberhardt N. and Knabl W. Gamma Titanium Aluminides 1999 (eds Y. - W. Kim D.M., Dimiduk and M.H. Loretto), TMS, Warrendale, PA, 1999 – p. 209.

18. Mantle A. L., Aspinwall D. K. Tool wear and surface integrity when turning gamma titanium aluminide intermetallics // Proceedings of the 3rd International Conference on Progress of Cutting and Grinding, Osaka, Japan, November 1996 – p. 63-68.

19. Mantle A. L., Aspinwall D. K. Surface integrity and fatigue life of turned gamma titanium aluminide // Mater. Proc. Technol. 72, 1997 – p. 413-420.

20. Zhang H., Wise M. L. H., Aspinwall D. K, Aspinwall E. M. Investigation of machinability of a as HIPped gamma titanium aluminide // Material Issuesin Machine II, 2–6 October, 1994 – p. 89-104.

21. Bentley S. A., Goh N. P., Aspinwall D. K. Reciprocating surface grinding of a gamma titanium aluminide intermetallic alloy // Proceedings of IMC 16/AMPT 99, Dublin, Ireland, 3–6 August 1999 – p. 427-435.

22. Fritz Klocke. Manufacturing Processes 2. Grinding, Honing, Lapping – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 – p. 433.

УДК 620.22;621.43

В. А. Грибановский, В. Л. Юрьев,
С. Н. Никитин, А. М. Ахметов (ОАО НИИТ)

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА

Научно-технический прогресс предъявляет всё больше требований к газотурбинным двигателям (ГТД) по топливной экономичности, по экологии, трудоёмкости изготовления. Чтобы обеспечить возрастающие требования, необходим поиск решений в области снижения массы конструкции, применение более лёгких, но не менее прочных материалов; к таким материалам относятся композиционные материалы (КМ). К сожалению, застой в развитии этой тематики не приводит к положительным результатам, и возникает необходимость заново, но ускоренным темпом, проходить тот путь, который прошли ранее.

При определении основных критериев применения КМ в технике подразумевается получение изделий с характеристиками, не уступающими прототипу и имеющими запас по механическим, стоимостным и другим качествам. Одним из основных узлов конструкции ГТД является рабочее колесо компрессора. Предлагаемое улучшение в изделии это замена сборного колеса из титанового сплава на монолитное колесо из КМ. В России известен способ изготовления рабочего колеса компрессора из КМ, описанный в патенте RU№ 2239100, кл. F04D 29/26, опубликовано 30.10.2002 г.

Технический результат достигается тем, что профилированные рабочие лопатки выполнены зацело с ножкой, соединяющей перо и опорные элементы лопатки, при этом колесо снабжено профилированными проставками, каждая из которых повторяет форму ножки лопатки, выполнена между соседними ножками лопаток и соединена с ними, имеет опорные элементы и хотя бы одну полость облегчения, при этом поддерживающий элемент представляет собой кольцо, а каждый опорный элемент лопаток и проставок выполнен в виде паза, ширина которого не менее ширины кольца. В способе изготовления рабочего колеса центробежного компрессора лопатку с ножкой выкраивают из слоев материала различных по размерам зацело с проставкой, выкладывают в пресс-форме и устанавливают в проставке закладной элемент, удаляемый после прессования, а после установки и центровки лопаток с опорными элементами и проставками и поддерживающих элементов в сборочной пресс-форме их соединяют между собой по контактирующим поверхностям, при этом поддерживающий элемент изготавливают методом намотки протяженных композиционных материалов на оправку с последующим прессованием элемента в пресс-форме.

По данному изобретению достигается получение монолитного колеса, однако в конструкции и способе его получения имеются существенные недостатки:

- относительно повышенная масса колеса;

- для установки поддерживающего элемента необходимо проточить кольцевую канавку, при этом перерезаются волокна композиционного материала, что снижает прочность колеса.

Конструкция рабочего колеса компрессора (RU №2382910, кл. F04D 29/26, опубл. 27.02.2010 г.) содержит отдельные секторы из слоистого композиционного материала на полимерной основе, объединенные в рабочее колесо, по меньшей мере, четырьмя несущими силовыми кольцами из композиционного материала, причем каждый сектор включает одну рабочую лопатку, хвостовая часть которой выполнена в виде ножки хвостовика с криволинейной геометрией, определяемой полками, разделенными пазами, размещенными по высоте ножки, под соответствующие силовые кольца, размещенные в этих пазах.

По данному изобретению достигается получение монолитного колеса, при этом увеличивается относительная масса колеса из-за массивной ступицы, усложняется технология изготовления хвостовика лопаток.

Способ изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из композиционного материала (патент RU №2432502, F04D29/28, опубл. 27.10.2011 г.), включающий раскрои слоев материала лопаток, прессование их в пресс-форме, размещение и центровку лопаток в сборочной пресс-форме и прессование колеса, причем при раскрое слоев материала они выходят за пределы контура лопаток со стороны корневого сечения лопатки на длину, большую длины дуги опорного кольца между соседними лопатками, а со стороны периферийного сечения на длину, большую длины дуги покрывного диска между соседними лопатками, при этом наружные поверхности опорного кольца и покрывного диска выполняют эквидистантно аэродинамическим поверхностям газового тракта,

аэродинамический профиль лопаток оформляют в пресс-форме, затем лопатки укладывают в сепаратор пресс-формы и в полостях сепаратора предварительно формируют опорное кольцо и покрывной диск, после чего сепаратор укладывают в пресс-форму и производят прессование, при этом в матрице формируют наружные поверхности покрывного диска, в пуансоне – наружные поверхности опорного кольца, а в сепараторе формируют внутренние аэродинамические поверхности газового такта покрывного и опорного кольца (прототип).

Данным изобретением решается задача создания высоконагруженной конструкции рабочего колеса центробежного компрессора из композиционного материала при значительном снижении его массы и повышенной жесткости и прочности. Высокие прочностные характеристики обеспечиваются наличием покрывного диска, который можно усиливать путем дополнительной намотки. Однако в рабочих колесах компрессора и вентилятора отсутствует покрывной диск, а без последнего большие нагрузки появятся в месте крепления лопатки в опорном кольце, и при высоких центробежных силах в опорном кольце начнется расслаивание композиционного материала, так как связующее плохо работает на растяжение. Задачей, решаемой данным изобретением, является создание монолитного рабочего колеса компрессора из композиционного материала облегченной конструкции с повышенными прочностными характеристиками.

Поставленная цель достигается тем, что опорное кольцо, передний и задний фланцы формируют одновременно в единой

пресс-форме, а фланцы оформляют из единого раскройного материала.

Способ изготовления рабочего колеса компрессора из композиционного материала включает раскрой слоев материала лопатки и фланцев, прессование лопаток в пресс-форме, размещение и центровку их в сборочной пресс-форме. При раскрое слоев материала часть их поверхности выходит за пределы контура лопаток со стороны корневого сечения лопатки на длину, большую длины дуги опорного кольца между соседними лопатками. При оформлении аэродинамического профиля лопатки на корневом сечении пера лопатки формируют часть опорного кольца длиной от 1 до 20 мм. При раскрое слоев материала для фланцев учитывают размеры переднего и заднего фланцев и ширину опорного кольца, чтобы их получать из единого слоя. Пропитывают слои материала, которые предназначены для фланцев и опорного кольца, и укладывают их в пресс-форму, при этом часть композиционного материала укладывают в полость пресс-формы, которая оформляет передний фланец, а часть материала укладывают в полость сепаратора, которая оформляет аэродинамический профиль опорного кольца. Затем лопатки укладывают в сепаратор, который обеспечивает номинальное расположение лопаток в пресс-форме. После этого пропитывают связующий материал, выходящий за пределы контура лопаток, и предварительно формуют в полости сепаратора в дополнение к имеющемуся там материалу опорного кольца. Далее в пресс-форму устанавливают эластичный пуансон, который нижней частью формирует фланец, периферийной поверхностью опорное кольцо, а

на верхнюю часть эластичного пуансона укладываются слои композиционного материала для получения заднего фланца, устанавливают нажимной пуансон, под действием которого оформляется задний фланец, и дают давление на эластичный пуансон, оформляющий ступицу и фланцы. Производят прессование, разборку известными технологическими приемами. Таким образом, получается монолитное рабочее колесо компрессора жесткой и прочной конструкции с минимальной удельной массой.

На рис. 1 показан общий вид рабочего колеса компрессора. На рис. 2 представлен раскрой материала лопатки. На рис. 3 изображен раскрой слоя композиционного материала для формирования переднего и заднего фланцев и опорного кольца. На рис. 4 показана схема прессования лопаток. На рис. 5 – лопатка после прессования. На рис. 6 – пресс-форма после укладки в нее лопаток и композиционного материала для оформления фланцев и опорного кольца. На рис. 7 – сечение А-А пресс-формы. На рис. 8 – пресс-форма, готовая к прессованию.

Рабочее колесо компрессора (рис. 1) состоит из рабочих лопаток 1, опорного кольца 2, переднего фланца 3 и заднего фланца 4. Опорное кольцо 2 формируется из композиционного материала 5, выходящего за контур лопатки 1 при раскрое (рис. 2), и материала 6, который оформляется из заготовки (рис. 3) и который формирует аэродинамический профиль опорного кольца. Из этой же заготовки формируются передний 3 и задний 4 фланцы (рис. 1 и рис. 3).

В данной конструкции учитывается, что композиционные материалы имеют наибольшую прочность при растяжении вдоль

волокон, а наиболее нагруженным из-за действия центробежных сил является место крепления лопаток к опорному кольцу, поэтому волокна в части 5 под действием указанных сил будут расслаиваться, чтобы исключить этот недостаток опорное кольцо усиливается фланцами, которые объединены частью 6 опорного кольца и выполнены из раскроенного единого материала. Таким образом, передний 3, задний 4 фланцы и часть опорного кольца 6 образуют силовой элемент рабочего колеса, в котором волокна работают на растяжение, так как фланцы являются крепежным элементом, через которые передаются силы, возникающие при вращении колеса. Швеллерообразное сечение силового элемента (фланцы 3, 4 и часть опорного кольца 6) обеспечивает высокую удельную прочность всей конструкции рабочего колеса.

Способ изготовления рабочего колеса компрессора заключается в раскрое различных размеров слоев материала (рис. 2) лопаток 1, при этом слои раскраивают с учетом того, что часть материала 5 предназначена для формирования части 5 опорного кольца 2 (рис. 1). Также производят раскрой слоев материала (рис. 3) для оформления переднего 3, заднего 4 фланцев и части опорного кольца 6 (рис. 1). Количество слоев и их размеры (рис. 2 и рис. 3) рассчитываются для каждого конкретного колеса с учетом конструкции лопатки, ступицы, фланцев и необходимой прочности. Далее каждый слой, который формирует перо лопатки (рис. 2) пропитывают связующим в зоне 1 и 7 (рис. 2), зона 7 раскроя будет формировать часть опорного кольца 8 (рис. 4) длиной 1…20 мм. После этого слои выкладывают в матрице 9 (рис. 4) пресс-формы, устанавливают пуансон 10 и проводится прес-

сование в соответствии с технологическим режимом для применяемого композиционного материала. После распрессовки получается лопатка 1 (рис. 5), на корневом сечении ее образована наметка 8 для части 5 опорного кольца 2 (рис. 1), часть материала 5 остается в исходном состоянии, из которого в дальнейшем сформируется часть 5 опорного кольца 2 (рис. 1). Далее пропитывают раскрой слоев (рис. 3) и выкладывают их в пресс-форме, при этом кольцевая часть 3 (рис. 3) укладывается в сепаратор 11 (рис. 6) в полость 12, где оформится передний фланец 3 (рис. 1 и рис. 6), а часть 6 раскроя укладывают в полость 13 сепаратора 11 (рис. 6 и рис. 7), в которой формируется часть 6 опорного кольца 2 с необходимым аэродинамическим профилем (рис. 1), при укладке совмещают прорези 14 (рис.3) с прорезями 15 сепаратора 11 (рис. 7). Затем в прорези 15 сепаратора 11 вставляют лопатки 1 (рис. 6 и рис. 7) и в полость 13 укладывают материал 5 (рис.5, рис.6 и рис.7), предварительно пропитав связующим. Из материала 5 (рис. 5, рис. 6 и рис. 7) сформируется часть 5 ступицы 2 (рис. 1, рис. 6, рис. 7, рис. 8). Далее в пресс-форму устанавливается эластичный пуансон 16 (рис. 6, рис. 7, рис. 8), например, из резины, полиуретана, надувной и т. д. На него укладывают часть раскроя 4 (рис. 3, рис. 8), устанавливают матрицу 17 (рис. 8) и скрепляют вместе с сепаратором, например, болтами (не показаны). На эластичный пуансон 16 подают давление, например, конусом 18 (рис. 6, рис. 7, рис. 8). Прессование проводят по режиму, соответствующему применяемому композиционному материалу для рабочего колеса.

После разборки пресс-формы получают монолитное рабочее колесо (рис. 1).

Макетное рабочее колесо, изготовленное по данной технологии, представлено на рис. 9, 10, 11. Данным способом решается задача создания высоконагруженной конструкции рабочего колеса компрессора из композиционного материала при значительном снижении удельной массы и повышении жесткости и прочности.

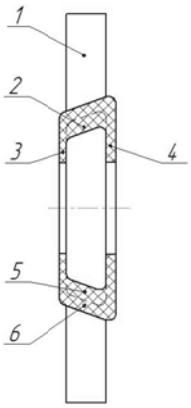


Рис. 1. Общий вид рабочего колеса компрессора: 1 – рабочие лопатки, 2 – опорное кольцо, 3 – передний фланец, 4 – задний фланец, 5 – композиционный материал, 6 – материал, формирующий аэродинамический профиль опорного кольца

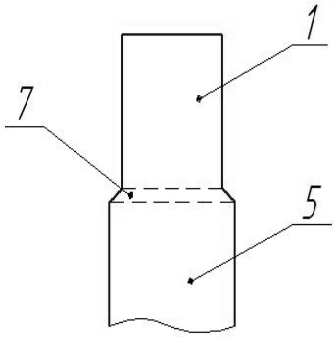


Рис. 2. Раскрой материала лопатки: 1 – зона пера лопатки, 5, 7 – зоны опорного кольца

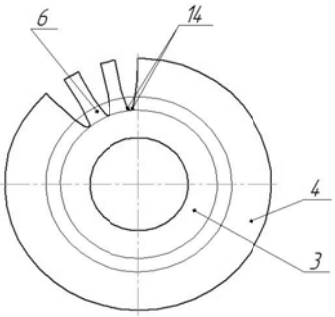


Рис. 3. Раскрой слоёв материала: 3 − материал для формования переднего фланца, 4 − материал для формования заднего фланца, 6 − материал для формования части, 14 − прорезы

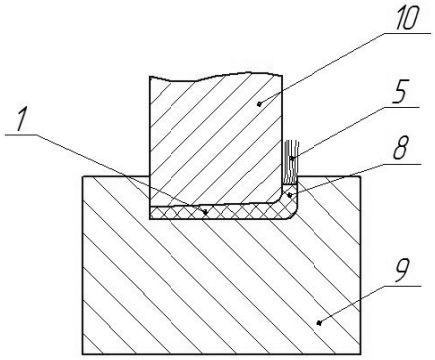


Рис. 4. Выкладка слоёв в матрице пресс-формы: 1 − перо лопатки, 5 − материал для формирования части опорного кольца, 8 − намётка, 9 − матрица пресс-формы, 10 − пуансон

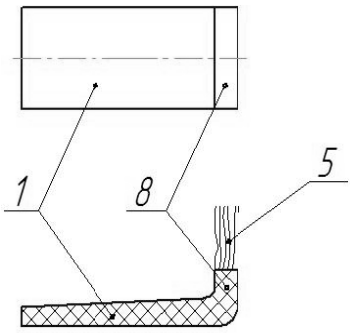


Рис. 5. Лопатка: 1 – перо лопатки, 5 – часть материала для формования части опорного кольца, 8 – намётка

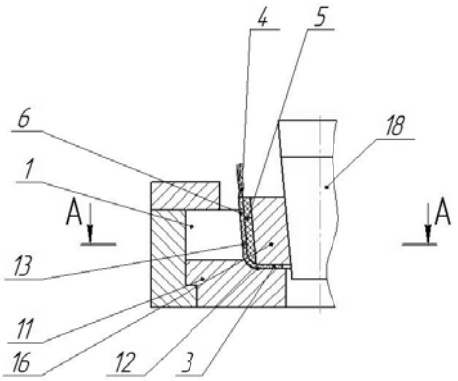


Рис. 6. Процесс укладки: 1 – рабочая лопатка, 3 – передний фланец, 4 – часть раскроя для формирования заднего фланца, 5 – материал для формирования части ступицы, 6 – часть опорного кольца, 11 – сепаратор, 12,13 – полость, 16 – эластичный пуансон, 18 – конус

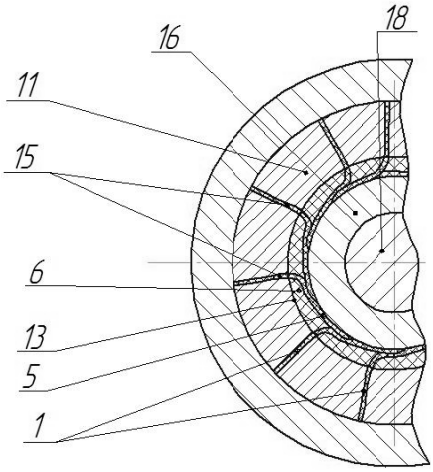


Рис. 7. Расположение слоёв: 1 – рабочая лопатка, 5 – материал для формирования части ступицы, 6 – часть опорного кольца, 11 – сепаратор, 13 – полость, 15 – прорезы для сепаратора, 16 – эластичный пуансон, 18 – конус

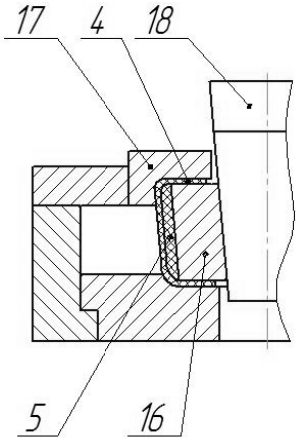


Рис. 8. Пресс-форма в сборе с деталью: 4 – сформированный задний фланец, 5 – сформированная часть ступицы, 16 – эластичный пуансон, 17 – матрица, 18 – конус

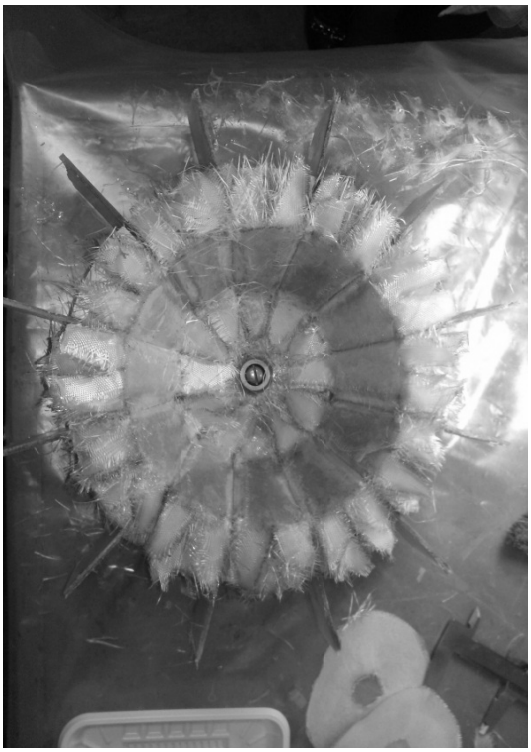


Рис. 9. Процесс формования макетного колеса

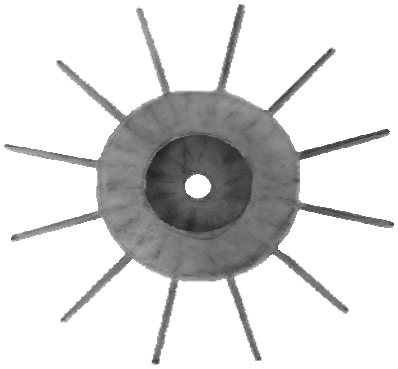


Рис. 11. Макетное колесо

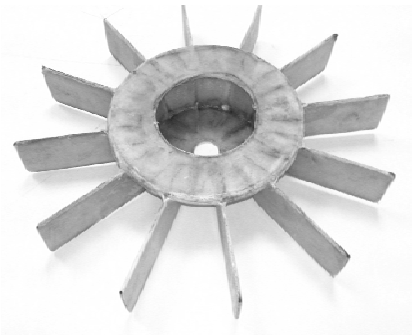


Рис. 10. Макетное колесо

УДК 666.3

В. А. Горелов, С. В. Алексеев (ФГУП «НПЦ «Салют»)

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

На современном этапе производства, при создании авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), повышаются требования к теплонагруженности основных конструктивных элементов двигателя. Так температура рабочего газа перед турбиной достигает 1850 – 2100°К, к тому же значительно повышаются требования по надежности и сроку службы. Столь большие температурные нагрузки

в окислительной среде, с одновременным воздействием знакопеременных силовых нагрузок приводят к тому, что большинство общепринятых и широко используемых в авиационной технике высокопрочных легированных сплавов неработоспособны при таких температурах из-за значительной деградации их физико-механических характеристик. Поэтому материалами, которые могут широко использоваться в ГТД, являются керамические композиционные материалы.

Применение керамических материалов (КМ) обусловлено следующими преимуществами: сохранением механических свойств при высоких температурах, более низкой плотностью, износостойкостью и сопротивлениями коррозии и окислению.

Из недостатков КМ основным считается хрупкость, обусловленная жесткостью связей в кристаллической решетке. В настоящее время основные усилия исследователей при разработке КМ направлены на преодоление хрупкости, повышение уровня прочности, термостойкости и ударной вязкости.

Высокая твердость, отсутствие пластичности, низкая стойкость к тепловым ударам, склонность к растрескиванию создают трудности при механической обработке, особенно при получении изделий сложной геометрической формы с высокой точностью и качеством обработки. Создание высокоэффективных методов обработки КМ представляет одну из сложнейших задач современного машиностроения.

Основным методом получения высокоточных поверхностей деталей из КМ является шлифование. Обрабатываемость КМ

определяется следующими факторами: механическими свойствами керамики (зависящими от условий и параметров спекания), жесткостью технологической системы, химическим взаимодействием между шлифовальным кругом и обрабатываемым материалом.

Шлифование деталей из КМ в основном ведут алмазными кругами. Съем материала в процессе алмазного шлифования осуществляется в результате создания в поверхностном слое керамической заготовки напряжений, превышающих напряжение разрушения ее материала. В результате абразивная обработка может оставлять на обрабатываемой заготовке слой, включающий микротрещины и определенную макро- и микрогеометрию поверхности. Поскольку рост поверхностных микротрещин требует значительно меньшей энергии, чем рост внутренних, а также вследствие их близости к зонам концентрации контактных напряжений при эксплуатации, наличие поверхностных микротрещин оказывает преимущественное влияние на долговечность деталей из КМ [1, 2].

Влияние процесса шлифования на качество деталей проявляется также через геометрические погрешности обработанной поверхности. Отклонения макро- и микрогеометрии детали действуют как концентраторы контактных напряжений при ее эксплуатации [3] и приводят к увеличению рассеяния показателей долговечности деталей из КМ.

По ранее проведенным исследованиям [3] известно, что наибольшее влияние на рост микротрещин в керамической детали

при шлифовании оказывает скорость резания, причем увеличение скорости резания способствует повышению качества деталей из КМ.

Существенное влияние на качество детали оказывает материал связки шлифовального круга. Для повышения качества деталей из КМ ряд зарубежных авторов [3, 4] рекомендуют отказаться от использования шлифовальных кругов на металлической связке, т.е. производить всю механическую обработку таких деталей шлифовальными кругами на органических связках различной твердости.

Проведенные в работе [5] исследования характера излома керамических образцов после механической обработки на различных режимах показали, что с увеличением производительности обработки доля образцов, разрушившихся от роста микротрещин, возрастала с 11 до 92%.

В работе [6] проведены экспериментальные исследования влияния алмазного шлифования на сопротивление разрыву (четырех точечный изгиб) горячепрессованной керамики Si_3N_4. Исследовалось влияние: технологических схем шлифования, зернистости алмазного круга, глубины шлифования и типа связки круга.

При исследовании различных кинематических схем шлифования: с подачей вдоль, поперек оси образца и с переменным направлением подачи относительно координат обрабатываемой поверхности образца; получены наиболее прочные образцы при обработке с продольной подачей вдоль оси.

Зернистость алмазного круга в пределах от 150 до 600 мкм практически не влияет на прочность образцов из нитридной керамики. Значительное снижение прочности получено лишь при шлифовании кругами с зернистостью 1200 мкм.

Глубина шлифования, которая варьировалась в пределах от 0,025 до 0,75 мм/дв.ход, не оказывает заметного влияния на прочность образцов.

Прочность образцов, обработанных кругом на органической связке, по сравнению с кругом на металлической связке оказалась существенно выше.

Таким образом, из полученных результатов [6] можно сделать выводы о том, что наибольшее влияние на прочность образцов из КМ оказывает сам материал, точнее, технология его получения, связка применяемого круга и кинематическая схема шлифования. Глубина шлифования и зернистость круга в пределах допустимых режимов шлифования не влияет на прочность образцов.

Свойства керамики изучены недостаточно, она непредсказуемо разрушается под нагрузкой из-за хрупкости, большого разброса характеристик, внутренних напряжений, низкой термостойкости.

Исследованиями физико-химических свойств нитридной керамики в работе [7] установлено, что:

- разброс модуля упругости заготовок может достигать 20%;
- величина анизотропии модуля упругости в пределах заготовки составляет 12%;
- локальная плотность керамики в пределах одной заготовки меняется до 15%, а в заготовках различных партий – до 3%.

Таким образом, при алмазном шлифовании изделий из КМ имеют место нестационарные процессы, обусловленные переменными физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов, переменным фактическим пятном контакта рабочей поверхности круга с поверхностью заготовки, неравномерным износом алмазного инструмента, вибрациями технологической системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» и т.д. В этих условиях проблема повышения надежности и долговечности изделий из КМ может быть решена с помощью методов и средств технологической диагностики. Получение в каждый момент времени оперативной и точной информации о динамических процессах в зоне обработки заготовок является одной из основных задач технологической диагностики.

Наибольшее распространение в практике технологической диагностики процессов механической обработки наряду с термодинамическими методами получил развитие метод акустической эмиссии (АЭ).

АЭ при абразивном изнашивании в силу дискретности и локальности актов разрушения представляет собой последовательность отдельных импульсов.

Совместный анализ дефектности материала и возникновения дефектов в процессе обработки можно провести, используя введенное академиком Роботниковым понятие поврежденности. При этом общую поврежденность детали после обработки можно представить в виде:

$$\omega = \omega_1 + \omega_2,$$

где ω_1 – исходная поврежденность материала заготовки;

ω_2 – технологическая поврежденность в результате обработки заготовки.

Вероятность разрушения шлифованной детали при прочностных испытаниях на изгиб задается распределением Вейбулла:

$$P(\sigma) = 1 - \exp[-V\left\{\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right\}^m],$$

где V – объем образца;

σ_u – пороговое напряжение;

$\sigma_{0,m}$ – параметры распределения.

Распределение Вейбулла характеризует суммарную поврежденность образцов после шлифования.

Поврежденность материала после обработки обусловлена возникновением новых дефектов, а также развитием (подрастанием) уже имеющихся трещиноподобных дефектов материала. Критерием перехода от возникновения к развитию дефектов является меньшее значение изгибающего разрушающего напряжения.

При составлении математической зависимости диагностики поврежденности после обработки необходимо учитывать: свойства геометрии абразивных зерен шлифовального круга, свойства обрабатываемого материала и условия шлифования.

Кроме алмазного шлифования, КМ можно обрабатывать следующими методами: лазерная обработка, струйная гидроабразивная обработка, электрохимическая и электроэрозионная обработка.

Вышеперечисленные методы не достаточно апробированы в обработке КМ, и в отличие от алмазного шлифования имеют некоторые особенности. Например, струйная гидроабразивная обработка позволяет производить процесс «холодного» резания материала (практически не разогревая деталь). Электрохимическая и электроэрозионная обработки проводятся преимущественно на токопроводящей керамике.

Так как керамика все больше начинает использоваться в качестве конструкционного материала для ответственных деталей, то возникает актуальность ее качественной обработки. При дополнительном исследовании механических и физико-химических методов обработки керамики можно составить качественные модели поврежденности материала, которые позволят рационально подбирать режимы обработки и тем самым увеличивать долговечность деталей и надежность конструкции в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. The nature of machining damage in brittle materials / D. B. Marchall, A. G. Evans, B. T. Khuri – Yakub etal // Pros. Poyol. Soc (London) Ser. A. – 1983. – v385, № 1789. p-461 -475
2. Marsh D. M. Stress concentrations at crystal surfaces and the embrittlement of sodium chloride // Phil. Mag. – 1960 v 5, №58, P1197 – 1199
3. Gielisse P. I., Stanislao I., Mechanical methodis of ceramic finishing // NBS, 1972 № 348 – Spec. publ. – p5 – 35
4. Томимори Х. Шлифование тонкой керамики // Кикай Гидзюцу, 1984. Т.32. №2 – С. 36 – 40.
5. Ито С. Прецизионное шлифование тонкой керамики // Кикай Токогу, 1983. – Т. 27, №6. С. 36 – 40.

6. Allor R. L., Govila R. K., Whalen T. I. Influence of Strength Properties of Turbine Materials. Engineering and Research staff, Ford Motor Go Deaborn, M14821. Ceramic Proceedings, 1982 v 3, №7/8 pp 392 – 404.
7. Обоснование методики входного неразрушающего контроля. Технический отчет УДК 620 179. 16: 621. 039 МИФИ 1991 г.

УДК 621.793; 661.862.22

В. Н. Аникин, А. А. Пьянов (ФГУП «НПЦ «Салют»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИЙ AL_2O_3 НА ТВЕРДЫЙ СПЛАВ

Основным фактором, сдерживающим повышение производительности процесса резания, является применение инструмента с низкими эксплуатационными характеристиками.

Одним из наиболее перспективных способов повышения эксплуатационных характеристик инструмента является применение режущих пластин с износостойкими покрытиями, которые могут увеличивать стойкость инструмента более чем в 3 раза, а также скорость резания на 30 – 60 %.

В последнее время наибольшее внимание уделяется покрытиям на основе соединений алюминия. Разработано покрытие (Al,Ti)N с содержанием AlN более 50 атомных долей, %, позволяющее работать на повышенных скоростях резания.

Наиболее эффективным является покрытие, в состав которого входит оксид алюминия.

Применение инструмента с покрытием $A1_20_3$ фирмой «Ceratizit» позволило повысить скорость резания в 1,5 раза и занять лидирующее положение в производстве режущих твердосплавных пластин.

Оксид алюминия на твердосплавные пластины наносится методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). Температура нанесения покрытия на этой установке составляет max-1050°C. Поэтому методом CVD можно нанести в основном γ-$A1_20_3$. т. к температура перехода γ-$A1_20_3$ в α-$A1_20_3$ составляет 1200°C. Присутствие в покрытии обеих модификаций может значительно повысить эксплуатационные характеристики инструмента, т.к. пористая метастабильная γ-$A1_20_3$ обладает высокими тепло- и электроизоляционными свойствами, α-$A1_20_3$ имеет высокую твердость.

До настоящего времени из-за высокой температуры получения α-$A1_20_3$ такое покрытие для режущего инструмента еще не создано.

Поэтому работа по созданию композитного покрытия, содержащего слои α-$A1_20_3$ и метастабильные модификации $A1_20_3$, является актуальной.

В работе использовались сменные многогранные пластины из твердого сплава. Барьерный слой, а также алюминий для оксидирования можно наносить различными способами, нами был выбран физический метод физического осаждения из газовой фазы (PVD) на установке ННВ.6-И1(установка российского производства).

В качестве барьерного слоя применялось нитридное покрытие, применяющееся сейчас как серийное покрытие в промышленности. Необходимость нанесения барьерного слоя на твердосплавную пластину связана с окислением поверхности твердого сплава, что подтверждено результатами рентгенофазного анализа.

На основании анализа литературных данных установлено, что многофункциональные слои α-$A1_20_3$, а также метастабильные модификации $A1_20_3$ можно получить различными методами, однако, наиболее приемлемым является метод микродугового оксидирования (МДО). МДО с успехом используется для повышения эксплуатационных характеристик деталей из легких сплавов. Однако до настоящего времени для получения износостойких покрытий на режущем инструменте этот метод не применялся. Также данный метод применим для покрытия авиационных деталей, таких как лопатки газотурбинных двигателей, пар трения и т.д.

Процесс оксидирования методом МДО производился на установке, схема которой приведена на рис. 1.

Были выявлены закономерности микродугового оксидирования, из которых следует, что при низких плотностях тока нарастание интенсивности оксидного слоя происходит медленно. Это связано с ростом плотной твердой пленки из $A1_20_3$. При возрастании плотности тока происходит резкое увеличение оксидного слоя. Это связано с одновременным протеканием двух процессов: электрохимического окисления металла и разрыхления искрами формирующегося покрытия.

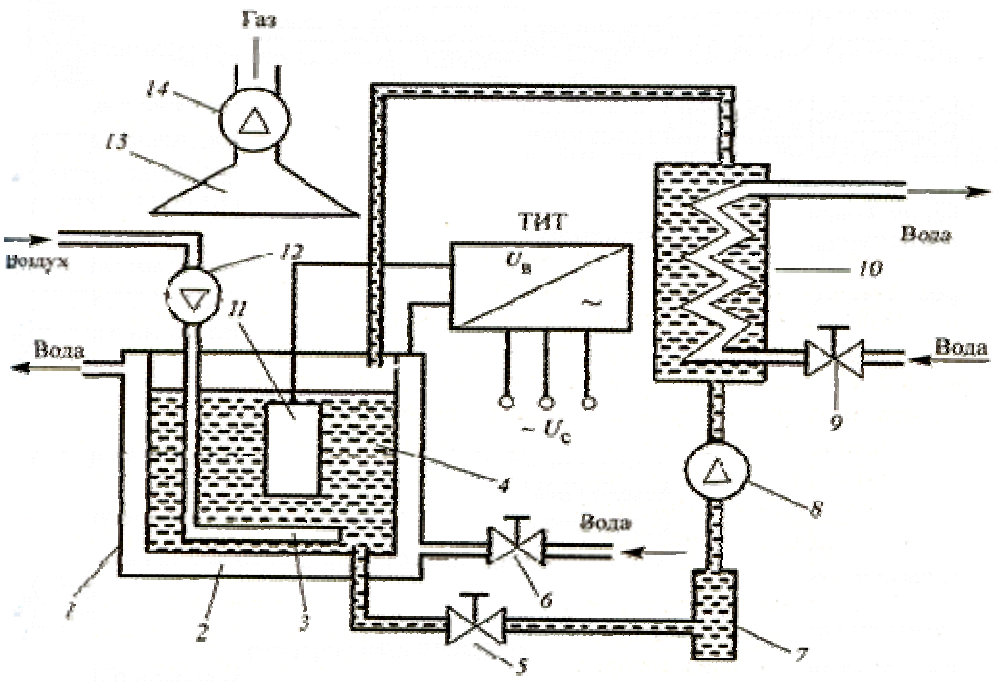


Рис. 1. Функциональная схема установки МДО: 1 – гальваническая ванна; 2 – рубашка водяного охлаждения; 3 – барботер; 4 – электролит; 5, 6, 9 – запорная арматура; 7 – фильтр; 8 – водяной насос; 10 – бак с теплообменником; 11 – деталь; 12 – воздушный компрессор; 13 – вытяжной зонтик; 14 – вытяжной вентилятор

Интенсивность нарастания оксидного слоя на толстых покрытиях меньше. Это связано с тем, что толстые покрытия разогреваются медленнее, чем тонкие.

С помощью рентгенофазного анализа установлено, что на образцах была получена стабильная α-$A1_20_3$ и метастабильные пористые модификации -$A1_20_3$, а также обнаружены следы присутствия А1. На образце с общей толщиной алюминиевого слоя 10 мкм четко видны пики от подложки. На последующих образцах данные пики отсутствуют. Фото шлифа поверхности представлено на рис. 2.

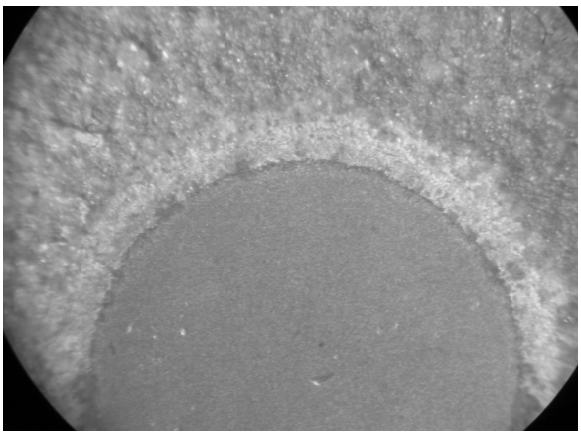


Рис. 2. Фотография поверхности шлифа

Микротвердость покрытия определялась послойно. Микротвердость алюминиевого покрытия составила 55–60 кг/мм^2, барьерного слоя – 2000–2100 кг/мм^2.

Верхний кремовый слой, состоящий, скорее всего, из $A1_20_3$-карра с добавками delta, theta,beta и eta, хрупкий и пористый. Его твердость измерить не удалось в связи с тем, что при нагрузке индентором покрытие крошилось.

Прилегающий к барьерному слою серый плотный слой оксида алюминия, представляющего из себя композит, состоящий из матрицы, судя по микротвердости, γ-$A1_20_3$ (с твердостью 2300–2500 кг/мм^2) и более твердых включений α-$A1_20_3$ (с твердостью 2700–3300 кг/мм^2).

Из экспериментальных исследований по определению стойкости пластин, покрытых с помощью МДО слоем из $A1_20_3$, следует, что при возрастании плотности тока до определенного значения, стойкость пластин возрастает, а далее падает, что объясняется повышенной пористостью поверхности пластины.

Наибольшую стойкость имеют пластины с общей толщиной 10–20 мкм. На пластинах с общей толщиной более 20 мкм, стойкость осталась такой же, как и твердого сплава с барьерным слоем, что, по-видимому, связано с повышенным содержанием чистого алюминия в оксидном покрытии.

Испытания по определению коэффициента стойкости проводились на станке Л-220 (установка российского производства). В качестве обрабатываемого материала использовался сплав ВТ3-1. Испытания проводились на следующих режимах: V=130 м/мин., S=0,2 мм/об.; t=1,0 мм. Коэффициент повышения стойкости увеличился в 3 раза по отношению к используемым в настоящее время покрытиям и составил 5 к непокрытой основе.

Выводы

1. Изучена кинетика окисления алюминиевого покрытия на твердом сплаве методом МДО.
2. Экспериментально установлены два механизма формирования оксидной пленки. По первому механизму образуется плотная мелкозернистая пленка, а по второму – рыхлая дендритная.
3. Получены плотные слои стабильной модификации α-$A1_20_3$ и γ-$A1_20_3$ в композитном покрытии.
4. Показано, что стойкость режущих пластин с композитным покрытием возрастает в 3 раза по сравнению с применяемым серийным покрытием.
5. Предложена оптимальная технологическая схема получения композитного покрытия, состоящего из 2 процессов: нанесение

барьерного слоя и алюминия ионно-плазменным методом и последующая обработка алюминия проводилась методом микродугового оксидирования.

УДК 621.45

В. С. Арсентьев (ОАО УНПП «Молния»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ “УКП-2008” ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГТД НА НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Введение

Устройство контроля параметров модели УКП-2008 [1], реализующее блочно-модульный принцип аппаратной и программной части, используется на испытательной станции ОАО “НПП “Мотор” для выполнения испытаний различных типов газотурбинных двигателей (ГТД) на установившихся режимах работы с 2011 года.

Для обеспечения возможности проведения испытаний современных ГТД на неустановившихся режимах специалистами ООО “ЦКС “БаСК” для устройства УКП-2008 было разработано специализированное программное обеспечение (ПО), которое выполняется на ПЭВМ под управлением операционной системы Windows и решает следующие основные задачи:

1. Обмен данными с измерительным крейтом устройства, включая синхронизацию времени измерения каналов крейта с системным временем ПЭВМ.

2. Регистрация, обработка и отображение результатов измерений параметров ГТД и стендового оборудования на неустановившихся режимах работы в темпе проведения испытания.

3. Настройка ПО для различных вариантов испытаний изделий.

Первая задача выполняется полностью автоматически без участия оператора.

Вторая группа задач в основном выполняется по командам оператора (моториста) во время проведения испытания изделия и после его завершения при просмотре архива испытания.

Настройка ПО выполняется автоматически перед началом испытания в соответствии со специальным текстовым файлом (так называемым файлом технологии), который подготавливается технологом для различных вариантов испытания того или иного конкретного изделия.

Выполнение испытаний изделий на неустановившихся режимах

Порядок работы с программой при проведения испытания изделия следующий:

1. Ввод параметров запуска изделия.

2. Выбор неустановившегося режима.

3. Настройка экрана регистрации параметров для выбранного режима (при необходимости).

4. Регистрация параметров на неустановившемся режиме работы изделия.

5. Обработка и просмотр результатов регистрации параметров.

6. Просмотр результатов регистрации параметров на ранее записанных неустановившихся режимах из архива испытания текущего запуска (при необходимости).

Далее пункты 2–6 повторяются.

Ввод параметров запуска изделия выполняется перед началом испытания в диалоговом окне, показанном на рис. 1.

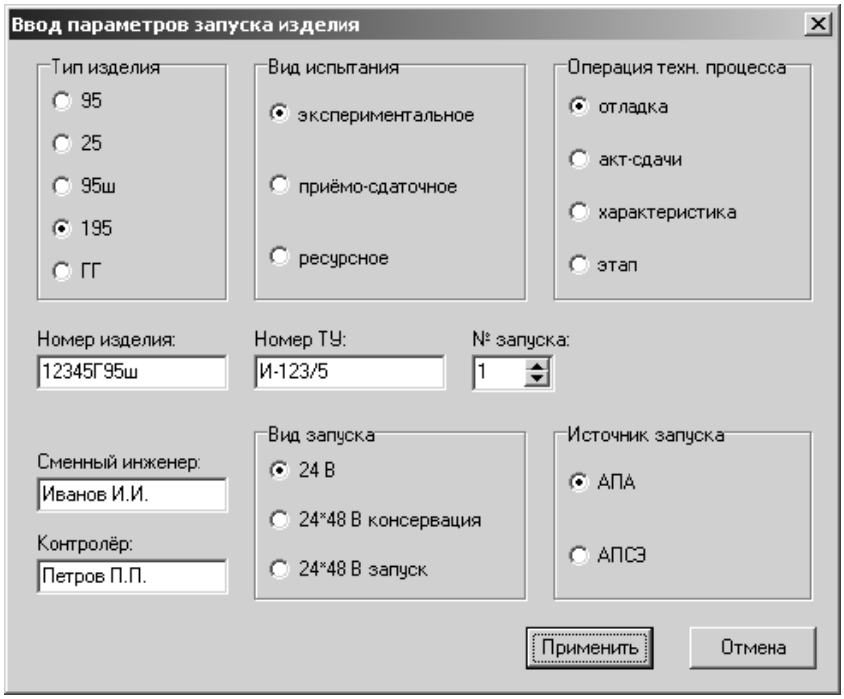


Рис. 1. Окно ввода параметров запуска изделия

В этом окне вводятся: номер испытываемого изделия, его тип, вид испытания, операция технологического процесса, вид и источник запуска, другая служебная информация, используемая для предварительной настройки программы перед запуском и её работы во время испытания.

При проведении испытания параметры запуска изделия, результаты регистрации параметров на неустановившихся режимах,

различная служебная информация сохраняются на диске в специальном архиве испытания. Для каждого запуска в архиве испытаний создаётся подкаталог, в который записывается вся относящаяся к данному запуску информация.

Информацию из архива испытания можно просматривать, обрабатывать, выводить на печать как во время проведения испытания, так и после его завершения.

В процессе проведения испытания программа может выполнять следующие основные операции:

-измерение параметров на установившихся режимах работы изделия;

-регистрация параметров на неустановившихся режимах работы изделия;

-просмотр записанных данных неустановившихся режимов из архива испытания текущего запуска.

Выбор неустановившегося режима для регистрации параметров выполняется в диалоговом окне, показанном на рис. 2.

Перечень доступных неустановившихся режимов и их настройки (список регистрируемых на режиме измеряемых параметров, список расчётных параметров, вид графиков параметров на экране и т.д.) загружается в программу перед началом запуска и определяется типом изделия и другой служебной информацией, вводимой перед началом испытания (см. рис. 1).

После выбора режима из списка на экран выводится показанное на рис. 3 окно регистрации неустановившегося режима.

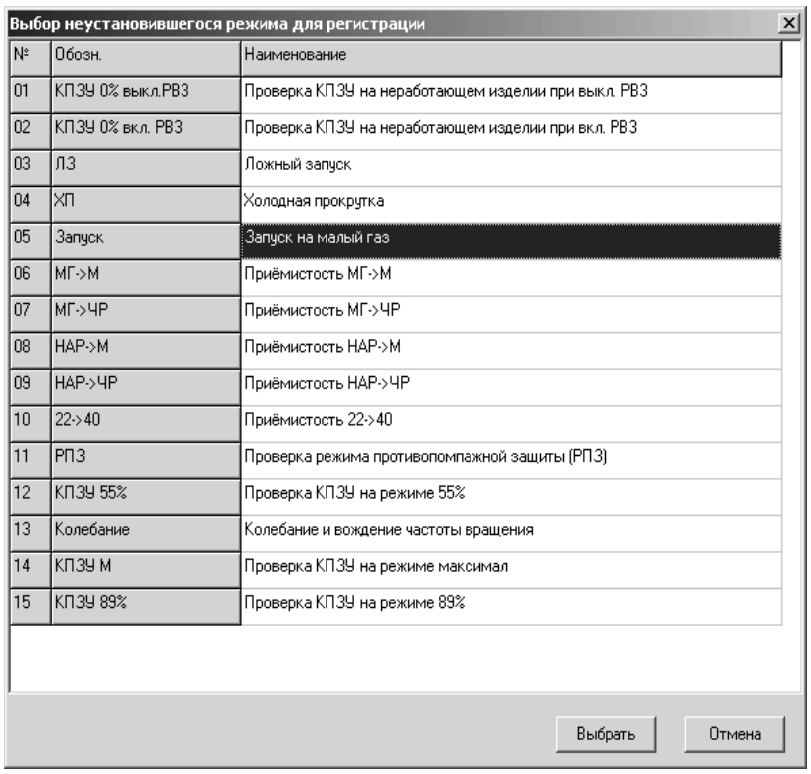


Рис. 2. Окно выбора неустановившегося режима

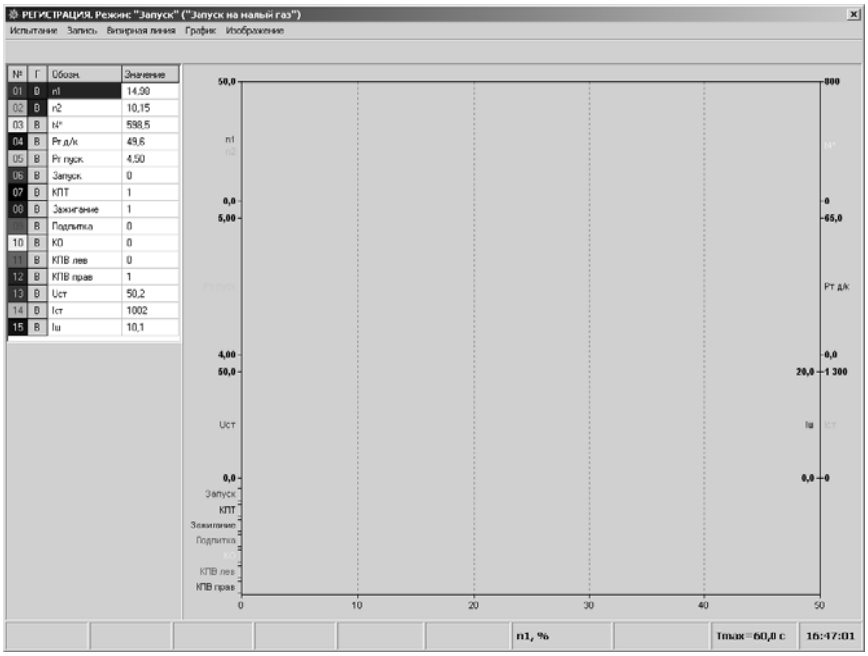


Рис. 3. Окно регистрации неустановившегося режима

В левой панели в табличной форме выводится список всех доступных на данном режиме измеряемых (регистрируемых) и расчётных параметров. В таблице выводятся текущие измеренные

значения (для измеряемых параметров) или значения параметров (измеряемых или расчётных) в сечении визирной линии. Таблица параметров также используется для быстрого изменения видимости графика параметра, вызова диалоговых окон для редактирования свойств графика или свойств вертикальной координатной оси.

Правая панель окна служит для отображения графиков параметров из таблицы. Положение на экране и масштаб графика задаётся свойствами вертикальной координатной оси для данного параметра.

Внизу окна расположена строка состояния, в которой выводится текущее системное время, максимальное время записи на режиме, обозначение выбранного в таблице параметра и другая информация в зависимости от режима работы программы.

При необходимости можно изменить установленное по умолчанию для данного неустановившегося режима максимальное время записи в диапазоне от 1,0 до 120,0 с.

Кроме того, перед началом записи можно выполнить настройку свойств графиков регистрируемых параметров (например, цвет, толщина, стиль линии графика), свойств вертикальных координатных осей параметров (диапазон значений, положение на экране и др.) и координатной оси времени (диапазон значений, видимость координатной сетки). Эти настройки также можно выполнить после завершения записи при просмотре архива испытания.

Запуск и останов регистрации параметров на неустановившемся режиме выполняется по команде оператора. Останов происходит

также автоматически, если время записи превысит максимальное значение, установленное для данного режима.

После остановки регистрации записанные данные сохраняются в архиве испытания, и программа автоматически переходит в режим просмотра неустановившегося режима (см. рис. 4).

При необходимости можно выбрать для просмотра любой режим из архива испытания.

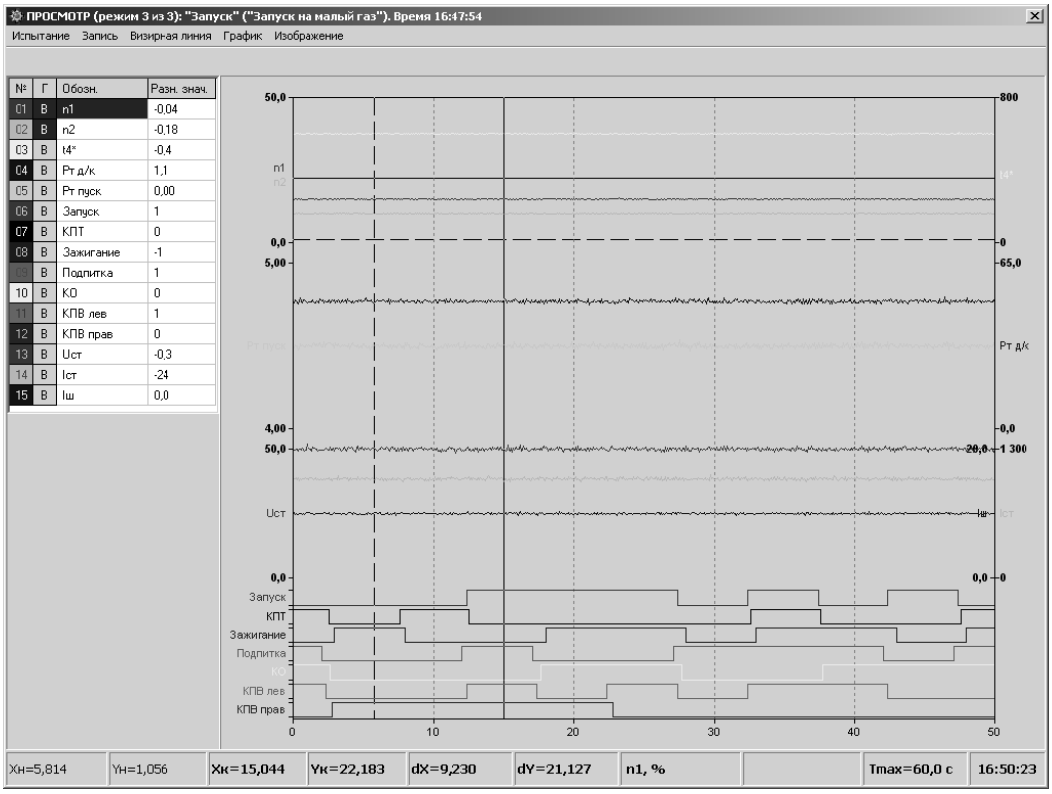


Рис. 4. Окно просмотра неустановившегося режима

При просмотре неустановившегося режима с помощью указателя мыши можно выполнять масштабирование и сдвиг графиков параметров по вертикали и горизонтали.

С помощью визирной линии можно определить значение параметра в заданном временном сечении (вертикальная визирная

линия) или в заданной точке (визирная линия в виде перекрестия). В режиме измерения с помощью двух визирных линий можно определить разность значений параметра в двух соответствующих временных сечениях.

Перемещение визирной линии выполняется с помощью указателя мыши. Для точной установки визирной линии оператор также может вводить в цифровом виде значения координат *X* и *Y*. При этом можно задавать или абсолютное положение визирной линии, или величину смещения относительно её текущего положения.

Кроме того, положение визирной линии можно задавать по текущим значениям расчётных параметров неустановившегося режима. Например, координата *X* может быть установлена в момент времени, соответствующий выходу оборотов ротора низкого давления (РНД) на малый газ (параметр $T_{ЗАП}$), а координата *Y* – по уровню, соответствующему максимальному значению температуры газов за турбиной (параметр t_{4max}).

Программа позволяет сохранять изображение графиков параметров на диске, выводить его на печать или копировать в буфер обмена Windows.

Обработка параметров неустановившегося режима ГТД выполняется по команде оператора сразу после завершения регистрации неустановившегося режима или при просмотре режима из архива испытания.

После выполнения обработки расчётные временные ряды (например, сглаженные значения параметров, графики производной сигнала и др.) отображаются в окне неустановившегося режима.

Значения расчётных характерных моментов времени и оценок характеристик можно просматривать в виде протокола (рис. 5) или в табличном виде (рис. 6).

ПРОТОКОЛ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Номер изделия: Г2200195057Р Номер стенда: 1

Дата: 02:05:12 Время: 11:52:29

Вид испытания: экспериментальное

Номер запуска: 25

Атмосферные условия: ф = 0,62 t0 = 10,2 B0 = 740,5

Запуск на малый газ

№	Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Факт. знач.	Знач. по ТУ
1	Напряжение источника запуска перед запуском	Uист исх	В	30,2	28±1
2	Давление топлива на входе в изделие перед запуском	Рг вх исх	кгс/см2	1,8	0,8...3,0
3	Температура воздуха на входе в изделие исходного режима	t*вх исх	°С	10,4	
4	Давление пускового топлива на 16-й секунде запуска	Рг пуск 16с	кгс/см2	4,18	4,5±0,5
5	Частота вращения РВД на 20-й секунде запуска	n2 20с	%	21,619	
6	Давление топлива в доп. коллекторе на 20-й секунде запуска	Ргдк 20с	кгс/см2	11,0	
7	Сила тока стартера на 20-й секунде запуска	Iст 20с	А	827,9	max 950
8	Сила тока шунта на 20-й секунде запуска	Iш 20с	А	4,81	
9	Приведенная частота вращения РВД закрытия левого КПВ	n2прКПВлев	%	42,932	47(-5)
10	Приведенная частота вращения РВД закрытия правого КПВ	n2прКПВправ	%	43,220	47(-5)
11	Максимальная температура газов за турбиной	t4*max	°С	449,8	max 700
12	Время запуска	Тзап	с	33,748	max 55
13	Максимальный ток стартера	Iст max	А	1316,8	max 1300
14	Максимальный ток шунта	Iш max	А	18,69	

Источник запуска: АПА

См. инженер: _____ (Грищенко Ю.А.)
(подпись, дата)

Контролёр: _____ (Гайсин В.М.)
(подпись, дата)

Рис. 5. Окно просмотра протокола обработки параметров неустановившегося режима

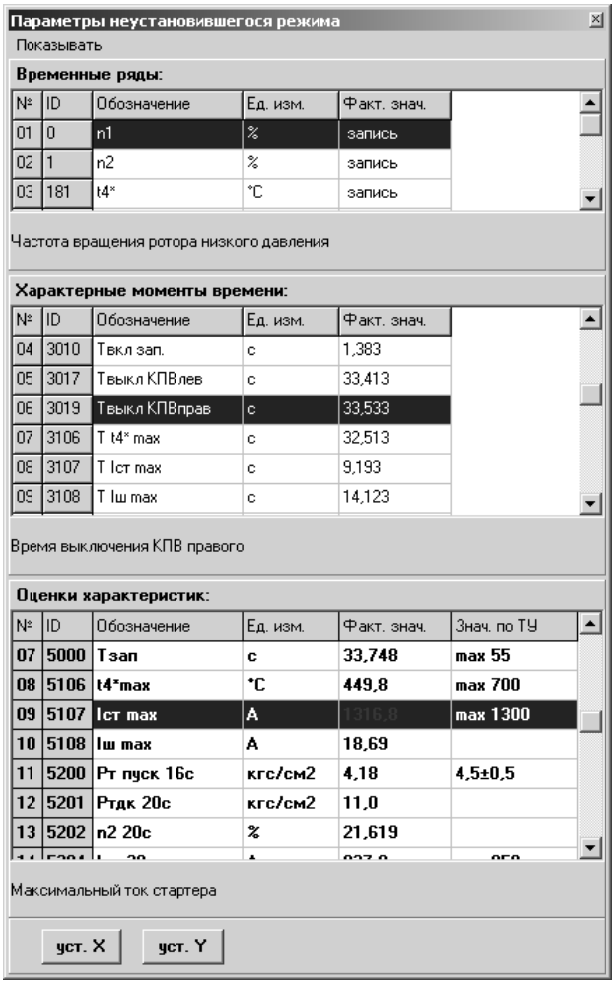


Рис. 6. Окно просмотра параметров неустановившегося режима

Для параметров с допусковым контролем кроме фактического (расчётного) значения параметра выводится его значение по ТУ. Если фактическое значение не соответствует допуску по ТУ, то оно выделяется красным цветом.

В протокол обработки заносятся только те параметры, которые требуются по технологии для формирования отчётной документации по испытанию. В таблице параметров отображаются все расчётные параметры для данного неустановившегося режима, в т.ч. и промежуточные значения. Фактические значения параметров из

таблицы также можно использовать для точной установки положения визирной линии в окне просмотра неустановившегося режима (рис. 6)

Файл технологии испытания

Настройка программы устройства УКП-2008 для различных видов испытаний изделий на неустановившихся режимах работы выполняется с помощью специального файла технологии. Для каждого типа изделия существует свой файл технологии, в котором задаются: перечень всех неустановившихся режимов, доступных для данного типа изделия; список регистрируемых и расчётных параметров для каждого режима; порядок обработки параметров на режиме; описание формы протокола; различные настройки отображения графиков на экране и т.д.

Файл технологии представляет собой стандартный XML документ. Для его просмотра и редактирования можно использовать любой текстовый редактор.

Кроме файла технологии при испытании изделия используется файл архива испытания. Для каждого запуска создаётся отдельный архивный файл. Он содержит те же элементы, что и файл технологии. Дополнительно в него записываются служебные параметры запуска и результаты измерения и обработки параметров на неустановившихся режимах.

Файл технологии имеет следующую структуру:

- список описаний параметров;
- список неустановившихся режимов;
- список общих алгоритмов обработки.

Файл технологии и архивный файл используются при испытании изделия следующим образом.

Оператор выбирает перед началом испытания тип изделия и вводит другие параметры запуска (см. рис. 1).

Файл технологии, соответствующий выбранному типу изделия, загружается в память программы.

Программа создаёт файл архива испытания для данного запуска.

В архив испытания из файла технологии копируются описания параметров и общие алгоритмы обработки параметров на неустановившихся режимах. Также в архиве испытания создаётся список служебных параметров, и устанавливаются их значения из диалогового окна параметров запуска изделия.

Список неустановившихся режимов в файле технологии содержит перечень всех режимов, которые могут использоваться для данного типа изделия (по одному экземпляру режима каждого типа). Этот список из файла технологии в архив испытания автоматически не копируется, поэтому сразу после начала запуска список неустановившихся режимов в архиве испытания будет пустым.

В процессе выполнения испытания изделия оператор выбирает необходимый тип неустановившегося режима из списка файла технологии. Программа создаёт копию выбранного режима, которая после завершения регистрации параметров добавляется в список неустановившихся режимов архива испытания.

Таким образом, архив испытания будет содержать только те неустановившиеся режимы, на которых выполнялась регистрация параметров на данном запуске. Некоторые типы режимов могут

появляться в списке один или несколько раз, другие типы режимов – отсутствовать.

Если оператор изменяет какие-либо параметры неустановившегося режима, например, настраивает параметры отображения графиков, то эти изменения будут относиться только к архиву данного испытания. Файл технологии при этом не изменяется.

При завершении испытания программа удаляет неиспользуемые на данном запуске элементы из списков описаний параметров и общих алгоритмов обработки и сохраняет архив испытания на диске.

Ниже даётся описание составных элементов файла технологии.

Список описаний параметров содержит перечень описаний всех измеряемых и расчётных параметров, используемых на всех неустановившихся режимах. Для каждого параметра задаётся: идентификатор, обозначение, наименование, единица измерения, строка форматирования значения параметра.

Список неустановившихся режимов содержит перечень описаний всех неустановившихся режимов, доступных для данного типа изделия, и имеет следующую структуру:

- наименование режима;
- обозначение режима;
- максимальное время записи параметров;
- списки параметров режима:
  - измеряемые временные ряды;
  - измеряемые характерные моменты времени;
  - измеряемые оценки характеристик;

- расчётные временные ряды;
- расчётные характерные моменты времени;
- расчётные оценки характеристик;

- список алгоритмов обработки параметров режима;
- описание отображения графиков на экране;
- описание формы протокола.

Все используемые на данном режиме параметры в соответствии с их назначением делятся на три типа.

Временной ряд – это запись изменения значений параметра во времени (например, частота вращения РНД – $n_1(t)$, температура газов за турбиной – $t_4(t)$.

Характерный момент времени соответствует точке на оси времени (например, время включения клапана отсечки – $T_{КО\ ВКЛ}$, время начала переходного процесса – T_0). Время измеряется в секундах и отсчитывается от момента начала записи неустановившегося режима.

Остальные параметры называются оценками характеристик (например, максимальная температура газов за турбиной – t_{4max}; время работы клапана отсечки – $\Delta T_{КО}$; величина колебания/вождения оборотов – Δn_1).

Все три типа параметров могут быть измеряемыми или расчётными.

Значения измеряемым параметрам присваиваются один раз во время записи неустановившегося режима. После завершения записи их значения изменить нельзя. Эти значения являются исходными

(входными) данными для алгоритмов обработки неустановившегося режима.

Расчётные параметры получают свои значения в результате работы алгоритмов обработки. Их значения можно многократно пересчитывать, например, для разных вариантов обработки неустановившегося режима.

Список алгоритмов обработки содержит перечень алгоритмов обработки и допускового контроля параметров неустановившегося режима. Каждый элемент этого списка соответствует одному алгоритму и имеет следующую структуру:

- идентификатор алгоритма;
- список идентификаторов входных параметров;
- список идентификаторов выходных параметров;
- параметры настройки алгоритма.

Обработка неустановившихся режимов выполняется отдельно для каждого режима из архива испытания. В процессе обработки режима из его списка алгоритмов последовательно вызываются алгоритмы, которые: получают входные значения измеряемых и/или расчётных параметров, обрабатывают их; присваивают полученные выходные значения расчётным параметрам; устанавливают состояние допускового контроля измеряемым или расчётным параметрам. Обращение алгоритма к входным и выходным параметрам выполняется по идентификаторам параметров.

Алгоритмы могут использовать при работе значения служебных параметров, которые относятся не к отдельному режиму, а ко всему

испытанию. Например, некоторые алгоритмы допускового контроля устанавливают значение по ТУ в зависимости от источника запуска.

Описание отображения графиков на экране имеет следующую структуру:

- описание координатной оси времени:
  - диапазон значений времени;
  - видимость координатной сетки;
- список описаний графиков параметров:
  - идентификатор параметра (временного ряда), значения которого отображаются на графике;
  - видимость графика;
  - цвет линии;
  - стиль линии (сплошная, штриховая, пунктирная и т.д.);
  - толщина линии;
  - отображение графика в виде ступенек (для дискретного сигнала);
  - идентификатор вертикальной координатной оси, с которой связан график.
- список описаний вертикальных координатных осей (шкал):
  - идентификатор шкалы;
  - диапазон значений (в физических единицах параметра);
  - позиция шкалы на экране;
  - цвет шкалы;
  - толщина линии шкалы;
  - видимость шкалы;

- видимость координатной сетки;
- ориентация шкалы (правая, левая).

Свойства вертикальной координатной оси определяют положение и масштаб графика на экране. Несколько графиков могут использовать одну и ту же координатную ось. В этом случае графики этих параметров будут одновременно изменять масштаб и перемещаться по вертикали. Связь графика с координатной остью выполняется по её идентификатору.

Описание формы протокола задаёт перечень параметров, значения которых необходимо выводить в протокол обработки неустановившегося режима. Здесь же указывается необходимость выводить в протокол для данного неустановившегося режима вид запуска, источник запуска, состояние герметичности изделия перед запуском и др.

Список общих алгоритмов обработки содержит список алгоритмов обработки и допускового контроля, которые могут использоваться (вызываться) для обработки параметров любого неустановившегося режима. Каждый элемент этого списка соответствует одному алгоритму. Описание общего алгоритма обработки совпадает с приведённом ранее описанием алгоритма неустановившегося режима.

Если при обработке параметров неустановившегося режима вызывается общий алгоритм обработки, то вызываемый алгоритм при работе будет использовать параметры того неустановившегося режима, из которого он был вызван.

Если обработка некоторых параметров выполняется одинаково для нескольких неустановившихся режимов, то размещение алгоритмов обработки этих параметров в списке общих алгоритмов позволяет уменьшить размер файла технологии (и архивных файлов) и упрощает его модификацию.

В текущей версии программы имеются следующие алгоритмы обработки и допускового контроля параметров неустановившихся режимов:

- алгоритмы обработки параметров:

  - определение значения параметра в заданный момент времени;
  - определение среднего значения параметра по методу весового осреднения отсчётов;
  - определение момента времени включения (выключения) дискретного сигнала;
  - определение состояния дискретного сигнала на режиме;
  - определение времени достижения параметром заданного порогового значения;
  - определение максимальных (минимальных) значений параметра и времени его достижения;
  - смещение значения характерного момента времени (оценки характеристики) на постоянную величину;
  - умножение значения характерного момента времени (оценки характеристики) на постоянную величину;
  - определение разности значений двух характерных моментов времени (оценок характеристик);

- копирование значения характерного момента времени (оценки характеристики);
- установка фиксированного значения (константы) для характерного момента времени (оценки характеристики);
- вычисление приведенного значения частоты вращения ротора;
- определение колебания/вождения частоты вращения ротора на режиме;
- определение моментов времени начала и окончания изменения значения параметра;
- интерполяция значений параметра и его первой производной кубическим сплайном;
- сглаживание значений параметра и его первой производной кубическим сплайном;
- сглаживание значений параметра методом скользящего среднего.

- алгоритмы допускового контроля:
  - контроль для фиксированного допустимого диапазона;
  - контроль для допустимого диапазона с вычисляемыми границами;
  - контроль для диапазона значений, зависящего от источника запуска;
  - контроль для диапазона значений, определяемого состоянием дискретного сигнала;

- прочие алгоритмы:

  - вызов одного или нескольких общих алгоритмов обработки и/или допускового контроля.

Алгоритм интерполяции используется для получения значений параметра (временного ряда) на равномерной сетке с заданным временным шагом. Такие данные используются, например, как входные для цифрового фильтра в алгоритме определения колебания/вождения частоты вращения ротора.

Алгоритмы сглаживания используются для устранения колебаний (шума) результатов измерений. По сравнению с методом скользящего среднего алгоритм сглаживания кубическим сплайном обеспечивает лучшее сглаживание (более плавную кривую), но требует выполнение предварительной настройки (подбор значения весового коэффициента).

Заключение

Внедрение устройства УКП-2008 контроля параметров при стендовых испытаниях ГТД совместно с разработанным ПО снижает трудоёмкость испытаний изделий, позволяет получать результаты обработки неустановившихся режимов в темпе проведения испытания, устраняет необходимость дешифровки осциллограмм и связанные с этим ошибки в определении значений параметров.

Использование файла технологии позволяет технологу настраивать программу для различных видов испытания изделий без необходимости внесения изменений в программу, что уменьшает

время подготовки стенда к испытаниям и снижает требования к квалификации персонала.

За время опытной эксплуатации устройства УКП-2008 на стенде ОАО “НПП “Мотор” с октября 2011 года с его помощью проведены многочисленные испытания различных типов ГТД (95, 195, 25 и др.) на установившихся и неустановившихся режимах работы. Результаты испытаний в полной мере подтверждают соответствие характеристик устройства УКП-2008 требованиям технического задания и показали его высокую надёжность, точность и гибкость (адаптивность) при испытаниях различных типов изделий, что подтверждено актами испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсентьев В. С., Заянчковский Ю. И., Еникеев М. Н., Сабирьянов Ф. Р. Устройство контроля параметров ГТД модели “УКП–2008” // Наука–производству. Вып. 6 / ОАО НИИТ. Уфа, 2011.

УДК 621.454

А. В. Петухов (ОАО “УМПО”)

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В комплексе разнообразных задач, которые приходится решать при создании, производстве и эксплуатации авиационных двигателей, большое место принадлежит экспериментальным работам – испытаниям двигателя и его элементов.

Стендовые испытания двигателей предназначены как для проведения контроля работоспособности готовых изделий, так и для их настройки и регулировки с целью получения заданных параметров. Для сбора параметров газотурбинных двигателей при их испытаниях постоянно применялись и совершенствовались различные автоматизированные системы, позволяющие снизить нагрузку на испытателей и упростить процесс испытаний. Автоматизация испытаний двигателей подразумевает подготовку, управление, контроль, обработку, анализ и оформление результатов испытаний, выполняемые автоматическими устройствами, приборами и ЭВМ. Передача автоматам (интеллектуальным устройствам, самостоятельно действующим по оптимальной программе) функций, ранее выполнявшихся человеком – основа развития и современная тенденция двигателестроения.

Завершающим и одним из важнейших звеньев в производстве газотурбинных двигателей (ГТД) является процесс проведения испытания. На стадии испытания проверяется соответствие показателей работы двигателя нормам технических условий, производится настройка агрегатов и систем, рассчитываются характеристики и т.д. При этом испытания ГТД проводятся с применением передовых информационных технологий, поскольку информационные пространства предприятий, участвующих в разработке, производстве и эксплуатации ГТД, в настоящее время достаточно полно структурированы и компьютеризированы (автоматизированы). Основной проблемой современных систем измерения параметров ГТД, решаемой учеными и специалистами крупнейших двигателестроительных корпораций, является создание системы искуственного интеллекта, которая сможет полностью контролировать процесс проведения испытаний ГТД, осуществлять настройки, регулировки и т.д.

В настоящее время необходимо все более точно диагностировать состояние конкретного ГТД с использованием возрастающего числа учитываемых факторов. Этого можно добиться путем совершенствования испытательной аппаратуры, связанным с внедрением принципа комплексной автоматизации испытаний ГТД, которая должна охватывать все основные типы испытательных работ и реализовать требуемые алгоритмы испытаний, что позволяет увеличить эффективность и информативность испытаний. В этом случае для преобразования большого объема информации по анализу работы двигателя и по принятию адекватных решений используются

информационные системы, оперирующие с определенным образом организованными динамическими моделями. Такой набор согласованных динамических моделей аккумулирует информацию о свойствах двигателя и отдельных его агрегатов, а также о способах, методах и эвристических алгоритмах действий в проблемных ситуациях (например, при появлении аномальных ситуаций во время работы двигателя).

В связи с этим возникает задача оптимального сочетания используемой априорной информации, содержащейся в математических моделях конкретного типа двигателя на характерных режимах работы, и текущей информации, получаемой интеллектуальной измерительной системой от первичных преобразователей непосредственно при проведении испытаний.

Методической основой для разработки оптимального состава математических моделей служит метод типовых фаз. Согласно этому методу, процесс испытания ГТД рассматривается как совокупность взаимосвязанных действий, направленных на решение поставленной задачи в условиях сложившейся обстановки. Причем чередование взаимосвязанных действий представляется последовательностью характерных фаз испытания – условно выделяемых частей, направленных на решение промежуточных задач операции, выполняемой при испытании. Каждая фаза включает в себя универсальную часть – типовую фазу, которая может использоваться без изменения для некоторого диапазона условий эксплуатации ГТД, и варьируемую часть, учитывающую специфику сложившейся ситуации. Для типовых фаз формируется соответствующая

совокупность типовых условий и ограничений, которые зависят от вида и назначения летательного аппарата, на котором эксплуатируется данный тип двигателей. В связи с этим, на каждой фазе испытаний ГТД устанавливаются определенные настройки и регулировки [1], [2].

Взаимная увязка типовых режимов работы ГТД на испытаниях осуществляется на основе рационального перераспределения располагаемых расходуемых ресурсов. Большинство компонентов систем испытательного стенда обладают определенной мерой располагаемых ресурсов, которые расходуются на реализацию различных типов испытаний ГТД. В качестве наиболее важных расходуемых ресурсов при формировании гибких режимов испытаний ГТД можно указать запас топлива, время выполнения операции. Очевидно, что все типовые испытания взаимосвязаны через отмеченные характеристики. Ресурсы, сэкономленные на какой-либо фазе испытаний, могут расходоваться для повышения эффективности операции в целом. Анализ возможностей перераспределения ресурсов играет важную роль как средство компенсации неопределенных условий испытаний, в результате чего двигатель приобретает возможность приспосабливаться к динамически изменяющимся условиям его работы. Чтобы расширить подобные возможности, необходимо на всех режимах работы ГТД расходовать ресурсы оптимальным образом. Отсюда вытекает основное требование к построению адаптивных режимов работы – требование оптимальности по расходуемым ресурсам.

В настоящее время используется большое количество разнообразных подходов к оптимизации процесса испытания двигателей применительно к конкретным видам ограничений, определяемых их уравнениями, налагаемых на возможные значения некоторых физических параметров [3], [4].

Одним из подходов для оптимизации испытаний является создание интеллектуальной системы управления двигателем (ИСУД), которая полностью управляет процессом проведения испытаний ГТД. При этом обеспечивается: минимизация газовой наработки двигателя (без ухудшения качества испытаний), как следствие, снижение расхода топлива, уменьшение влияния вредных факторов на здоровье испытателей, снижение выброса отходов горения топлива в атмосферу, повышение объективности результатов испытаний.

Задачи, стоящие перед ИСУД:

- управление запуском двигателя и его выключением;
- управление работой двигателя на всех режимах его работы;
- управление устойчивой работой компрессора и камеры сгорания двигателя на установившихся и переходных режимах;
- информирование о превышении предельно допустимых параметров двигателя и автоматический «вывод» двигателя из аномального режима работы;
- управление запуском форсажной камеры;
- обеспечение информационного обмена с пультом оператора;
- оперативный контроль и диагностирование состояния двигателя;

- подготовка и выдача в систему регистрации информации о состоянии двигателя.

При запуске двигателя ИСУД выполняет следующие функции:

- управляет подачей топлива в камеру сгорания, установкой угла поворота направляющих аппаратов, перепуском воздуха, регулировкой площади критического сечения сопла и работой пускового устройства и агрегатов зажигания;

- информирует оператора о помпаже, срыве в компрессорах, перегреве турбины и превышении предельной частоты вращения. При этом ИСУД автоматически перестраивает работу двигателя так, чтобы как можно быстрее прекратить аномальные процессы, происходящие в двигателе, либо совсем останавливает двигатель (при угрозе его разрушения).

Управление работой двигателя производится постоянно на всех режимах, при этом все измеряемые параметры выводятся на устройства индикации либо на пульт оператора. Необходимые параметры двигателя контролируются с учетом параметров воздуха на входе в двигатель и параметров окружающей среды.

Для устойчивой работы компрессора и камеры сгорания осуществляется управление подачей топлива в камеру сгорания на переходных режимах, управление работой клапанов перепуска воздуха из компрессора и (или) за компрессором, управление поворотом лопаток входного направляющего аппарата и направляющего аппарата компрессора и площади критического сечения регулируемого сопла. Такое управление необходимо для

протекания линии рабочих режимов с достаточным запасом от границы газодинамической устойчивости компрессора.

Длительная работа на режимах с предельно допустимыми параметрами (максимально возможные параметры двигателя, ограниченные по условиям выполнения дроссельных и высокоскоростных характеристик) не должна приводить к разрушению двигателя. Для предотвращения разрушения двигателя ИСУД также контролирует следующие параметры:

- предельно допустимую частоту вращения роторов двигателя;
- предельно допустимое давление воздуха за компрессором;
- максимальную температуру газа за турбиной;
- максимальную температуру материала рабочих лопаток;
- минимальный и максимальный расход топлива;
- предельно допустимую частоту вращения турбины пускового устройства.

В конструкции ИСУД обычно предусмотрены резервные средства контроля параметров двигателя от разрушений при достижении предельных параметров в случае выхода из строя основных каналов управления ИСУД.

Реализация в рамках ИСУД предложенной концепции оптимизации расходуемых ресурсов позволяет сократить сроки испытаний и минимизировать расход топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1.Ефанов В. Н. Концепция системного проектирования интегрированных комплексов бортового оборудования: алгоритмы и информационные технологии / Материалы докладов Международной конференции “Взгляд на авиацию будущего”. – Берлин, 1998.

2.Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Проектирование экспертных систем на основе системного моделирования / Г. Г. Куликов, А. Н. Набатов, А. В. Речкалов и др. – Уфа, УГАТУ, 1999.

3.Марко Д., МакГоен К. Методология структурного анализа и проектирования. – М.: МетаТехнология, 1992.

4.Методология IDEF0. Функциональное моделирование. – М.: МетаТехнология, 1993.

УДК 536+678.502.03

С. А. Перевоин *(ФГУП «НПЦ «Салют»)*

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕМОНТА РАБОЧИХ ОХЛАЖДАЕМЫХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В процессе эксплуатации в составе газотурбинного двигателя (ГТД) во внутренних полостях охлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД) образуются различного рода отложения.

Специфика эксплуатационных отложений носит комплексный характер, включающий как органические (углеродистые) отложения, так и минеральные отложения (окислы кремния и различных металлов).

При попытке удаления окислов происходит их экранирование органическими (углеродистыми) отложениями. И степень экранирования окислов в разных местах разная. В результате

происходит неравномерное стравливание минеральных отложений (окислов).

Попытка добиться полного стравливания окислов приводит к растравливанию металла стенок самой турбинной лопатки, т.е. к неисправимому браку. Это резко снижает качество ремонта турбинных лопаток, а также приводит к потере части ремонтируемых лопаток.

Выход из создавшейся ситуации – применение предварительного удаления органических (углеродистых) отложений.

Применение щёлочи для удаления органических отложений действительно приводит к положительному результату. Такой технологический процесс в настоящее время внедрён на производстве в ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют».

При дальнейшей форсировке ГТД и увеличении его ресурса начинают, в большей степени, проявляться недостатки, присущие серийной технологии очистки. Связано это с появлением более прочных отложений во внутренних охлаждающих полостях турбинных лопаток. Кроме того, щёлочь негативно воздействует на паяные соединения.

Негативное влияние щёлочи на припой впервые было обнаружено при выполнении работ по очистке от нагара внутренних полостей топливного коллектора основной камеры сгорания (ОКС) ГТД АЛ-31Ф. Причина этого – негативное воздействие на защитные покрытия и припой соединений щелочных металлов. Ситуация усугубляется ещё и тем, что щёлочь является сильным поверхностно-активным веществом (ПАВ), и её очень трудно удалить из микропор

и капиллярных микротрещин, имеющихся как в поверхностном слое работавшей турбинной лопатки, так и в паяных швах.

Контроль качества отмывки от щёлочи также сильно затруднён из-за того, что очищаемая поверхность представляет собой сложную систему капиллярных каналов, спрятанных внутри рабочей турбинной лопатки. Поэтому визуальный контроль невозможен.

При разработке технологии очистки от эксплуатационных отложений внутренних полостей охлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления необходимо учитывать тот факт, что эти отложения высокотемпературные, что создаёт дополнительные трудности при удалении органических (углеродистых) отложений.

Связано это с тем, что существует объективная закономерность удаления органических (углеродистых) отложений от температуры их образования. Она заключается в том, что чем выше температура образования органических (углеродистых) отложений, тем труднее они удаляются [1].

Для повышения качества очистки внутренних охлаждающих полостей рабочих турбинных лопаток в настоящее время в филиале «НИИД» ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» прорабатывается другой способ очистки – за счёт использования новой технологии, основанной на использовании сверхкритического состояния вещества.

Эта технология очистки базируется на высокой растворяющей способности вещества, находящегося в сверхкритическом состоянии. Способность вещества, находящегося в сверхкритическом состоянии, растворять малолетучие твёрдые материалы была установлена более

века назад (в 1879 г.) [2], но интерес к её промышленному использованию появился лишь в 70-е годы прошлого столетия [3].

Растворители в сверхкритическом состоянии значительно менее вязки, нежели их аналоги в жидком состоянии, и это является их бесспорным преимуществом при использовании в плане улучшения массообменных характеристик процесса. Кроме того, у растворителей в сверхкритическом состоянии резко возрастает изотермическая сжимаемость. Растворители в сверхкритическом состоянии можно представить как сжимаемые жидкости с аномально низкой вязкостью, приближающейся к вязкости газов. Таким образом, можно заметить, что жидкости, находящиеся в сверхкритическом состоянии, по своим свойствам резко отличаются от жидкостей, находящихся в обычном состоянии. Поэтому жидкости, находящиеся в сверхкритическом состоянии, принято называть сверхкритическими флюидами. При этом надо указать, что анализ этого фактора был бы не полным, если бы вязкостные показатели сверхкритических флюидов не были сравнены с таковыми для газов, так как именно газоподобные свойства вещества в сверхкритическом состоянии (нулевое поверхностное натяжение и отсутствие капиллярного эффекта) явились основой его использования в разрабатываемых в последние годы процессах пропитки и очистки твердых матриц.

Динамическая вязкость сверхкритических флюидов менее чем на порядок превосходит аналогичный показатель обычных газов, и это имеет место в ситуации, когда плотность сверхкритических флюидов как минимум на два порядка превышает плотность последних. Следовательно, сверхкритические флюиды обладают

самыми низкими значениями кинематической вязкости. Напомним, что именно квадрат кинематической вязкости находится в обратно пропорциональной зависимости к количественной характеристике, определяющей интенсивность свободного движения.

В целом коэффициент диффузии в сверхкритических флюидах при условии бесконечного разбавления по величине на 1...2 порядка превосходит аналогичный показатель для жидкостей [4].

Сверхкритическое состояние вещества получают в специальных установках. Новая технология позволит исключить использование соединений щелочных металлов из технологического процесса удаления органических (углеродистых) отложений из внутренних охлаждающих полостей рабочих турбинных лопаток.

В настоящее время в филиале «НИИД» ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» разрабатывается лабораторная установка для очистки ремонтных турбинных лопаток, принцип действия которой основан на использовании сверхкритического состояния вещества.

Новая технология очистки может быть распространена и на другие детали и узлы ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яновский Л. С., Иванов В. Ф., Галимов Ф. М., Сапгир Г. Б. Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях. Казань, «ООО АБАК-УСЛУГИ», 1999. 256 с.
2. Hannay J. B., Hogarth J. // Proc. R. Soc. London. 1879. V. 29. P. 324.

3. Гумеров Ф. М., Сабирзянов А. Н., Гумерова Г. И. Суб - и сверхкритические флюиды в процессах переработки полимеров. Казань: изд. «ФЭН», 2007. 6 с.
4. Garrabos Y., Le Neindre B., Subra P., Cansell F., Pommier C. // Ann. Chim. Fr. 1992. V. 17. № 1. P. 55.

УДК 621.793

С. Р. Шехтман (УГАТУ)

ТЕХНОЛОГИЯ ОСАЖДЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ Ti-TiN НА ДЕТАЛИ ВЕРТОЛЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Введение

В настоящее время задача повышения надежности и ресурса деталей авиационной техники решается путем разработки новых марок высоколегированных сталей и титановых сплавов, а также за счет защитных покрытий [1, 2, 3]. При этом покрытие должно наряду с высокими требованиями по коррозионной и эрозионной стойкости иметь высокие показатели по прочности, пластичности, адгезионной прочности с основой.

В подавляющем большинстве случаев разрушение деталей начинается с поверхности, поэтому чрезвычайно важно и экономически более целесообразно разработать технологии получения защитных и упрочняющих наноструктурированных покрытий, свойства которых по прочности и пластичности недостижимы для

традиционных моно- и поликристаллических структур. При этом возможна реализация одного из принципов нанотехнологии: создание объекта осуществляется не «сверху-вниз» (например, когда при формообразовании снимается припуск с заготовки), а «снизу-вверх», когда поверхность «достраивается» до необходимых размеров детали, причем последняя приобретает новое качественное состояние (по точности, прочности, пластичности, износостойкости, коррозионной стойкости и др.) [1, 2].

Данным комплексом свойств обладает многослойное наноструктурированное вакуумное ионно-плазменное покрытие на основе Ti-TiN, полученное в условиях плазменного ассистирования.

1. Методика исследования

Была разработана технология осаждения многослойного покрытия системы Ti-TiN, реализованная на модернизированной установке ННВ 6,6-И1, предназначенной для нанесения покрытий на детали диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм.

Сущность предлагаемой технологии осаждения многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий композиции Ti-TiN состоит в том, что в едином операционном цикле предусматривается совмещение дугового разряда, горящего в парах титанового катода с несамостоятельным сильноточным разрядом, создаваемым плазменным источником с накальным катодом «ПИНК».

Разработанная технология, позволяющая создавать многослойные ионно-плазменные покрытия композиции Ti-TiN в

условиях плазменного ассистирования, основана на следующих физических и химических процессах:

- бомбардировка поверхности обрабатываемой детали несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом производилась с помощью плазменного источника «ПИНК» в среде инертного газа аргона, в результате чего происходит предварительная очистка поверхности;

- дополнительная интенсивная ионная бомбардировка поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом в среде азота [1];

- осаждение ионов Ti на поверхность обрабатываемой детали с формированием сдоя покрытия и взаимодействие с реакционным газом.

Технология предусматривает проведение в одном технологическом цикле предварительную ионную очистку поверхности плазмой несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, нагрев деталей ионами металла, нанесение многослойных покрытий. Совмещение основных технологических операций, сравнительная простота их реализации в одном вакуумном цикле определяют высокую эффективность ионно-плазменной технологии.

Травление поверхности образцов с целью ее очистки проводится бомбардировкой низкоэнергетическими ионами аргона при давлении 10^{-1}Па, при отрицательном смещении (1100В) на подложке. Такой режим аргонного травления позволяет избежать внедрения ионов металлической плазмы на стадии предварительной очистки,

исключить привязывание микродуг к поверхности, снизить температуру предварительного нагрева.

Бомбардировка поверхности ионами инертного газа аргона проводится для подготовки поверхности обрабатываемой детали перед нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий и заключается в термической активации поверхности и образовании центров зародышеобразования, что, в свою очередь, обеспечивает высокую адгезионную прочность покрытий.

Напыление многослойных покрытий происходит в процессе последовательного осаждения Ti и TiN из плазмы, генерируемой электродуговым источником. Осаждение покрытий осуществляется при одновременном воздействии плазменного источника «ПИНК». В процессе осаждения покрытий может быть осуществлено равномерное планетарное вращение обрабатываемой детали относительно собственной оси и одновременно вокруг оси стола, благодаря чему обеспечивается равномерность распределения толщины формируемых покрытий (рис. 1).

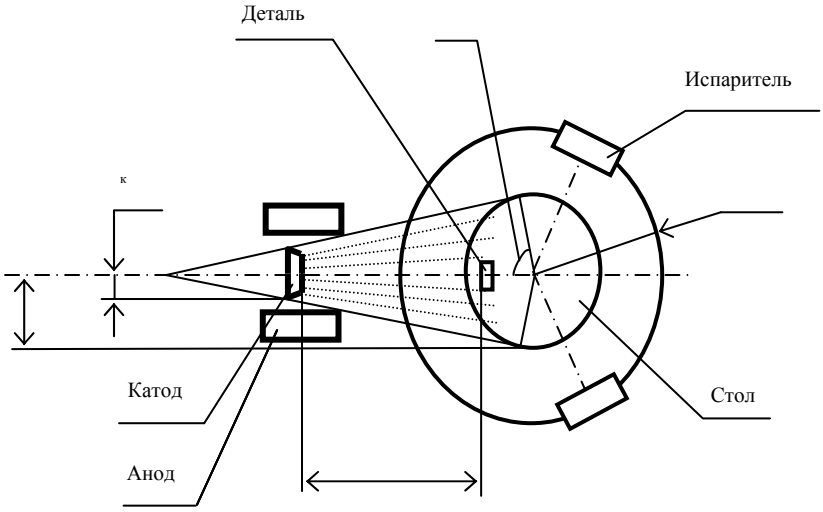


Рис. 1. Схема расположения обрабатываемой детали относительно плазменного потока

Процесс осаждения слоев на подложку осуществляется при температуре 400–450°С. Нагрев обусловлен энергией, приносимой осаждаемыми частицами.

2. Обсуждение результатов

Разработанная технология позволяет получать многослойные покрытия с толщинами слоев до 100 нм и многослойные покрытия с микрометровыми слоями, содержащими в поверхностном слое нитриды титана. Количество слоев и их толщина задаются режимами напыления.

При назначении режимов ионно-плазменного осаждения необходимо учитывать требования, предъявляемые к детали в следующей последовательности:

- параметры, обеспечивающие заданные физико-химические свойства покрытий;

- расположение детали и размеры обрабатываемой зоны, обеспечивающие заданную точность;

- при выполнении первых двух условий выбирают режимы с максимальной производительностью;

- коррекция режимов осаждения ионно-плазменных покрытий происходит после проведения пробного запуска установки (для конкретной установки).

Сложность назначения и расчета режимов обработки обусловлена тем, что совместное действие управляющих факторов приводит к большому разбросу параметров покрытий. Точные

расчеты возможны только на основе применения ЭВМ. Существующие модели ионного осаждения покрытий не позволяют связать технологические параметры (ток дуги $J_д$, давление реакционного газа P, потенциал смещения $U_п$, радиус катода, положение детали относительно катода) осаждения покрытий со скоростью роста на локальной поверхности, расположенной в произвольной точке объема вакуумной камеры.

Кроме того, изменением положения детали относительно плазменного потока возможно добиться изменения толщины слоев покрытия. Так, например, при расположении образцов или обрабатываемых деталей параллельно плазменному потоку толщина слоев в 2 раза меньше, чем при расположении перпендикулярно потоку; толщина меняется при удалении обрабатываемых деталей от оси плазменного потока (b), так и увеличений расстояния от торца катода (h) (см. рис. 1).

Ионная очистка и активация на поверхности центров адсорбции и адгезии несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом производилась с помощью плазменного источника «ПИНК» в среде инертного газа аргона при давлении 10^{-1} Па. Напряжение на подложке 1100 В при токе разряда 35А, длительность обработки – 1...2 минуты до прекращения возникновения микродуг. Такой режим аргонного травления позволил избежать внедрения ионов металлической плазмы на стадии предварительной очистки, исключить привязывание микродуг к поверхности, снизить температуру предварительного нагрева.

Следующей стадией технологического процесса является осаждение покрытия системы Ti-TiN. Осаждение покрытий осуществлялось при одновременном воздействии плазменного источника «ПИНК», то есть реализуется режим плазменного ассистирования.

В качестве катода использовался технически чистый титан марки ВТ-1.0. В процессе осаждения покрытий приспособление с закрепленными на нем обрабатываемыми деталями планетарно вращается вокруг оси стола, одновременно осуществляя вращение вокруг своей оси, благодаря чему обеспечивается равномерность распределения толщины формируемых покрытий.

Схема технологического процесса получения многослойного покрытия системы Ti-TiN толщиной 5–7 мкм, состоящего из нанометровых слоев 30–101 нм, представлена на рис. 2.

Экспериментально установлено, что оптимальными параметрами процесса напыления многослойного покрытия системы Ti-TiN являются значения J_{∂} = 50А, $U_{п}$= 120В, при давлении 10^{-1} Па.

Чтобы получить многослойные наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия, обладающие повышенными эксплуатационными свойствами, необходимо использовать следующие основные правила:

1. Многослойные композиции должны состоять из множества сверхтонких (50 – 100 нанометров) слоев.

2. При синтезе необходимо стремиться поддерживать температуру конденсации близкой к минимальной.

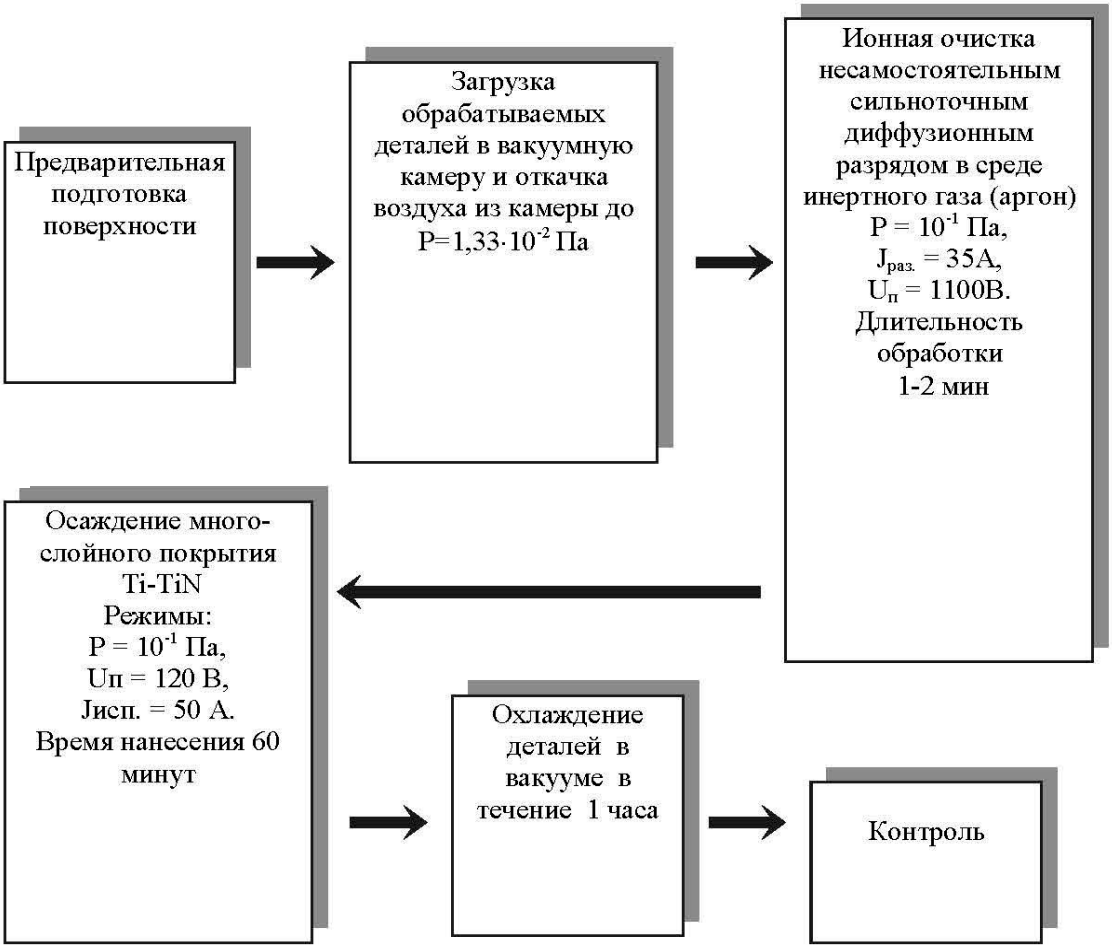


Рис. 2. Схема технологического процесса получения многослойного покрытия системы Ti-TiN

Получаемые многослойные покрытия с субмикро-кристаллической (СМК) структурой, которые состоят из периодически расположенных слоев из различных материалов нанометровой толщины, например, чередующихся Ti и TiN, с характерным размером толщиной слоев менее 100 нм и количеством слоев до нескольких десятков, обладают высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Благодаря особенностям строения, ультрамалой толщине слоев и их большому количеству, а также возможности плотного сопряжения слоев различных материалов,

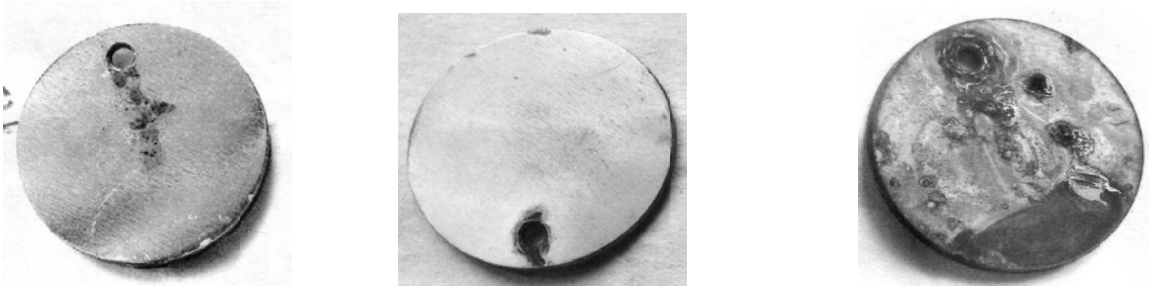
покрытия с СМК структурой сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанообъектов.

Многослойные покрытия композиции Ti-TiN обладают повышенными эксплуатационными свойствами благодаря чередующимся тонким слоям переменной твердости и различного фазового состава, эффективно тормозящими развитие трещин и обладают меньшими остаточными напряжениями.

Исследования адгезионной прочности нанесенных покрытий системы Ti-TiN для различных материалов показали, что покрытия обладают высокой адгезией к основному материалу, что было получено путем изгиба образцов по методике ВИАМ. Исследование отпечатка алмазной пирамидки при увеличении с помощью оптического микроскопа показало отсутствие растрескивания материала покрытия вблизи зоны воздействия, что косвенно свидетельствует о высокой адгезии покрытия.

Определение коррозионной стойкости материалов по приведенной методике является простым и наиболее надежным способом, так как непосредственно указывает на количество металла, разрушенного коррозией. Определение потери массы металла дает средние показатели коррозии.

Визуальный осмотр поверхности (рис. 3) после коррозионных испытаний показал, что на поверхности образца с трехслойным покрытием наблюдается наличие точечной коррозии, тогда как образцы с покрытием с СМК структурой не имеют точечной коррозии. На поверхности образца с покрытием с СМК структурой наблюдается изменение цвета покрытия, цвета побежалости.



а *б* *с*

Рис. 3. Образцы с покрытиями после испытания на коррозионную стойкость. Подложка 13Х11Н2ВМФ: *а* – трехслойное покрытие Ti-TiN; *б* – покрытие с СМК структурой; *с* – исходное состояние

Результаты исследования коррозионной стойкости образцов с покрытиями показали, что площадь поражения коррозией у образцов с трехслойным покрытием больше, чем у образцов с покрытием с СМК структурой.

В работе было проведено исследование коррозионной стойкости образцов с покрытиями весовым методом. Скорость коррозии определялась по изменению массы образца в результате действия коррозионной среды. Результаты исследования скорости коррозии приведены в табл. 1.

По результатам, приведённым в таблице (средние значения по трем образцам), можно сделать вывод, что наибольшую защиту от коррозии обеспечивает покрытие с СМК структурой, нанесенное методом плазменного ассистирования.

Таблица 1

Скорость коррозии образцов с покрытиями

№	Тип покрытия	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Площадь образцов, $м^2$	Скорость коррозии, $г/м^2 \cdot ч$
1	Исходный	4,5957	4,5876	0,001752	0,021503664
2	3-слойное покрытие	4,7816	4,7749		0,017786981
3	Многослойное покрытие	3,9581	3,9519		0,016459594
4	Наноструктури-рованное покрытие	4,49775	4,49277		0,013220771

Анализ исследования коррозионной стойкости образцов с покрытиями показал, что скорость коррозии у покрытия с СМК структурой на 25% меньше, чем у образцов с трехслойным покрытием, на 20% чем образец с многослойным покрытием и на 38% – чем образец без покрытия.

Рис. 4. Детали вертолетной техники

Разработанная технология была реализована на опытной партии деталей ГТД типа «Стакан» (рис. 4) с обеспечением 6 квалитета точности размеров, формы и расположения поверхностей.

ВЫВОДЫ

Разработана и реализована на практике технология ионно-плазменного осаждения наноструктурированных покрытий системы Ti-TiN в условиях дополнительной ионной бомбардировки, обеспечивающая повышение качества поверхностного слоя деталей ГТД и высокую адгезионную прочность, коррозионную стойкость наноструктурированных покрытий.

Предлагаемый технологический процесс нанесения многослойного наноструктурированного покрытия позволяет:

- обеспечить точность обработки;
- снизить остаточные напряжения в покрытии;
- обеспечить равномерный нагрев детали;
- обеспечить равномерную толщину покрытия;
- повысить коррозионную стойкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будилов В. В., Мухин В. С., Шехтман С. Р. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов. Физические основы и технические решения. – М.: Наука, 2008. – 194 с.

2. Будилов В. В., Мухин В. С., Шехтман С. Р. Влияние вакуумных ионно-плазменных покрытий Ti-TiN на усталостную прочность конструкционных материалов. XVIII научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» Материалы конференции 2011. – С. 185 – 188.

3. Воронин Н. А., Семёнов А. П. Вакуумные ионно-плазменные технологии упрочнения поверхностей деталей машин // Методы и средства упрочнения поверхностей деталей концентрированными потоками энергии. – М.: Наука, 1991. – 402 с.

УДК 621.011

Д. М. Фадин, М. Г. Яковлев (ФГУП «НПЦ «Салют»)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ЧИСЛО ЦИКЛОВ ЕГО ТЕРМОСИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

Современная технология токарной обработки деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок получила интенсивное развитие с применением высокопроизводительных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), программного обеспечения и новых, отвечающих мировому уровню, инструментов, оснащенных сменными многогранными пластинами из твердых сплавов с упрочняющими покрытиями.

Ограниченная информация в каталогах зарубежных фирм и отдельных статьях по режимам резания и стойкости предлагаемого инструмента не позволяет эффективно использовать этот дорогостоящий инструмент при обработке деталей из жаропрочных материалов. Поэтому технологам в производственных условиях при внедрении нового инструмента, а также новых марок обрабатываемого жаропрочного материала, приходится экспериментально выбирать режимы резания и определять соответствующую им стойкость инструмента применительно к требованиям на определенную операцию. Результаты цеховых

(производственных) испытаний инструмента и режимы резания подходят только для выполнения операций в конкретных технологических условиях. Это связано с различными динамическими характеристиками технологических систем «станок – приспособление – инструмент – деталь» и, соответственно, разным значением вибраций, возникающих при обработке. Наиболее частым способом уменьшения вибраций при резании является снижение режимов резания для обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности и стойкости инструмента.

Влияние вибраций при резании деталей из жаропрочных сплавов на стойкость инструмента и усталостный механизм изнашивания инструмента отмечалось многими исследователями. Однако результаты этих испытаний справедливы для конкретных условий обработки, при которых проводился эксперимент.

Для установления зависимости влияния вибраций на стойкость инструмента и режимы резания при испытаниях инструмента, как на стадии технологической подготовки производства, так и в производственных условиях, в данной работе предложено оценивать изнашивание инструмента методами, основанными на теории усталостной прочности материала [1].

Методы испытаний усталостной прочности широко применяются при оценке долговечности и ресурса деталей газотурбинных двигателей [2]. В процессе усталостных испытаний образцы или детали нагружают циклически при заданном напряжении. Зная напряжение и соответствующее ему число циклов, можно прогнозировать ресурс испытуемой детали.

Процесс резания сопровождается вибрациями технологической системы, а также непрерывным изменением напряжений и температур в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки. Поскольку частота и амплитуда этих колебаний соответствуют изменению сил резания и действующих напряжений, можно посчитать число циклов нагружения инструмента до заданного критерия износа, то есть определить долговечность инструмента.

Основанная на методе усталостных испытаний [3] оценка изнашивания режущего инструмента позволяет существенно сократить количество экспериментов при выборе эффективных режимов резания на стадии технологической подготовки производства и распространить полученные результаты на различные операции токарной обработки с известными динамическими характеристиками технологических систем [4].

Введено понятие меры износа “g” в данный момент времени, характеризующей накопленную поврежденность изнашиваемой поверхности инструмента в результате воздействия напряжений: отношение износа инструмента в данный момент времени к принятому критерию его отказа. По этому определению в начальный момент резания g=0 (инструмент острозаточен), а когда инструмент достигает допустимой величины износа в соответствии с принятым критерием затупления g=1. Общий износ за время работы инструмента (рис. 1), используя метод накопления повреждений, можно найти при помощи суммирования элементарных износов,

вызванных воздействием напряжений, действующих на малом отрезке времени.

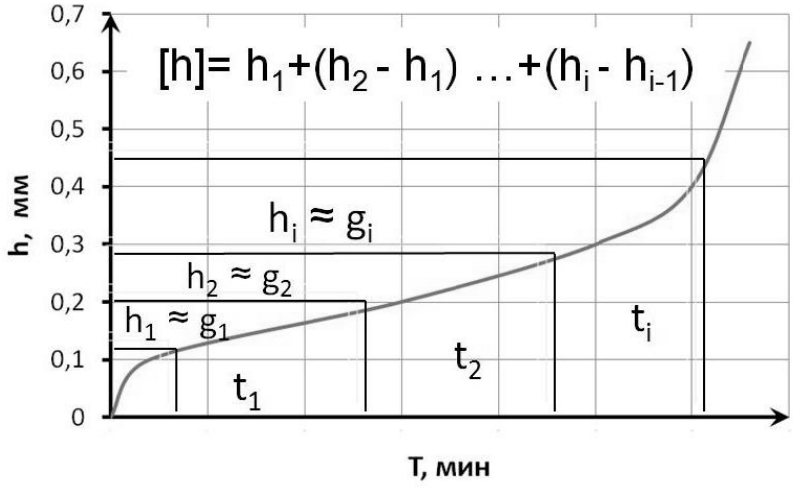


Рис. 1. Зависимость износа инструмента от времени

Зависимость износа инструмента от времени (рис. 1) можно представить в виде циклограммы нагружения (рис. 2).

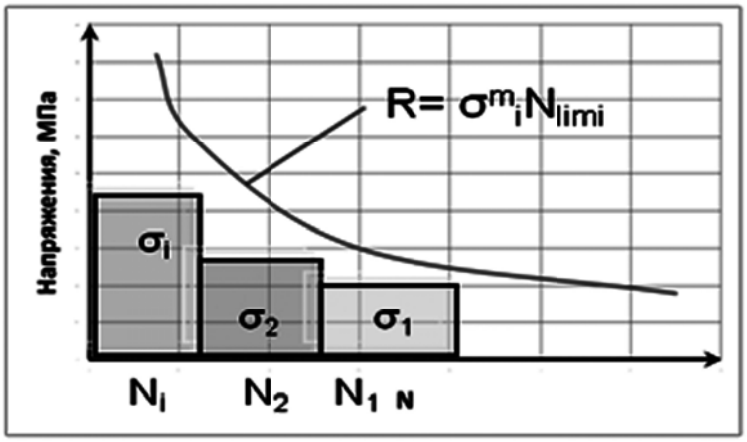


Рис. 2. Кривая усталостной долговечности и циклограмма нагружения

Кривая усталостной долговечности (рис. 2) описывается уравнением:

$$R = \sigma_i^m N_{\lim_i}, \qquad (1)$$

где $N_{\lim_i}$ – количество циклов до разрушения (рис. 3) при напряжении σ_i.

Тогда мера износа g_i равна:

$$g_i = \frac{\sigma_i^m N_i}{\sigma_i^m N_{\lim_i}} = \frac{N_i}{N_{\lim_i}}, \qquad (2)$$

где N_i – количество циклов, отработанное при постоянном напряжении σ_i.

Используя метод накопления повреждений, получим:

$$[h] \approx g = g_1 + g_2 + \ldots + g_i = \frac{N_1}{N_{\lim_1}} + \frac{N_2}{N_{\lim_2}} + \ldots + \frac{N_i}{N_{\lim_i}}. \qquad (3)$$

Процесс резания характеризуется не только изменением напряжений в зоне резания, но и температуры, влияющей на стойкость инструмента. Поэтому в работе была предложена зависимость этого влияния. На основе экспериментальных данных Кремера Г. С. (рис. 4) и Остафьева В. А. (рис. 5), после их статистической обработки, было предложено учитывать влияние температуры на долговечность инструмента через экспоненциальную функцию.

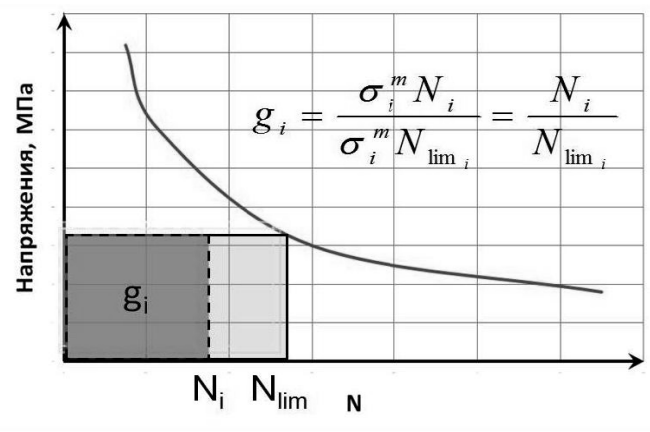


Рис. 3. Кривая усталостной долговечности и мера износа «*g*»

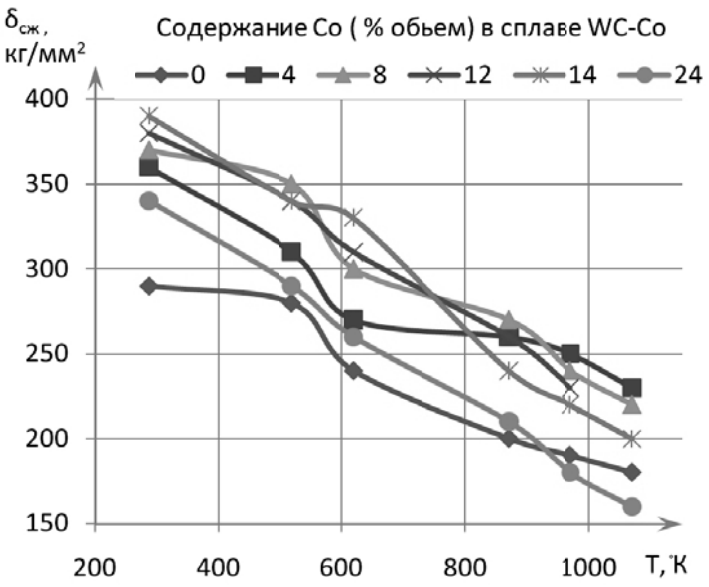


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии сплавов WC-Co, при различных температурах (Г. С. Кремер)

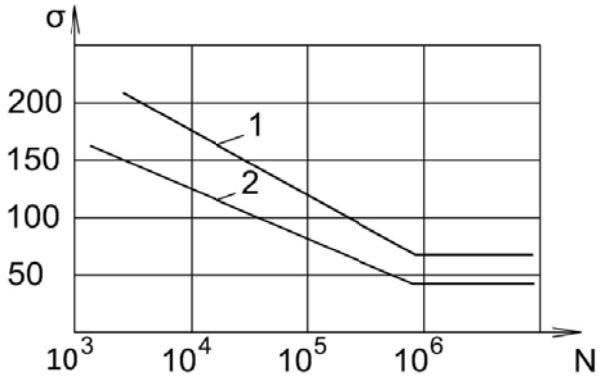


Рис. 5. Кривые усталости инструментального материала Т15К6:

1. T=600ºC; 2. T=20ºC (В. А Остафьев)

Тогда уравнение (1) запишется следующим образом:

$$N_{\lim i} = \frac{R}{\sigma_i^m + \mathrm{e}^{a\theta_i}}. \qquad (4)$$

Функция (4) описывает пространственную кривую долговечности инструмента в зависимости от напряжений и температур (рис. 6). Для идентификации коэффициентов модели усталостной долговечности a, m, R (4) в работе был предложен следующий метод.

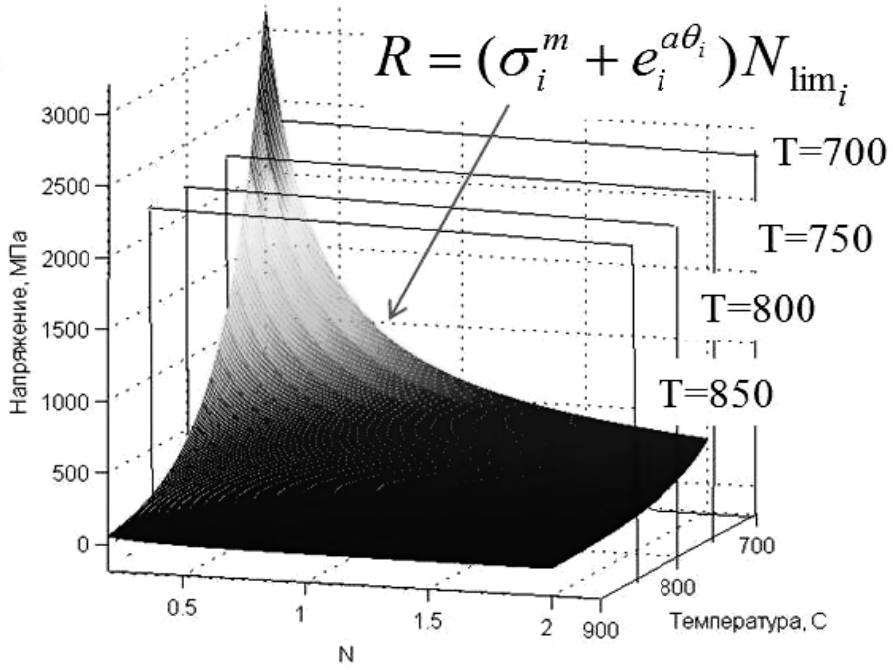


Рис. 6. График фигуры усталостной долговечности в координатах температуры, напряжений и количества циклов

Экспериментальная зависимость износа от времени (см. рис. 1) разбивается на равные временные интервалы (минимум 3 интервала). Для них рассчитываются средние значения износа, и определяются напряжения и температуры, действующие в заданный момент времени на инструмент. Полученные уравнения для каждого временного интервала записываются в систему:

$$\begin{cases} R = (\sigma_1^m + e^{a\theta_1})N_{\lim_1} \\ R = (\sigma_2^m + e^{a\theta_2})N_{\lim_2} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ R = (\sigma_i^m + e^{a\theta_i})N_{\lim_i} \end{cases} . \qquad (5)$$

Так как известны износы на временных интервалах разбиения h_1, h_2, h_i и они пропорциональны мерам износа g_1, g_2, g_i, учитывая формулу (2), определяется количество циклов до разрушения $N_{\lim}$ для

соответствующих напряжений и температур, действующих на инструмент в каждый интервал разбиения (рис. 7):

$$N_{\lim_1} = \frac{N_1}{g_1}, N_{\lim_2} = \frac{N_2}{g_2}, N_{\lim_i} = \frac{N_i}{g_i} \quad , \tag{6}$$

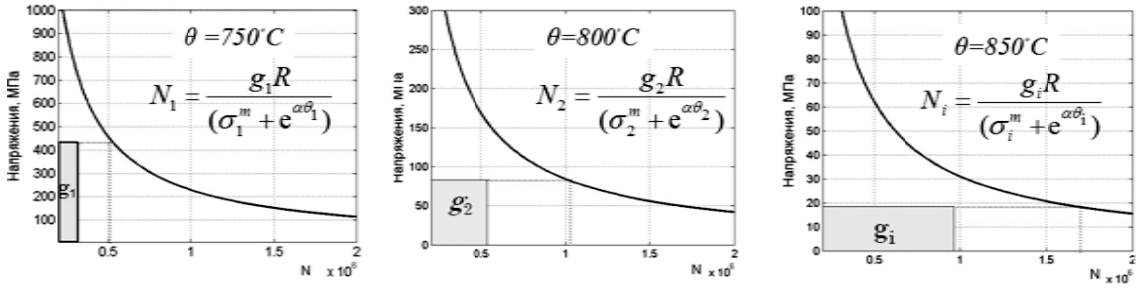


Рис. 7. Сечения пространственной фигуры ограниченной долговечности плоскостями, перпендикулярными оси температуры при разных ее значениях

Подставляя в систему уравнений (5) значения числа циклов до разрушения $N_{\lim}$, методом последовательных приближений определяем коэффициенты модели долговечности инструмента m, a и R.

В работе был предложен метод расчета стойкости инструмента с помощью модели усталостной долговечности режущего инструмента при заданных предельном износе, режиме обработке, значениях колебаний технологической системы.

Износ инструмента разбивается на равные дискретные значения (не менее трех интервалов разбиения), для которых рассчитываются напряжения и температуры (рис. 8). Чем больше число интервалов разбиения, тем точнее расчет.

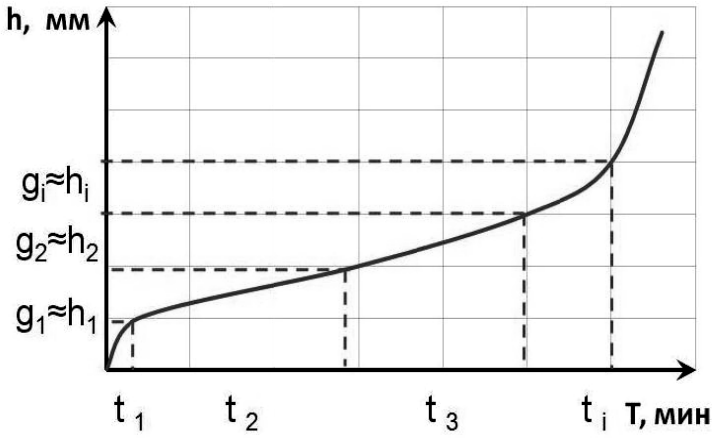


Рис. 8. Зависимость износа инструмента от времени резания

Из уравнения долговечности инструмента (4) определяем количество циклов до разрушения $N_{\lim i}$ на i-м участке разбиения:

$$N_{\lim i} = \frac{R}{\sigma_i^m + \mathrm{e}^{a\theta_i}} . \tag{7}$$

Учитывая формулу (2), запишем:

$$N_i = g_i N_{limi} . \tag{8}$$

Подставляя уравнения (7) и (4) в формулу (8), получим число циклов до накопления поврежденности, пропорциональной износу на i-м участке разбиения:

$$N_i = \frac{g_i R}{\sigma_i^m + \mathrm{e}^{a\theta_i}} . \tag{9}$$

Суммируя число циклов до накопления соответствующей поврежденности на каждом интервале разбиения и учитывая, что:

$$N = w\ t , \tag{10}$$

где w – доминирующая частота колебаний технологической системы, t – время резания, получим стойкость инструмента при заданном предельном износе инструмента:

$$T = \sum \frac{g_i R}{w(\sigma_i^m + \mathrm{e}^{a\theta_\mathrm{i}})} \quad . \qquad (11)$$

На основе разработанной модели (11) были рассчитаны стойкости инструмента при различной жесткости технологической системы и проведены экспериментальные исследования.

На основании полученных графиков для технологических систем с различной жесткостью (рис. 9) можно сделать вывод об удовлетворительном (σ<20%) совпадении данных, полученных расчетным и экспериментальным путем.

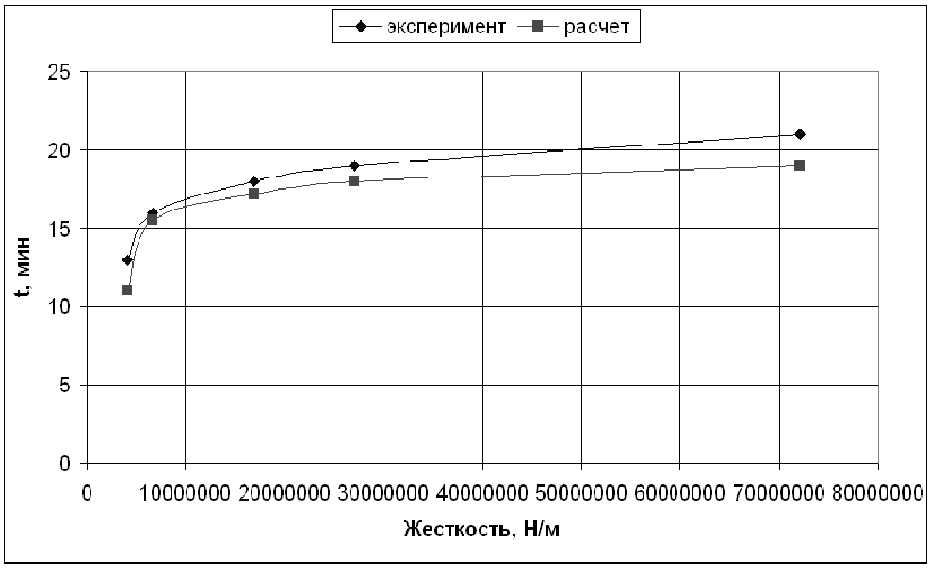


Рис. 9. Экспериментальная и расчетная зависимости стойкости от жесткости технологических систем

По разработанной модели усталостной долговечности инструмента (4) можно определять стойкость инструмента в зависимости от режимов обработки, свойств обрабатываемого

инструментального материала и жесткости технологической системы, через напряжения и температуры в зоне резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вафин Р. К. Оценка нагруженности дисков фрикционных элементов транспортных машин, «Известия вузов. Машиностроение», 1977, №4.

2. Горелов В. А. Формирование баз данных для автоматизированного выбора режимов резания на основе термомеханической модели стойкости инструмента// Технология машиностроения. – №3, 2007. – С. 22–27.

3. Иванова В. С., Тереньтев В. Ф., Природа усталости металлов. – М.: «Металлургия», 1973. – 436 с.

4. Фадин Д. М. «Прогнозирование ресурса режущего инструмента по теории циклической прочности» // «Вестник МГТУ «Станкин», 2011, №4.

УДК 621.91.011

И. Г. Каримов (ОАО НИИТ), В. В. Постнов (УГАТУ)

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ НА ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ И ТОРЦЕВОМ ТОЧЕНИИ

Ведущую роль в интенсификации и повышении эффективности производства предстоит сыграть машиностроению за счет внедрения прогрессивных технологических процессов, комплексной автоматизации производства повышения его гибкости**.** Лезвийная металлообработка продолжает оставаться одним из основных процессов формообразования точных поверхностей ответственных деталей, поэтому совершенствование технологических операций лезвийной

обработки является важным резервом повышения эффективности производства.

Анализ показателей обрабатываемости позволяет сделать вывод о том, что все они взаимосвязаны и определяются главным образом интенсивностью изнашивания режущих инструментов. Температура в зоне резания является одним из основных параметров процесса резания, влияющим, как на показатели обрабатываемости, так и на режущую способность инструмента.

Относительное перемещение сопряженных тел при их скольжении вызывает миграцию зон фактического контакта на поверхности каждого из них, в результате чего напряженное и деформированное состояние микрообъемов, примыкающих к пятнам фактического контакта многократно изменяется. Развитие этих дефектов в микротрещины и смыкание последних приводит к образованию частиц износа. Наличие высоких контактных температур, характерных для процесса резания, активизирует процесс накопления и развития дефектов в инструментальном материале [1].

Использование данных о контактных процессах при резании для анализа обрабатываемости затруднено по целому ряду причин. Среди них первостепенное значение имеют сведения о величине и характере распределения контактных напряжений на режущих поверхностях инструментов, коэффициента трения и температур, дискретности касания контактирующих поверхностей, влияния внешней среды. Однако в литературе по данным вопросам приводятся весьма противоречивые данные, что связано, по-видимому, с недостаточной изученностью этих важнейших явлений и параметров,

характеризующих условия высокотемпературного контактного взаимодействия в зоне резания.

Исследование обрабатываемости при точении торцевых поверхностей является важным вопросом, так как эта операция как окончательная, определяет производительность обработки и качество обработанной поверхности многих крупногабаритных деталей ГТД.

Проведены исследования некоторых параметров обрабатываемости при торцевом и продольном точении сплава ХН73МБТЮ (ЭИ 698ВД) цельным твердосплавным резцом ВК60М ($\gamma = \gamma_1 = 0^0$, $\varphi = \varphi_1 = 45^0$, $\alpha = \alpha_1 = 10^0$).

Исследование было проведено на токарном станке 16К20, снабжённом системой бесступенчатого регулирования оборотов шпинделя.

Для выбранного сечения среза постоянными в периоде стойкости были скорости при продольном точении и числа оборотов шпинделя при торцевом точении.

В качестве критерия затупления принята величина износа h_3= 0,5 мм, при превышении которой заметно ухудшаются условия удаления стружки из зоны резания и появляются вибрации и надиры на обработанной поверхности заготовки.

Применение твердосплавных цельных резцов было вызвано тем, что для определения температуры контакта инструмента с изделием был выбран метод естественной термопары, как наиболее простой и достоверный. Для съёма термотока при резании применялись специальные токосъёмник и гальванометр. Метод естественной

термопары, применяемый в данном случае, дает возможность получить определенные значения средней температуры резания после соответствующей градуировки.

Линейная величина износа резца по задней поверхности определялась с помощью инструментального микроскопа МИР-1, оснащенного микроскопической насадкой АМ9-2, с точностью до 2 мкм.

Как показали проведенные исследования, с изменением температуры интенсивность износа изменяется немонотонно. В процессе стойкостного эксперимента температура в зоне резания изменяется непрерывно в результате роста фаски износа по задней поверхности резца. Изменение площадки износа ведет к перераспределению тепловых потоков на режущих гранях инструмента, что в свою очередь, через изменение интенсивности износа влияет на величину площадки износа (рис. 1).

Налицо довольно сложная взаимосвязь интенсивности износа и температуры, которая в соответствии с теорией абсолютных скоростей реакции может быть описана формулой Аррениуса для термически активированных процессов [2]:

$$J_h = J_{h0} \exp(\Delta H / R\Theta) \qquad (1)$$

где J_{h0} – постоянная; ΔH – эффективная энергия активации данного процесса; R – универсальная газовая постоянная; Θ – температура резания.

На основе термоактивационного анализа процесса разрушения различных металлов в широком диапазоне температур и напряжений

установлено, что эффективная энергия активации ΔH меняется при изменении приложенного напряжения по зависимости

$$\Delta H = \Delta H_0 - \gamma\sigma, \qquad (2)$$

где ΔH_0 – энергия сублимации; γ – структурно-чувствительный коэффициент, определяющий степень перенапряжения межатомных связей по сравнению со среднеприложенным напряжением σ.

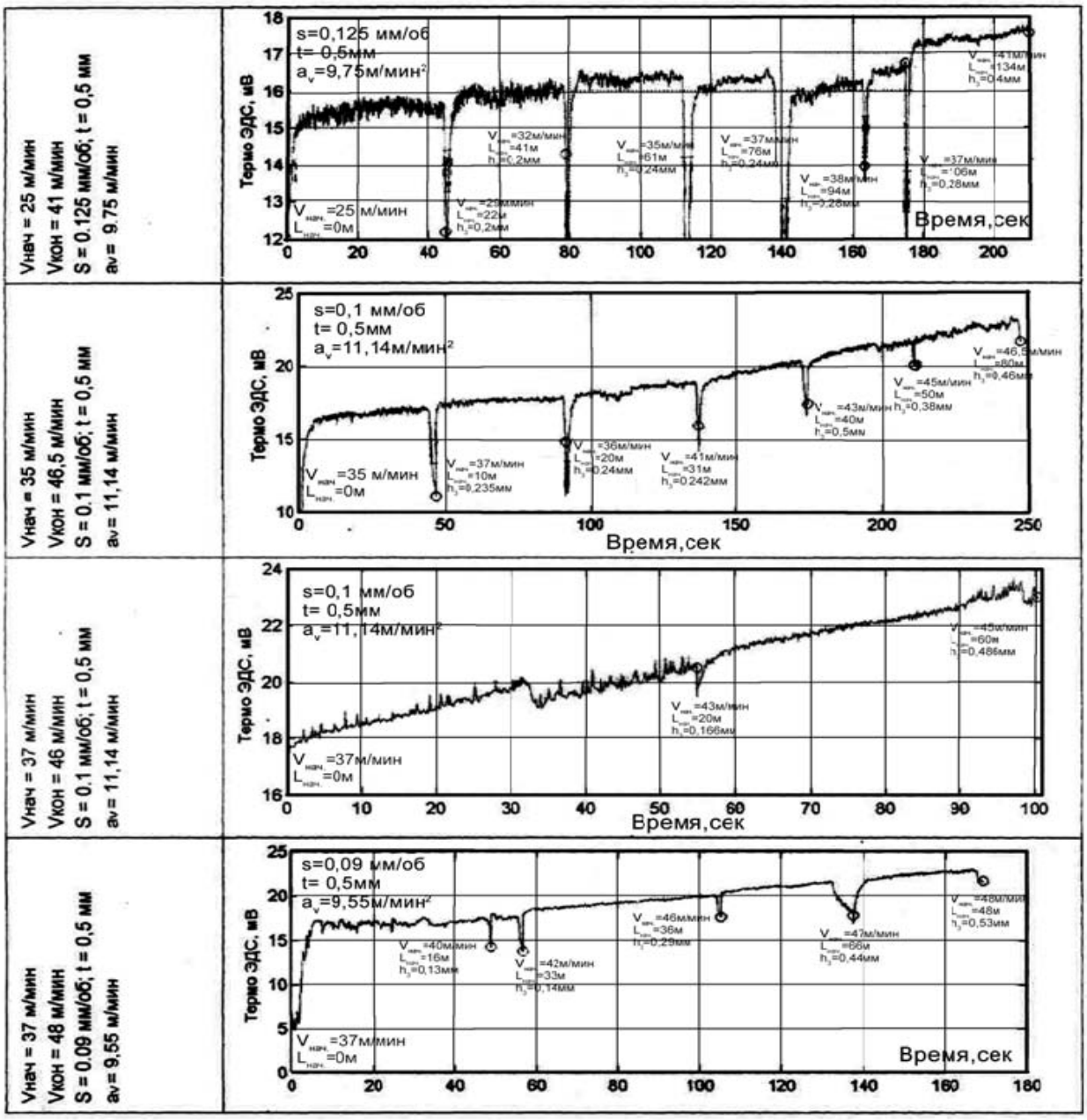


Рис. 1. Осциллограммы термоЭДС при торцевом точении от центра к периферии сплава ХН73МБТЮ-ВД резцом ВК6ОМ

Из результатов стойкостных и температурных экспериментов видно, что для всех исследованных скоростей резания с ростом фаски зависимости износа $h_3(\ell)$ и $\Theta(\ell)$ являются нелинейными (рис. 2).

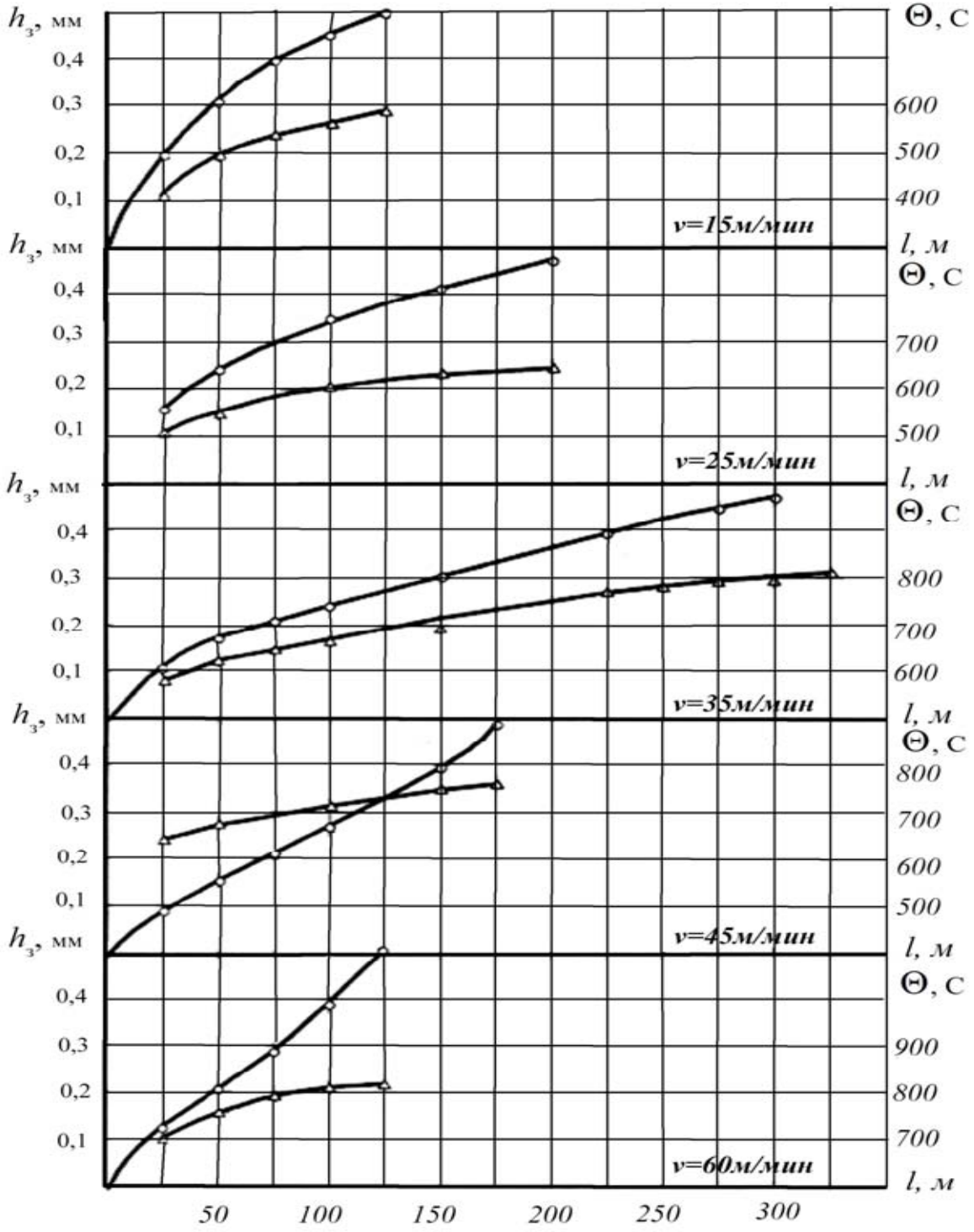


Рис. 2. Влияние пути резания на изменение температуры резания и износ резца ВК6ОМ при продольном точении сплава ХН73МБТЮ

Интересно, что для соседних скоростей (15 и 25 м/мин., 25 и 35 и т.д.), температурные диапазоны в процессе изнашивания инструмента в значительной части перекрываются.

Интенсивность нарастания температуры для различных скоростей переменна, что выражается различными значениями углов наклона зависимостей температуры Θ от пути резания *l*, построенных в двойной логарифмической системе координат. Аппроксимация этих зависимостей степенными выражениями типа

$$\Theta = \Theta_0 + C_0 \ell^n \qquad (3)$$

позволила получить значения C_0 и n (табл. 1).

Таблица 1

υ	C_0	n	Примечание
15	52,0	0,25	
25	67,8	0,12	
35	96	0,1	Оптимальный режим
45	74	0,08	
60	66	0,11	

Из табл. 1 видно, что с повышением скорости резания интенсивность роста Θ, выраженная значением *n*, характеризующим тепловую нестационарность данного режима, изменяется немонотонно, доходя до минимума при оптимальной по износостойкости скорости резания υ=35 м/мин. и затем снова увеличивается. При торцевом точении с постоянными числами оборотов шпинделя интенсивность изменения температурной нагрузки при контакте определяется, прежде всего, направлением подачи от центра или к центру (рис. 3).

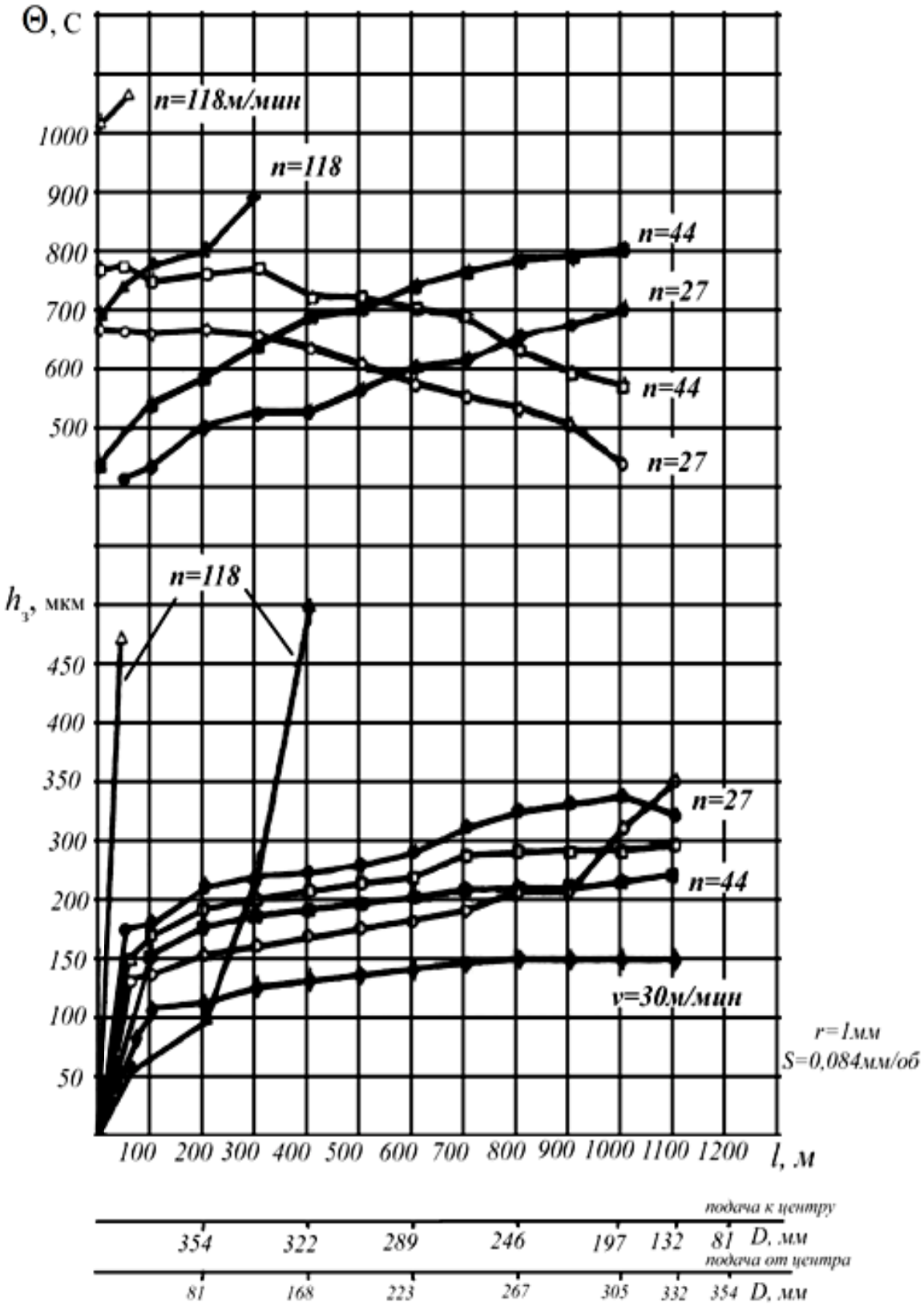


Рис. 3. Износ резца ВК6ОМ, температура резания при торцевом точении ЭИ437БУВД с n = const [3]: △□○ - *подача к центру* ▲■●♦ - *подача от центра*

Разложим экспоненциальный множитель $[\exp(\Delta H / R\Theta)]$ уравнения (1) в ряд Тейлора, ограничиваясь двумя первыми членами ряда:

$$\exp(\Delta H / R\Theta) = \exp(\Delta H / R\Theta_0) + \exp(\Delta H / R\Theta_0) * (-\Delta H / R\Theta_0^2)(\Theta - \Theta_0) \ . \qquad (4)$$

С учетом того, что при разложении в ряд Тейлора появляется остаточный член R_n:

$$J_h = J_{h0}(1 - \frac{\Delta H}{R\Theta_0^2}\Delta\Theta) \ . \qquad (5)$$

Поскольку приращение температуры в соответствии с формулой (3) может быть принято пропорциональным пути резания, с учетом выражения (5):

$$\Theta = \Theta_0 + C_0\ell^n, mo \int_0^{\ell_i} (\Theta - \Theta_0)d\ell = \int_0^{\ell_i} C_0\ell^n d\ell = C_0 \frac{e^{n+1}}{n+1} / =$$

$$= \exp(\Delta H / R\Theta_0)[\ell_i - (\frac{\Delta H}{R\Theta_0^2}) * \frac{C_0\ell^{n+1}}{(n+1)}] = \exp(\Delta H / R\Theta_0)\ell[1 - (\Delta H / R\Theta_0^2)\frac{C_0\ell^n}{n+1}] =$$

$$= / \ \ell^n = (\Theta - \Theta_0) / C_0 / = \exp(\Delta H / R\Theta_0)\ell[1 - (\Delta H / R\Theta_0^2]\frac{\Theta - \Theta_0}{n+1},$$

приращение износа на длине *Δl* пути резания с учетом закономерности и величины приращения температуры и величины R_n:

$$\Delta h = J_{h\Theta_0}\Delta\ell[1 - R_n \frac{\Delta\Theta}{n+1}] \ . \qquad (6)$$

На основании экспериментальных данных и в соответствии с зависимостью (6) для приращения износа получены численные значения остаточного члена ряда Тейлора приведенные в табл. 2.

Таблица 2

№	$\ell, м$	Θ° C	$h, мм$	$\Delta\Theta^\circ C$	$\Delta h, мм$	n	R_n
1	2	3	4	6	7	10	11
1	25	410	0,2			0,26	
	50	500	0,3	90	0,1		$3,7*10^{-3}$
	75	570	0,4	160	0,2		$2,0*10^{-3}$
	100	590	0,45	180	0,25		$2,5*10^{-3}$
2	25	510	0,16				
	50	560	0,24	50	0,08	0,13	$2,2*10^{-3}$
	100	610	0,35	100	0,19		$2,9*10^{-3}$
	150	640	0,42	130	0,26		$3,2*10^{-3}$
3	25	580	0,11				
	50	620	0,17	40	0,06		$3,6*10^{-3}$
	100	670	0,25	90	0,14	0,08	$3,7*10^{-3}$
	150	700	0,31	120	0,20		$3,6*10^{-3}$
	225	730	0,40	150	0,29		$3,21*10^{-3}$
	275	745	0,45	165	0,34		$3,1*10^{-3}$
	300	750	0,48	170	0,37		$3,0*10^{-3}$
4	25	650	0,11				
	50	680	0,17	30	0,06	0,10	0
	100	730	0,28	80	0,17		$0,64*10^{-3}$
	150	760	0,41	110	0,3		
5	25	710	0,14				
	50	760	0,22	50	0,08	0,11	
	75	800	0,30	90	0,16		
	100	820	0,40	110	0,26		$0,76*10^{-3}$

Установлено, что с изменением температуры резания значения R_n изменяются немонотонно, при температурах, ниже оптимальной, зависимость $R_n(\Theta)$ имеет *S*-образный вид, при температурах, выше оптимальной, величина $R_n \approx 0$, что позволяет в этом диапазоне скоростей (температур) резания суммировать износ практически линейно с увеличением температуры резания.

В этом случае, при суммировании износа, нужно учитывать величину R_n, изменяющуюся с изменением силовых нагрузок на контакты (рис. 3).

В случае торцевого точения (рис. 3) также наименьшее значение n=0,02 соответствует оптимальному по износостойкости режиму, величина R_n положительна, для всех остальных режимов она отрицательна, причем с увеличением числа оборотов среднее значение R_n увеличивается.

Выводы

1. Показано, что при продольном точении температурный режим эксплуатации режущего инструмента является нестационарным, причем зависимость температуры от пути резания можно аппроксимировать степенными функциями. При торцевом точении с $n = const$ в зависимости от направления подачи – от центра или к центру заготовки – показатель n зависимости $\Theta = \Theta_0 + C_0 \ell^n$ различен при одинаковых средних условиях резания.

2. Установлено, что суммирование износа не является простым сложением величин приращения износа. Зависимость $J_h(\Theta)$ может быть описана формулой Аррениуса для термоактивированного процесса, которая для случая $\Theta = f(\ell)$ в результате разложения в ряд Тейлора по степеням ℓ представляется упрощенной зависимостью приращения износа от приращения пути резания, приращения температуры и интенсивности износа в предшествующий момент времени.

3. Анализ температурных закономерностей интенсивности износа при разложении их в ряд Тейлора с остаточным членом ряда R_n показывает, что при температурах выше оптимальных величина $R_n \approx 0$, износ суммируется линейно с увеличением температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов, М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.

2. Каримов И. Г., Постнов В. В. Температурно-кинетическая модель изнашивания режущего инструмента// Наука – производству: Ежегодный научно-технический сборник. Вып. 5. Уфа: АН РБ. Гилем. – 2010.– С. 58-64.

3. Зориктуев В. У., Егоров А. А. Некоторые вопросы торцевого точения жаропрочного сплава ЭИ 698ВД. Труды УАИ.– Уфа.– 1975.

Раздел III

ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 629.1

Ю.М. Ахметов, Э. И. Зангиров, А. В. Свистунов (УГАТУ)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ В ВИХРЕВОМ РЕГУЛЯТОРЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

Повышение энергетической эффективности трубопроводных систем распределения и транспортировки газа является приоритетным направлением развития энергетики и энергетической эффективности промышленности Российской Федерации и входит в перечень критических технологий, определяющих процесс создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления энергетических ресурсов [1].

Разработанная учеными «Уфимского государственного авиационного технического университета» (УГАТУ) и «Институт технологии и организации производства» (ОАО НИИТ) технология квазиизотермического дросселирования давления газа позволяет

уменьшить снижение температуры газа, выпадение кристаллогидратов и образование конденсатных пробок при дросселировании давления газа в процессе транспортировки к потребителям [2, 3].

На основании данной технологии специалистами ОАО НИИТ и УГАТУ была разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец квазиизотермического регулятора давления газов (КВРД) (рис. 1) [4].

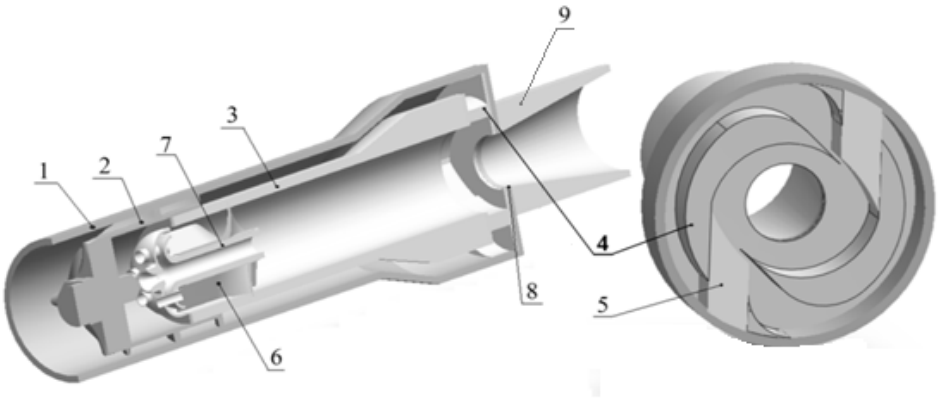


Рис. 1. Твердотельная модель экспериментального образца КВРД:

1 – корпус; 2 – винтовая головка; 3 – камера энергетического разделения; 4 – закручивающее устройство (улитка); 5 – регулирующие клинья; 6 – тормозное устройство; 7 – устройство возврата потока; 8 – диафрагма; 9 – диффузор

Для прогнозирования работы подобных устройств и их проектирования на уровне современных технологий необходимо получение рабочей характеристики на всем диапазоне работы (обобщенная рабочая характеристика).

Отсутствие рабочих характеристик КВРД и методик их получения приводят к необходимости их создания. Получение обобщенной рабочей характеристики КВРД осуществляется согласно следующим этапам: проведение экспериментальных исследований

работы КВРД на всем диапазоне входных и выходных давлений; получение рабочих характеристик работы регулятора при постоянных входном и выходном давлениях; объединение полученных данных и вывод обобщенной рабочей характеристики КВРД.

Экспериментальные исследования образца выполнялись в лаборатории «Газодинамика высоких давлений» УГАТУ в 2011 году. В качестве рабочего тела использовался сжатый воздух. Абсолютное входное давление в экспериментах составляло 0,7; 1,6 МПа. Выходное давление составляло 0,1÷1,35 МПа. Температура воздуха на входе в регулятор в процессе экспериментов изменялась в интервале от 18°С до 5°С.

Схема измерений лабораторного стенда представлена на рис. 2.

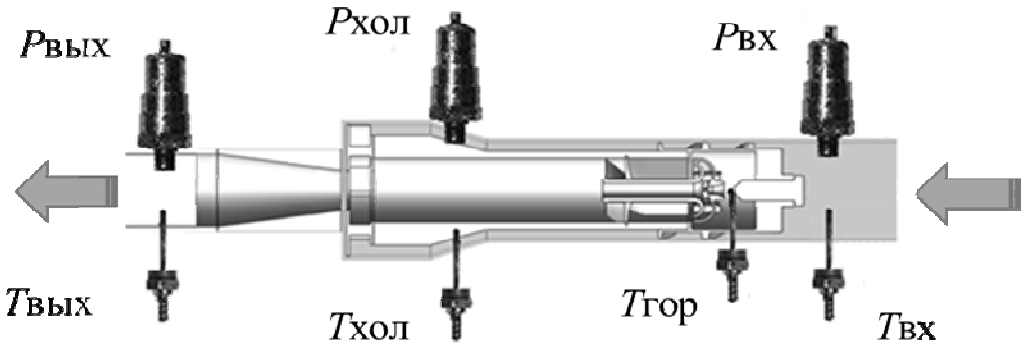


Рис. 2. Базовая схема измерений режимных параметров КВРД:

$P_{вх}$, $T_{вх}$ – давление и температура потока газа на входе в КВРД; $P_{хол}$, $T_{хол}$ – давление и температура потока газа перед закручивающим устройством КВРД; $T_{гор}$ – температура газа перед устройством возврата потока; $P_{вых}$, $T_{вых}$ – давление и температура потока газа на выходе из КВРД

Измерение температуры осуществлялось хромель-копелевыми термопарами с закрытым спаем.

Обработка сигнала температур (термопары) и давлений (датчики ЛХ-415) осуществлялась при помощи двух 8-канальных

преобразователей (*I*-7018 и *I*-7017) и блока питания. Обработанный сигнал поступал в цифровой преобразователь *I*-7520, после чего по каналу *RSS* поступал в программный комплекс обработки и записи данных, где осуществлялись запись и хранение файлов в виде графической зависимости параметров от времени и в виде численного массива данных (таблица).

Управление модулями осуществлялось компьютером, прием информации с каждого датчика обеспечивался с частотой 1 Гц [5].

На рис. 3 представлено экспериментальное исследование, при котором давление входного потока газа составляло 0,7 МПа; давление потока газа на выходе – 0,1 МПа; температура входного потока газа изменяется в диапазоне от 24,3°С до 4,6°С.

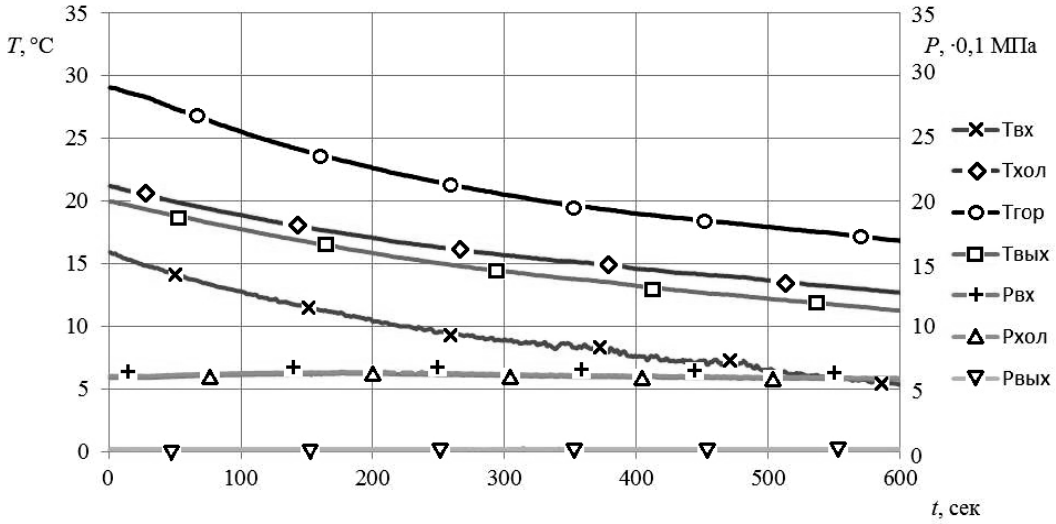


Рис. 3. Изменение параметров потока газа на входе и выходе КВРД от времени экспериментального исследования

Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами статистики, полученная в итоге графическая зависимость отображает зависимость температуры на выходе КВРД от температуры на входе при постоянных давлениях на входе и выходе (рис. 4).

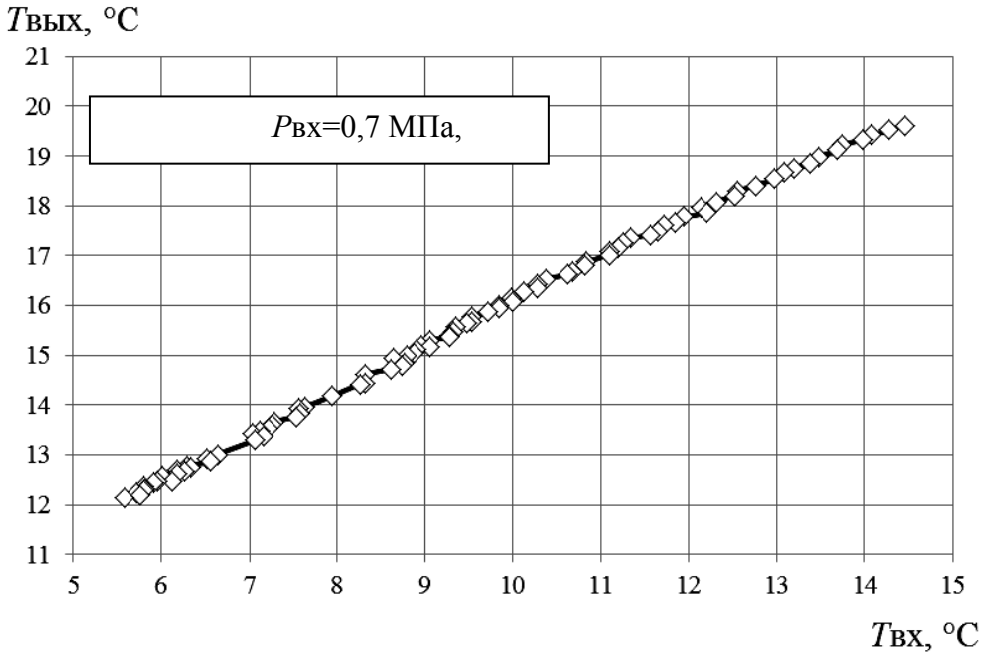


Рис. 4. Зависимость изменения температуры газа на выходе КВРД от температуры на входе в регулятор

Анализ результатов экспериментальных данных показывает, что при увеличении интервала изменения входной температуры ($\Delta T_{вх} \to \infty$) зависимость $T_{вых}$ от $T_{вх}$ с приемлемой точностью описывается степенной зависимостью, имеющей вид $T_{вых}=a\cdot(T_{вх})^n$ (с постоянным значением n=const).

На конечном участке (5,5°C<$T_{вх}$<14,5°C) зависимость $T_{вых}$ от $T_{вх}$ может быть описана линейным уравнением вида $T_{вых}=к\cdot T_{вх}+b$. При этом:

$$\begin{cases} к = к(\Delta T_{вх}); \\ b = b(\Delta T_{вх}). \end{cases} \quad (1)$$

Анализ зависимости выходной температуры потока газа от входной (рис. 4) позволил выделить линейные участки с постоянными величинами наклона (коэффициент k) (рис. 5).

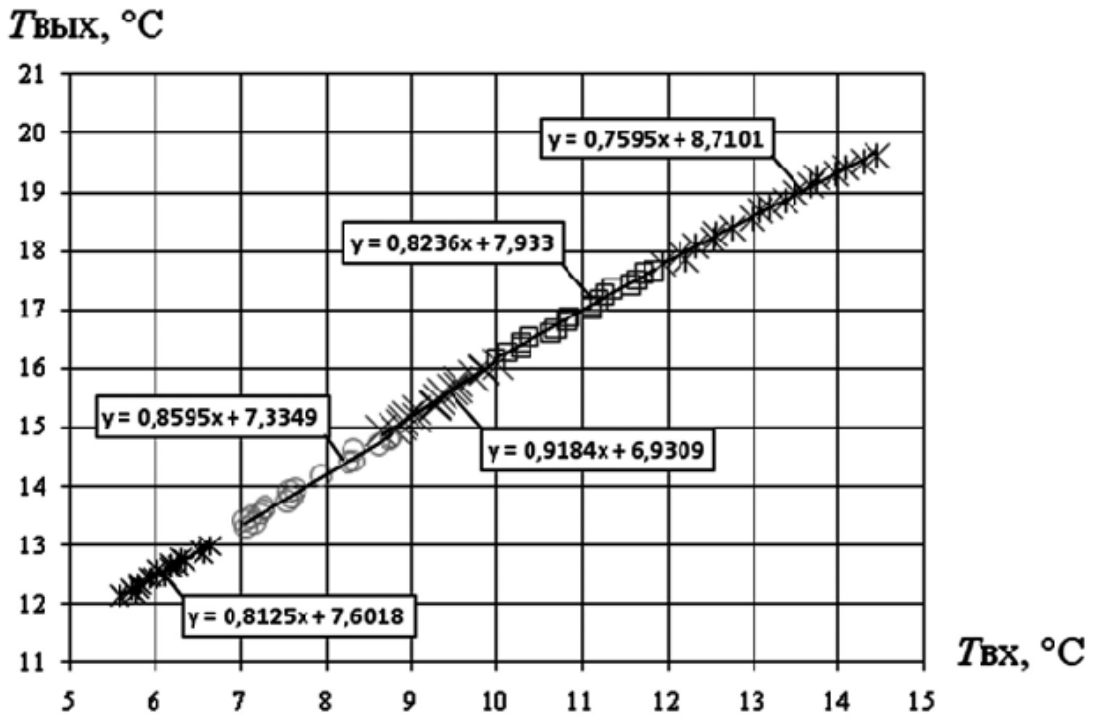


Рис. 5. Зависимость выходной температуры потока газа от входной, разделенная на линейные участки

Разделение кривой на конечные линейные участки позволило определить характер влияния температуры потока входного газа на величины коэффициентов k и b полученных линейных уравнений (рис. 6).

В результате была получена система уравнений, позволяющая определить значения коэффициентов k и b в зависимости от величины температуры входного потока газа, при заданных входном и выходном давлениях, равных, соответственно, 0,7 МПа и 0,1 МПа:

$$\begin{cases} k = -0{,}0043\cdot(T_{\text{вх}})^2 + 0{,}0767\cdot T_{\text{вх}} + 0{,}5223; \\ b = 0{,}0363\cdot(T_{\text{вх}})^2 - 0{,}5657\cdot T_{\text{вх}} + 9{,}5545. \end{cases} \quad (2)$$

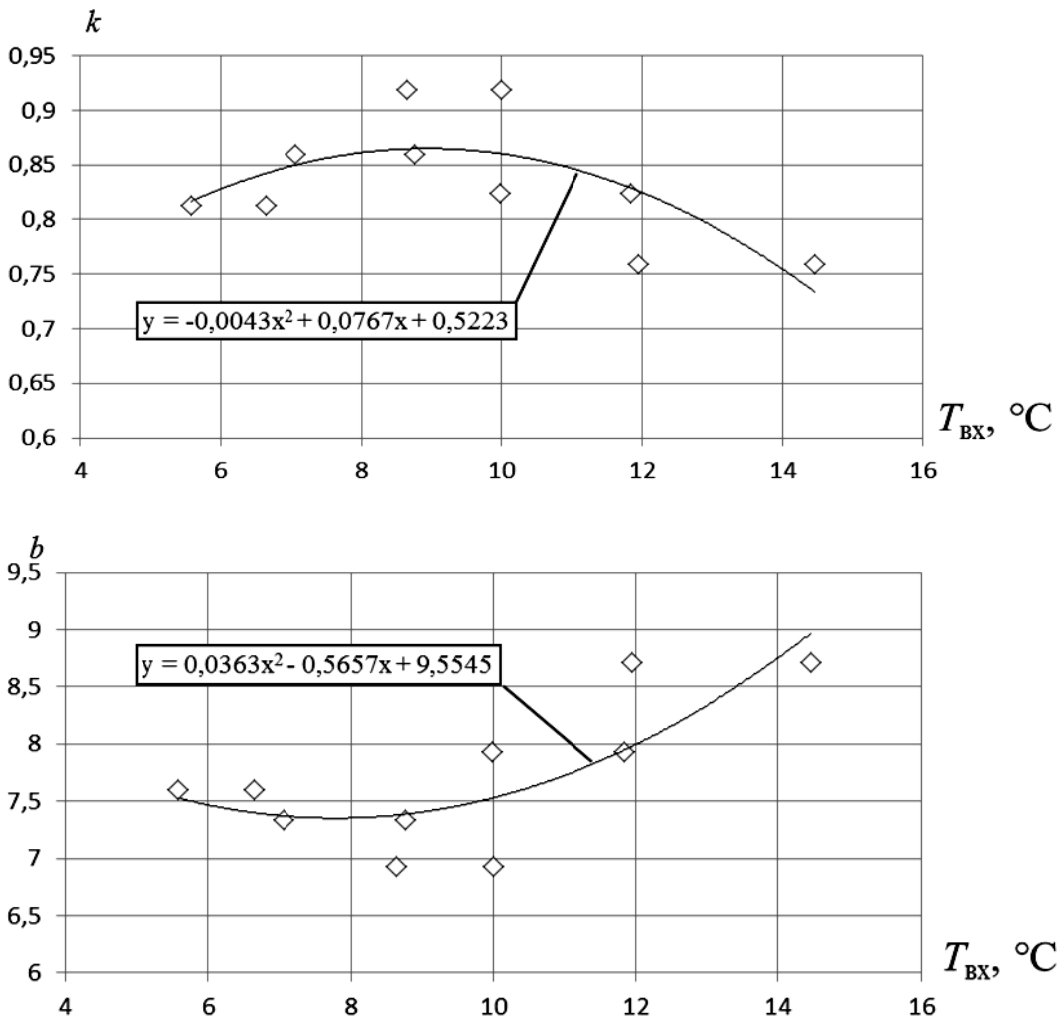


Рис. 6. Влияние температуры входного потока газа на коэффициенты *k* и *b*

В результате проведенной идентификации экспериментальных данных по испытаниям КВРД может быть получено математическое описание зависимости температуры газа на выходе регулятора при изменении температуры газа на входе (т.е. $T_{вых}= f(T_{вх})$). Для значений барометрических параметров потока газа $P_{вх}$=0,7 МПа, $P_{вых}$=0,1 МПа уравнение рабочего процесса КВРД будет иметь вид:

$$T_{вых}=(-0{,}0043\cdot(T_{вх})^2 + 0{,}0767\cdot T_{вх} + 0{,}5223)\cdot T_{вх} + (0{,}0363\cdot(T_{вх})^2 - 0{,}5657\cdot T_{вх} + 9{,}5545). \quad (3)$$

С учетом изменения барометрических параметров потока газа на входе и выходе КВРД обобщенное уравнение рабочего процесса КВРД $T_{вых}= f(T_{вх}, P_{вх}, P_{вых})$ может быть представлено в виде:

$$T_{вых}=[k_1(T_{вх})\cdot \Delta T_{вх}+b_1(T_{вх})]+[k_2(T_{вх}; \Delta P)\cdot\Delta P+ b_2(T_{вх})]- k_3\cdot\Delta P \qquad (4)$$

Уравнение 4 учитывает:

1) влияние величины температуры на входе в регулятор $T_{вх}$;

2) влияние величины давления на входе в регулятор $P_{вх}$;

3) влияние величины давления на выходе из регулятора $P_{вых}$;

4) влияние величины перепада $\Delta P=P_{вх}–P_{вых}$ давления на регуляторе.

В результате проведенной идентификации и анализа экспериментальных данных получено уравнение температурных параметров регулятора при неизменных барометрических параметрах, а также предложено в общем виде нелинейное уравнение температурных параметров регулятора с учетом изменения барометрических входных и выходных параметров потока газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Юрьев В. Л. и др. Разработка, изготовление и поставка опытного образца изотермического регулятора давления для редуцирования на ГРС без подогрева газа / А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. Л. Юрьев, А. Ф. Набиуллин, В. А. Ломоносов, Р. Р. Усманов, Р. Ю. Дистанов // Технический отчет по договору № 489 от 16.07.02г. (I, II этап) / ОАО «НИИТ». – Уфа, 2002.

2. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Юрьев В. Л., Целищев В. А. и др. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. Л. Юрьев, В. А. Целищев, А. А. Соловьев, П. М. Кармацкий, С. В. Гурин, Р. Ю. Дистанов // Наука – производству. 45 лет на пути технического прогресса: Ежегодный научн.-техн. сб. под общ. ред. В. Л. Юрьева. Уфа, 2003. – С.18 – 28.

3. Русак А. М. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева. Сб. науч. трудов IV Междунар. совещ. по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте / А. М. Русак, В. А. Целищев, В. Л. Юрьев, П. М. Кармацкий, Ю. М. Ахметов, С. В. Гурин, А. А. Соловьев, Р. Ю. Дистанов// М.: ИМАШ РАН, 2004. С. 133–144.

4. Пат. 2237918 РФ, МПК G05D16/00. Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты) / М. З. Асадуллин, Ю. М. Ахметов, Р. Ю. Дистанов, В. А Ломоносов, А. Ф. Набиуллин, В. Г. Поликарпов, А. М. Русак, Р. Р. Усманов, В. Л. Юрьев (РФ). – 2003114801/28; Заявлено 19.05.2003; Опубл. 10.10.2004. Бюл.28.(НИИТ).

5. Пархимович А. Ю., Соловьев А. А. Исследование экспериментальных характеристик вихревого регулятора / Вестник УГАТУ. – 2006. Т18 №1(17).

УДК 620.9

Ю. М. Ахметов, Е. А. Глухов, Э. И. Зангиров,
М. В. Мухаметов, Р. Ф. Хакимов (УГАТУ)

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ И ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Устройством, позволяющим использовать процессы разложения воды для получения тепловой энергии, является электрогидродинамический преобразователь (ЭГДП) жидкости [1]. Эскизно электрогидродинамический преобразователь представлен на рис. 1.

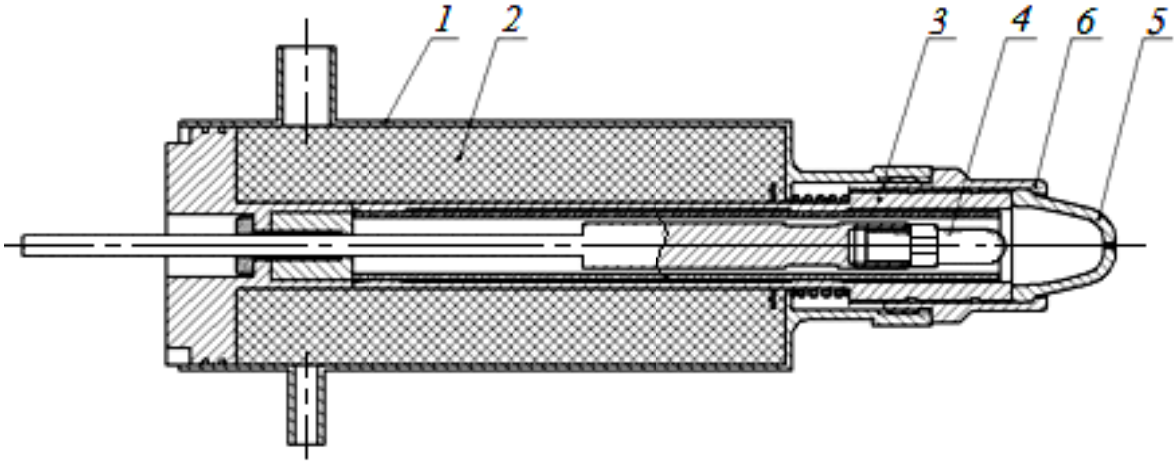


Рис. 1. Схема ЭГДП: 1 – корпус; 2 – резервуар с пористым наполнителем; 3 – испаритель; 4 – анод; 5 – сопло-катод; 6 – штуцер

При контакте с последующим разделением электродов образуется электрическая дуга. Часть энергии дуги нагревает электроды и передается через испаритель воде, содержащейся в баке.

Вследствие теплового расширения пар начинает движение по испарителю, передняя часть которого выполнена в виде многозаходных винтовых канавок. В испарителе имеются 2 отверстия, подводящие пар в межэлектродную область, выполненные тангенциально к аноду. При прохождении закрученных потоков пара через электрическую дугу происходит ионизация пара, который выталкивает дугу на внешнюю поверхность сопла (рис. 2).

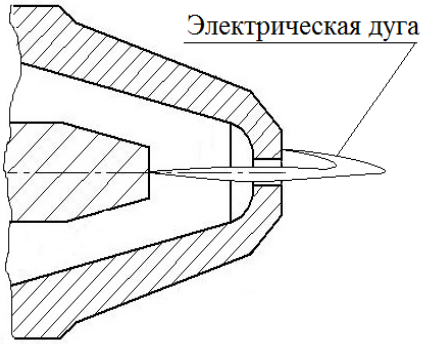


Рис. 2. Выдувание дуги и замыкание на внешней части сопла

Наличие в зоне плазмы кроме электрического поля постоянного магнитного поля интенсифицирует процесс нагревания воды и ее диссоциации [2]. За счет этого повышается энергетическая эффективность процесса. Эффективность устройства можно определить как общий показатель эффективности K, учитывающий электрическую энергию E_e, вводимую в устройство, тепловую энергию E_T, которая аккумулируется в нагретом водном растворе и водяном паре, и энергию E_V, содержащуюся в выделившихся газах – водороде и кислороде:

$$K = \frac{E_T + E_V}{E_e}.$$

Разбиваем весь тракт на участки в местах изменения геометрических параметров ЭГДП (рис. 3). До сечения 1 рабочая жидкость (РЖ) движется по пористому наполнителю в баке. На этапе 1-2 проточная часть образована внутренними стенками корпуса, испарителем и пружиной, необходимой для прижатия испарителя к соплу. Участки 2-3 и 4-5 характеризуются винтовыми каналами испарителя. Участки 3-4 и 5-6 образуются поперечными канавками, но отличаются наличием двух вышеупомянутых тангенциальных каналов в 5-6. Дальнейшее движение РЖ происходит по межэлектродной области. С сечения 7 начинается сужение проточной части. Выделяем параметры рабочего тела в каждом сечении в статических и динамических параметрах (G, Q, P, T).

Схема изменения параметров рабочей жидкости по сечениям представлена на рис. 4. Движение энергии и предполагаемые этапы преобразования рабочей жидкости указаны на рис. 5.

Составленные схемы могут быть использованы для создания математической модели ЭГДП, которая позволит рассчитать характеристики устройства и оптимизировать в процессе отладки модели конструктивные и технические параметры.

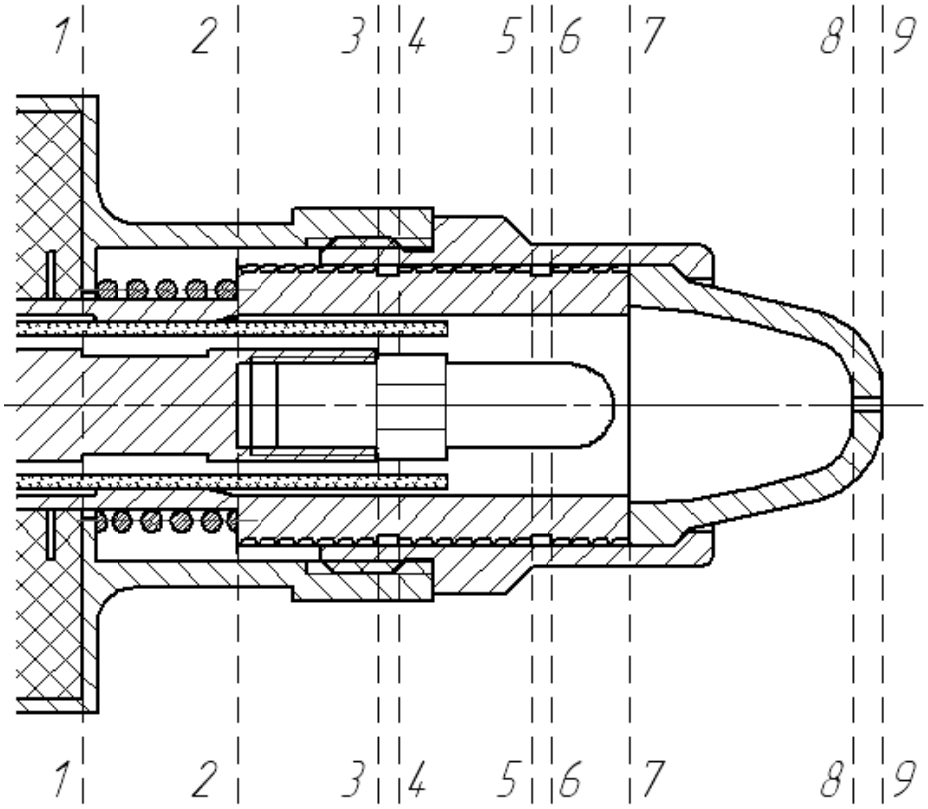


Рис. 3. Конструктивная схема

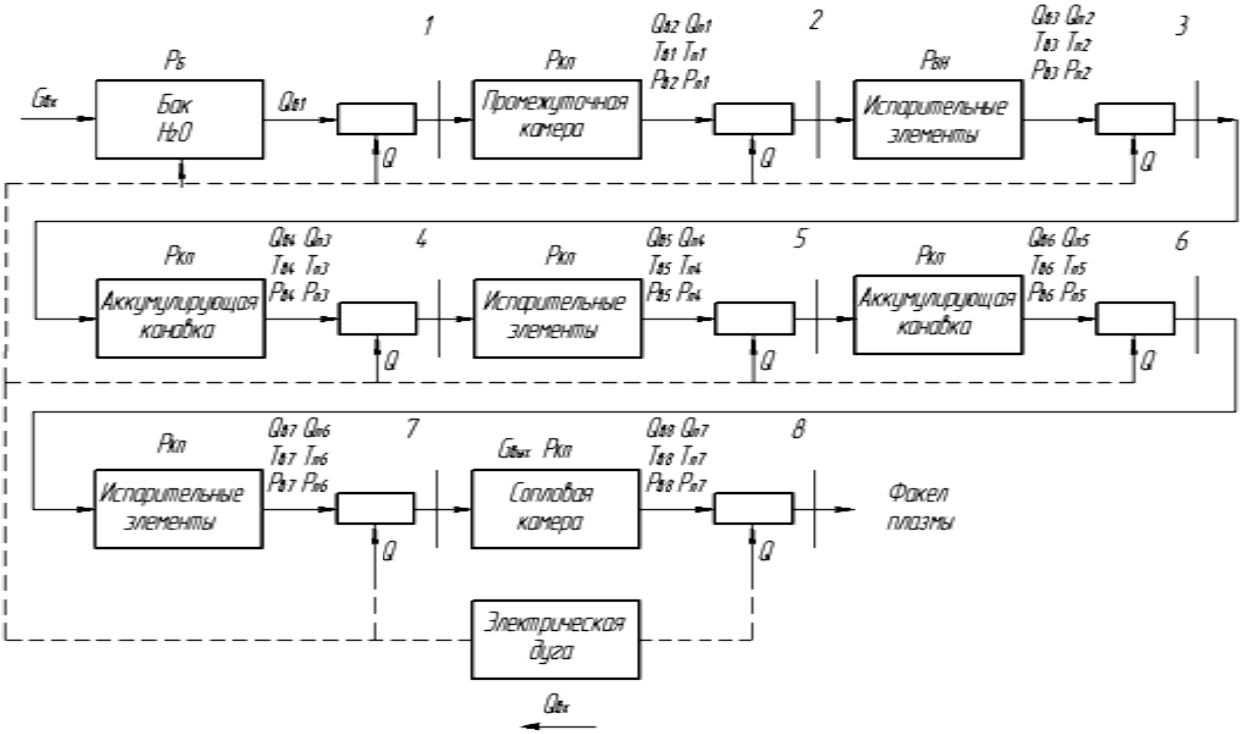


Рис. 4. Схема изменения параметров рабочей жидкости

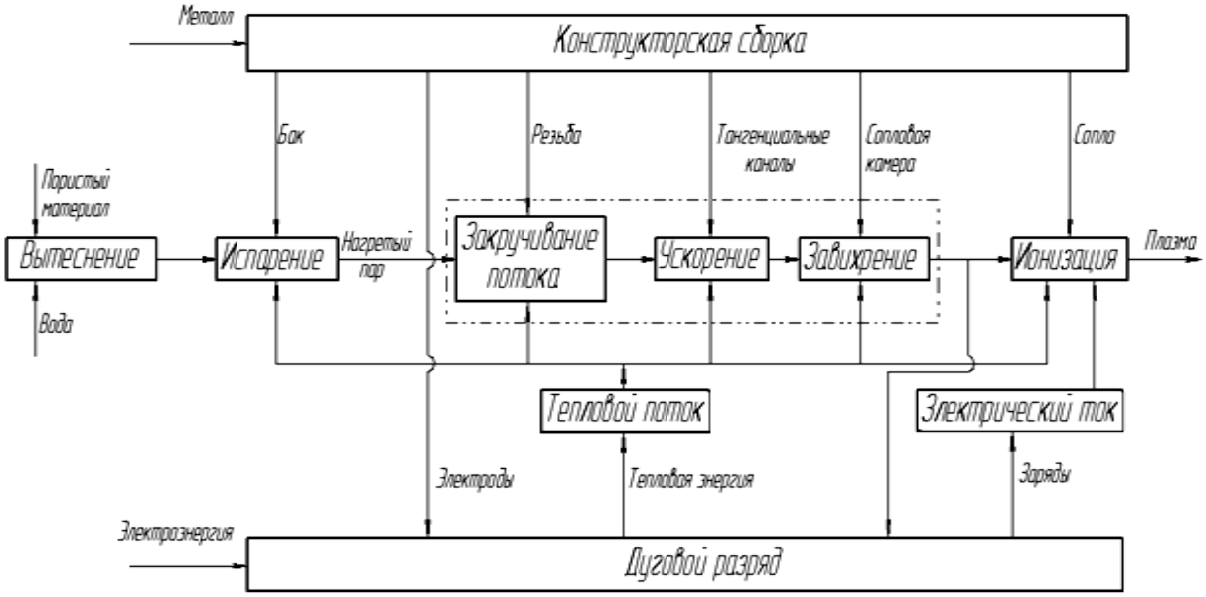


Рис. 5. Функциональная схема

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухаметов М. В., Новиков М. В. Определение температурного поля истекающих газов и электрических характеристик электрогидродинамического преобразователя жидкости. Сборник научных трудов VII Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых "Актуальные проблемы науки и техники", Том 2/ Уфа: УГАТУ, 2012. – стр. 187–190.

2. Сердюков В. И., Поплавский Ю. А., Синица Л. Н. Исследование спектров излучения водяного пара в диапазоне 9600 – 12000 см$^{-1}$. Оптика и спектроскопия. 2006, т.101, №4, С. 565–569.

УДК 629.1

Ю. М. Ахметов, Э. И. Зангиров, М. В. Мухаметов,
А. В. Свистунов, А. А. Чиндина (УГАТУ)

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДРОССЕЛИРОВАНИЯ ГАЗА

Повышение энергетической эффективности трубопроводных систем распределения и транспортировки газа является приоритетным направлением развития энергетики и энергетической эффективности промышленности Российской Федерации и входит в перечень критических технологий, определяющих процесс создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления энергетических ресурсов [1].

Разработанная учеными «Уфимского государственного авиационного технического университета» и ОАО «Институт технологии и организации производства» технология квазиизотермического дросселирования давления газа позволяет уменьшить снижение температуры газа, выпадение кристаллогидратов и образование конденсатных пробок при дросселировании давления газа в процессе транспортировки к потребителям [2, 3].

Для проектирования устройств дросселирования давления газа с применением современных технологий вычислительной техники необходима разработка математических моделей, описывающих

газодинамические и термодинамические процессы, происходящие в газовых потоках [4, 5].

Процесс дросселирования газа в вихревой трубе, 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. [6].

В работах указанных авторов рассматривались процессы в вихревых устройствах (рис. 1), предусматривающих температурное разделение (температурную стратификацию) потока газа.

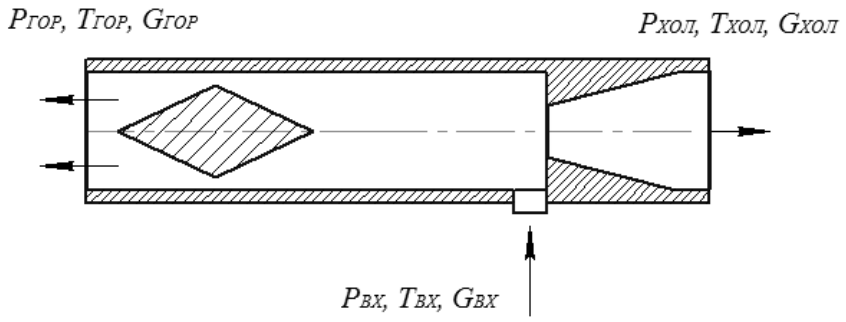


Рис. 1. Противоточная вихревая труба

Процесс снижения давления природного газа в существующих сетях газоснабжения должен отвечать ряду требований, основными среди которых являются безопасность для экологии и дешевизна. Устройством, отвечающим этим требованиям, является противоточная вихревая труба с внешним смешением стратифицированных (нагретого и охлажденного) потоков газа (рис. 2). При этом под внешним смешением понимается смешение стратифицированных потоков газа после диафрагмы вихревой трубы [7].

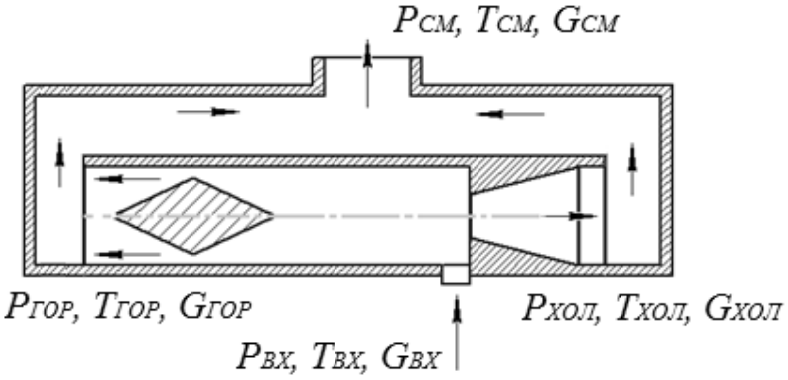


Рис. 2. Противоточная вихревая труба с внешним смешением потоков

В вихревую трубу поток газа подается с параметрами $P_{вх}$, $T_{вх}$. В результате снижения давления газ перейдет в состояние с параметрами $P_{ДТ}$, $T_{ДТ}$. Дросселирование исходного потока в вихревой трубе позволяет получить на выходе поток газа с параметрами нагретого потока $P_{ГОР}$, $T_{ГОР}$ и массовым расходом $G_{ГОР}$ и охлажденного потока $P_{ХОЛ}$, $T_{ХОЛ}$ с массовым расходом $G_{ХОЛ}$. Полученные в результате прохождения вихревой трубы параметры газа значительно отличаются от параметров газа, полученных после прохождения им дросселирующих устройств (снижение и превышение температуры соответственно). При смешении истекающих из трубы потоков газа

логично получение потока газа с параметрами $P_{ДТ}$, $T_{ДТ}$, однако, как было показано в работах Ю. М. Ахметова и С. В. Гурина, существует область, в которой возможна реализация квазиизотермического процесса дросселирования.

В противоточной вихревой трубе с внешним смешением потоков массовый расход газа на выходе $G_{ВЫХ}=G_{ГОР}+G_{ХОЛ}$ определится как сумма массовых расходов нагретого и охлажденного потоков. Интенсивность энергетического разделения газов в вихревой трубе (вихревой эффект), как известно, оценивают по зависимости избыточных величин температур газа $\Delta T_{хол} = T^*_{вх} - T^*_{хол}$ и $\Delta T_{гор} = T^*_{гор} - T^*_{вх}$ от доли охлажденного потока $\mu_х = \frac{G_{хол}}{G_{вх}}$ относительно массового расхода на входе $G_{ВХ}$. Доля подогретого потока при этом составит $\mu_Г = \frac{G_{гор}}{G_{вх}} = (1-\mu_Х)$ [9].

Исходя из равенства полных удельных энтальпий входящего в вихревую трубу потока газа и суммы истекающих (нагретого и охлажденного) из нее потоков газа, характеристикой квазиизотермического процесса является температура смешанного потока, а также перепад температуры по всей системе смешения потоков после стратификации в вихревой трубе при c_p=const [9]:

$$T^*_{см} = \mu_х \cdot T^*_{хол} + (1-\mu_х) T^*_{гор} . \qquad (1)$$

Подогрев газа, прошедшего через вихревую трубу, вычисляется как разница температуры смешанного потока газа $T^*_{см}$ и потока газа, входящего в вихревую трубу $T_{вх}$:

$$\Delta T_{\text{вх}} = T^{*}_{\text{см}} - T_{\text{вх}} \ . \qquad (2)$$

Обработка результатов экспериментальных исследований противоточной вихревой трубы согласно А. П. Меркулову [9] представлена в табл. 1. Давление газа на входе в вихревую трубу составляет $P_{\text{вх}} = 6\ атм$, при этом его температура $T_{\text{вх}}$=30ºС. Давление холодного потока $P_{\text{хол}} = 1\ атм$. Как видно из таблицы, максимальная смесевая температура потока газа $T_{см}$ достигается при расходе через «холодный» выход μ_x, лежащем в диапазоне от 0,2 до 0,5. При увеличении или уменьшении μ_x наблюдается уменьшение смесевой температуры газа.

Представленный анализ таблицы в виде графика в P-T координатах процесса дросселирования и перераспределения температуры потоков газа после вихревой трубы изображен на рис. 3.

Таблица 1

Результаты исследований противоточной вихревой трубы

μ_x	1-μ_x	$T_{\text{вх}}$, °C	$T_{\text{хол}}$, °C	$T_{\text{гор}}$, °C	$\Delta T_{\text{гор}}$	$\Delta T_{\text{хол}}$	$T^*_{\text{см}}$, °C	$\Delta T_{\text{см}}$, °C
0,1	0,9	30	-19	36	6	-49	30,5	0,5
0,2	0,8	30	-29	46	16	-59	31	1
0,3	0,7	30	-27	57	27	-57	31,8	1,8
0,4	0,6	30	-23	67	37	-53	31	1
0,5	0,5	30	-17	80	50	-47	31,5	1,5
0,6	0,4	30	-11	93	63	-41	30,6	0,6
0,7	0,3	30	-3	108	78	-33	30,3	0,3
0,8	0,2	30	5	124	94	-25	28,8	-1,2
0,9	0,1	30	17	143	113	-13	29,6	-0,4

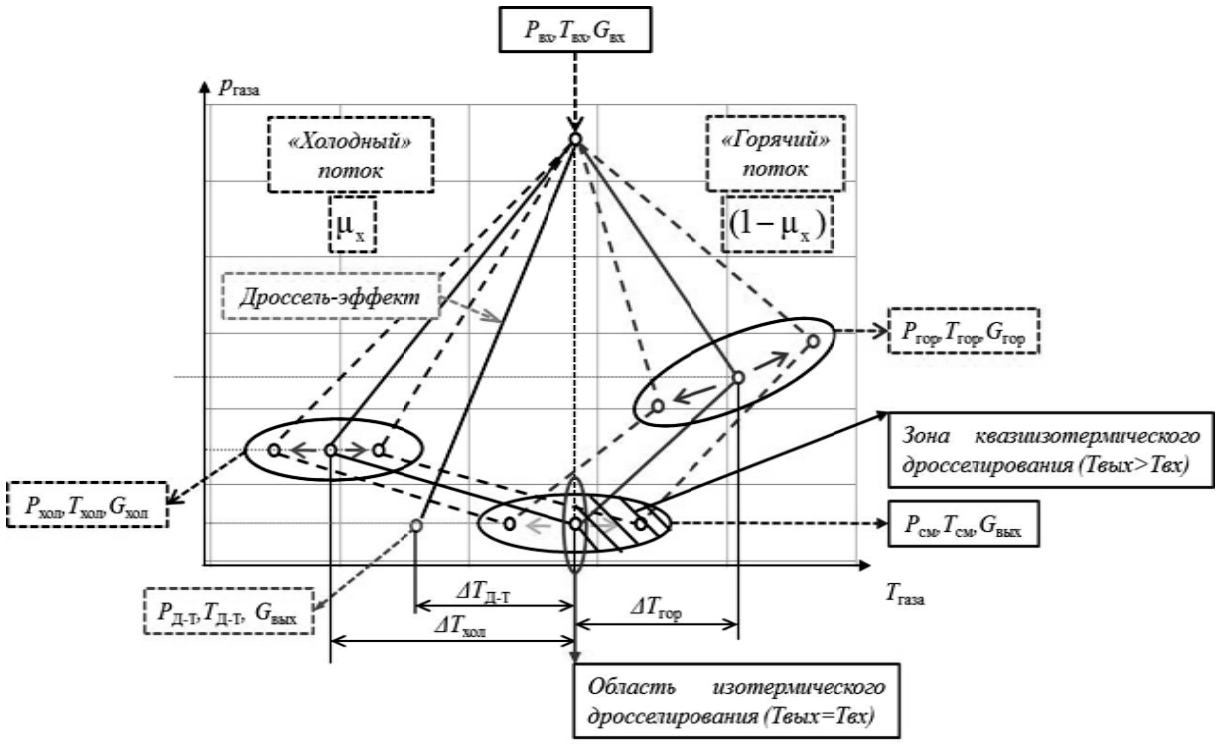


Рис. 3. Принципиальное представление в P-T координатах кривой Джоуля-Томсона и распределения температур потоков газа после вихревой трубы

Сравнительный анализ испытаний вихревых труб различных авторов [9, 10] позволил выявить зоны, в которых смесевая температура равна входной (зона изотермического дросселирования) либо превышает ее (зона квазиизотермического дросселирования). Качественная зависимость температуры газа по тракту вихревой трубы от доли охлажденного потока газа μ_x представлена на рис. 4. Как видно, смесевая температура газа $t_{см}$ на всем участке смешения превышает температуру, полученную при снижении давления газа путем его дросселирования (Дроссель-эффект).

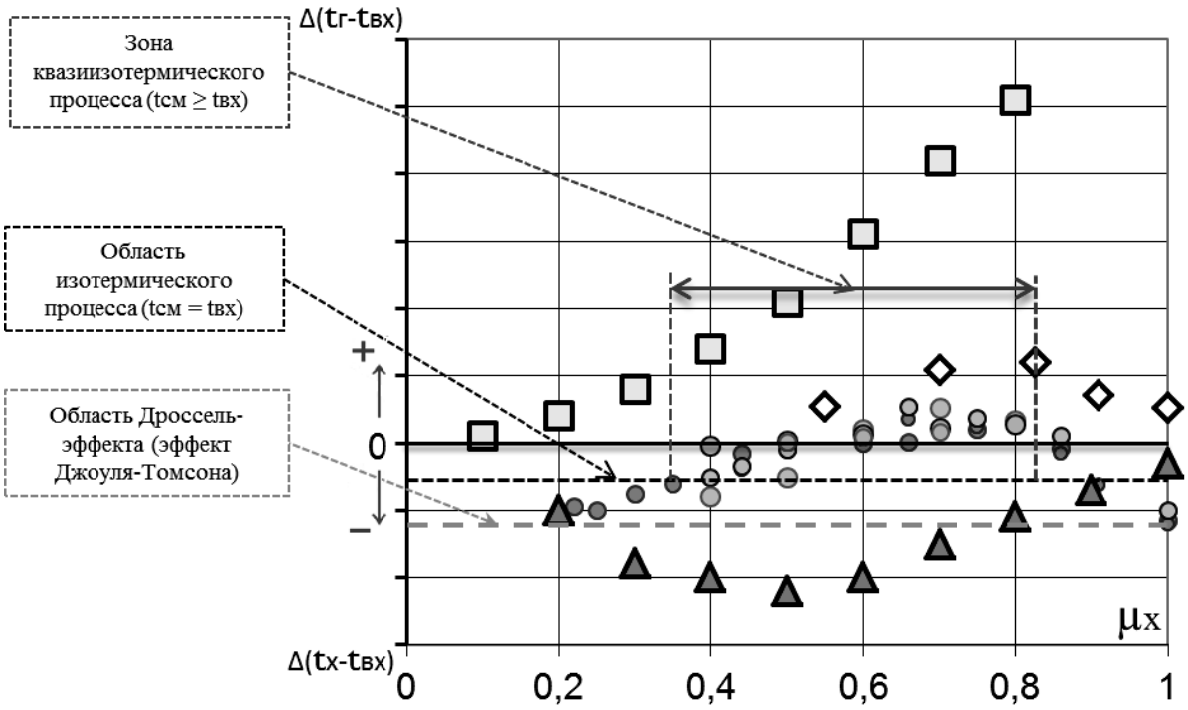


Рис. 4. Результаты испытаний различных вихревых труб:

□◇▲ – согласно [9]; ○○○○○○ – согласно (разное входное давление) [10]

Результаты исследования температурных характеристик, получаемых в результате дросселирования давления в вихревых трубах, подтверждают возможность получения квазиизотермического процесса, для осуществления которого необходимо создание условий интенсивной температурной стратификации входного потока и последующего смешения газа в определенных массовых пропорциях по формуле 1 с максимальным исключением теплообменных процессов между стратифицированным потоком и окружающей средой.

Анализ механизма процесса температурной стратификации в вихревых трубах позволил выявить несоответствие в процессе дросселирования дифференциального дроссель-эффекта (эффекта Джоуля–Томсона) в двух областях: в области потока с низкой

температурой и в области потока с высокой температурой. Область, в которой температура потока превышает температуру входа, можно использовать в качестве источника предварительного подогрева для повышения входной температуры. Тогда подогрев входного газа, за счет горячего газа, полученного после стратификации, приводит к тому, что температура газа перед стратификацией непрерывно повышается, реализуя положительную обратную связь [11].

На основании проведенного анализа сотрудниками была разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец квазиизотермического регулятора давления газов (КВРД) [12].

Проточная часть экспериментального образца (рис. 5) КВРД состоит из следующих основных элементов: корпус 1; винтовая головка 2; камера энергетического разделения 3; закручивающее устройство (улитка) 4; регулирующие клинья 5; тормозное устройство 6; устройство возврата потока 7; диафрагма 8; диффузор 9.

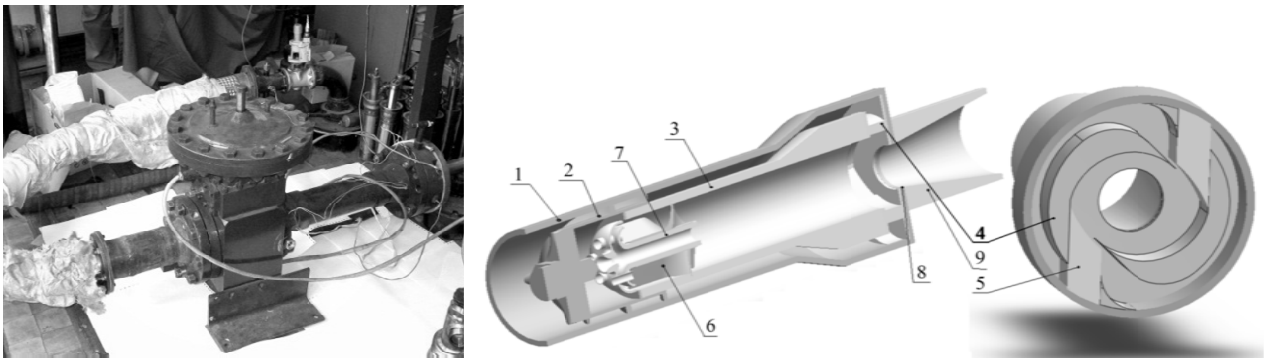


Рис. 5. Экспериментальный квазиизотермический вихревой регулятор давления

В результате анализа конструкции КВРД, реализующей процесс квазиизотермического дросселирования, была разработана структурная схема, которая представлена на рис. 6.

Поток газа с параметрами *G1* (массовый расход), *P*1* (давление), *T*1* (температура), *Q1* (объемный расход) из магистрального трубопровода поступает в кольцевой канал, обтекая винтовую головку, и с параметрами *G2* (массовый расход), *P*2* (давление), *T*2* (температура) и *Q2* (объемный расход) попадает в кольцевой канал. Связь параметров газа после прохождения винтовой головки с параметрами входящего в нее потока газа определяется физическими процессами, происходящими с газом при прохождении им винтовой головки. Параметр *T*2* больше *T*1*, так как на винтовую головку действует тепловой поток $Q_{тепл}$ $1_{ос}$ (перетекание тепла из внутреннего объема регулятора в наружный поток), который повышает температуру потока газа *T*2*. Параметр *Q2* больше *Q1*, вследствие увеличения температуры газа и уменьшения его плотности. Параметр *P*2* меньше параметра *P*1* из-за наличия гидравлических потерь, действующих на поток газа при прохождении им винтовой головки. Гидравлические потери увеличиваются также вследствие действия теплового потока $Q_{тепл}$ $I_{ос}$, так как при этом поток газа расширяется. Параметр *G* является постоянным и не изменяется при течении газа по тракту регулятора.

После прохождения винтовой головки, поток газа с параметрами *P*2*, *T*2*, *Q2* продолжает движение в кольцевом канале по винтовой траектории. При течении газа по винтовому каналу от сечения к сечению возникают пространственные, радиально-тангенциальные и

осевые градиенты давления. Имеется приток тепла $Q_{тепл}$ $П_{ос}$ от устройства торможения, который увеличивает температуру потока газа на конце кольцевого *T*3*, объемный расход *Q3* и скорость потока. Давление *P*3* ниже чем *P*2* вследствие действия на поток при гидравлических потерях [3].

Таким образом, благодаря интенсивным пространственным перетеканиям тепловых потоков по тракту регулятора улучшается процесс теплопередачи от выходящего, стратифицированного потока газа, к входящему, что, в свою очередь, приводит к соответствующему повышению температуры по всему тракту регулятора.

Из кольцевого канала газ с параметрами *P*3*, *T*3*, *Q3* поступает в тангенциальное закручивающее устройство, представляющее собой два тангенциально расположенных сопловых ввода, в которых поток разгоняется до звуковой скорости и вводится в вихревую камеру. При этом температура потока газа *T*4* и его давление *P*4* уменьшаются, а его объемный расход *Q4* увеличивается. За срезом критического сечения возможно сверхзвуковое движение потока в области «косого» среза выходного сопла. За счет высокоскоростного окружного течения газа, образованного тангенциальным вводом газового потока в тангенциальном закручивающем устройстве с плавным переводом по криволинейной поверхности клина и наружной стенкой вихревой камеры (торцевые стенки вихревой камеры перпендикулярны оси), в вихревой камере организуются вынужденный и свободный вихри.

Далее закрученный поток газа с параметрами *P*4*,*T*4*,*Q4* попадает в тангенциальную камеру закрутки, цилиндрическую полость закручивающего устройства (улитки), где он разделяется на две части.

Часть потока газа с параметрами *G6*, *P*6*, *T*6* поступает в придиафрагменный слой. При этом поток газа *G6* составляет примерно 30% от входного потока газа *G4*. Температура *T*6* потока газа *G6*, так же как и температура *T*5* потока газа *G5*, остается равной температуре *T*4* газа, поступающего в тангенциальную камеру закрутки. Давление *P*5, P*6, Q5* потоков газа уменьшается вследствие их разделения.

Также часть газа (*G5* составляет примерно 70% от *G4*) продолжает закрученное движение вдоль вихревой трубы. В вихревой трубе, вследствие закрутки потока, возникает температурная стратификация. Поток газа с большей температурой отбрасывает на периферию, менее нагретый поток остается ближе к оси вихревой трубы. При этом газ подогревает стенку вихревой трубы, которая, в свою очередь, отдает часть тепла $Q_{тепл}$ $П_{ос}$ потоку газа, проходящему кольцевой канал. Температура газа *T*7* понижается вследствие того, что газ отдает часть тепла. Давление газа *P*7* также понижается вследствие, во-первых, трения газа о стенку вихревой трубы, а, во-вторых, за счет трения потока газа, движущегося к устройству возврата потока, о встречный поток газа, вытекающий из устройства возврата потока. Трение одного закрученного потока газа о другой, движущийся в противоположном направлении, порождает в вихревой камере дополнительные вихри,

благодаря которым небольшая часть газа *G6* перебрасывается во встречный поток и начинает движение на выход из регулятора. Объемный расход газа остается неизменным.

Массовый расход потока газа *G8* равен массовому расходу потока, входящего в устройство торможения. Давление газа *P*8* меньше давления газа на входе в устройство торможения, так как при торможении потока происходит его резкое сжатие, вызывающее, также, возрастание температуры газа *T*8* и уменьшение объемного расхода *Q8*. Таким образом, в устройстве торможения создаются условия, обеспечивающие, за счет разницы температур, переброс теплового потока $Q_{тепл}$ $I_{ос}$ в винтовую головку и, далее, входному потоку газа.

Далее газ с параметрами *G8*, *P*8*, *T*8*, *Q8* поступает в камеру возврата потока, представляющую собой трубку, расположенную в центральной части устройства торможения. Массовый расход газа, прошедшего камеру возврата потока, остается неизменным. Давление газа *P*9*, при этом, уменьшается вследствие потерь на трение газа о стенки устройства торможения, а также вследствие изменения площади проходного сечения (площадь проходного сечения устройства торможения меньше площади проходного сечения области регулятора, находящейся перед устройством торможения). Температура потока газа *T*9* по сравнению с температурой газа *T*8*, входящего в устройство возврата потока, остается неизменной. Объемный расход газа также неизменен.

На диафрагме происходит смешение всех трех потоков газа. Результирующая температура газа $T^*_{вых}$ при этом практически равна

или несколько превышает температуру газа на входе в регулятор. Массовый расход газа на выходе из регулятора $G_{вых}$ становится равным массовому расходу газа $G1$ на входе в регулятор. Давление $P^*_{вых}$ значительно ниже давления газа, входящего в регулятор (в связи с потерями давления на каждом из узлов регулятора). Понижается и объемный расхода газа $Q_{вых}$ по сравнению с $Q1$.

Разработанная структурная схема квазиизотермического процесса дросселирования газа позволяет:

- определять температурные связи между элементами конструкции КВРД;
- рассчитывать закономерности между термодинамическими процессами, протекающими в элементах конструкции КВРД;
- определять взаимосвязи каналов регулирования и параметры элементов процесса квазиизотермического дросселирования;
- рассчитать в одномерных дифференциально-алгебраических уравнениях геометрию всего тракта КВРД;
- разработать математическую модель в одномерном представлении, которая будет заложена в твердотельную модель КВРД;
- выработать допущения и определить граничные условия математической модели КВРД.

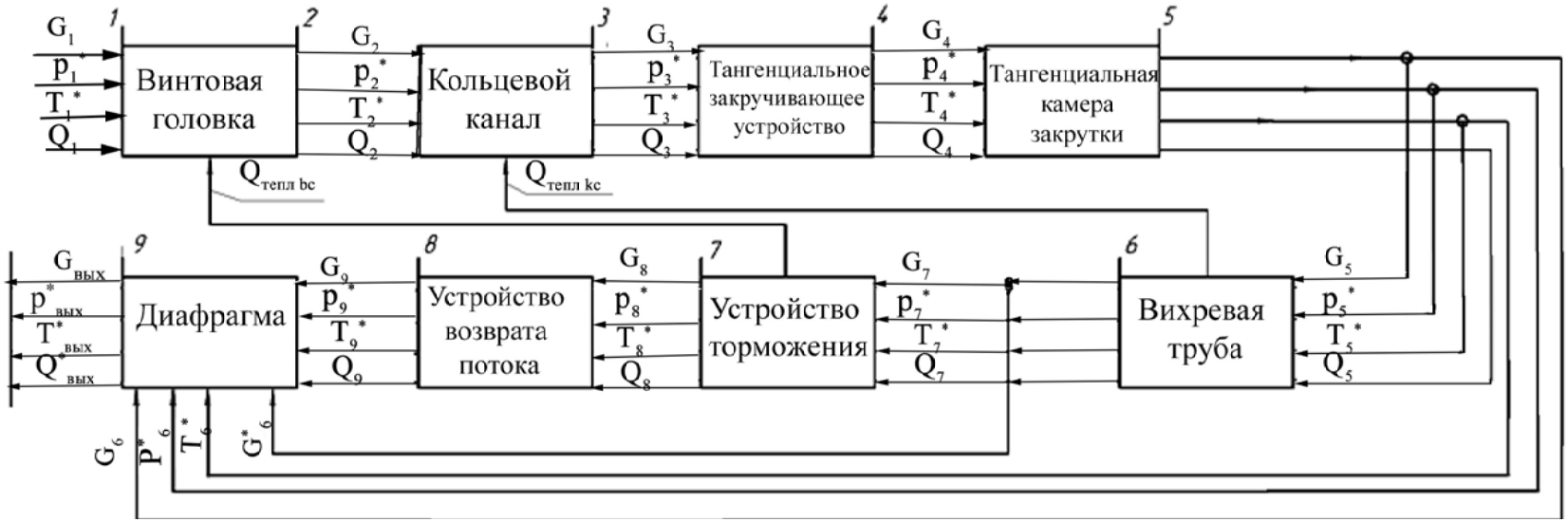


Рис. 6. Структурная схема устройства квазиизотермического дросселирования давления газа на основе вихревой трубы:

G_1 – расход газа на входе в регулятор; P^*_1 – полное давление газа на входе в регулятор; T^*_1 – полная температура газа на входе в регулятор; G_2 – расход газа после прохождения им винтовой головки; P^*_2 – полное давление газа после винтовой головки; T^*_2 – полная температура газа после винтовой головки; G_3 – расход газа после прохождения им кольцевого канала; P^*_3 – полное давление газа на входе в закручивающее устройство; T^*_3 – полная температура газа на входе в закручивающее устройство; G_4 – расход газа через сопловой ввод в закручивающее устройство; P^*_4 – полное давление газа в сопловом вводе в закручивающее устройство; T^*_4 – полная температура газа в сопловом вводе в закручивающее устройство; G_5 – расход газа в вихревую трубу; P^*_5 – полное давление газа на входе в вихревую трубу; T^*_5 – полная температура газа на входе в вихревую трубу; G_6 – расход газа из камеры закрутки в диафрагму; P^*_6 – полное давление газа на входе в диафрагму; T^*_6 – полная температура газа на входе в диафрагму; G'_6 – расход газа из вихревой трубы в диафрагму; G_7 (G_8) – расход газа через устройство торможения; P^*_7 – полное давление газа на входе в устройство торможения; T^*_7 – полная температура газа на входе в устройство торможения; $Q_{\text{тепл Iос}}$ – тепловой поток положительной обратной связи первого уровня; $Q_{\text{тепл IIос}}$ – тепловой поток положительной обратной связи второго уровня; P^*_8 – полное давление газа на выходе из устройства торможения; T^*_8 – полная температура газа на выходе из устройства торможения; G_9 – расход газа через устройство возврата потока; P^*_9 – полное давление газа на выходе из устройства возврата потока; T^*_9 – полная температура газа на выходе из устройства возврата потока; $G_{\text{вых}}$ – расход газа на выходе из регулятора; $P^*_{\text{вых}}$ – полное давление газа на выходе из регулятора; $T^*_{\text{вых}}$ – полная температура газа на выходе из регулятора

ЛИТЕРАТУРА

1. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Юрьев В. Л. и др. Разработка, изготовление и поставка опытного образца изотермического регулятора давления для редуцирования на ГРС без подогрева газа / А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. Л. Юрьев, А. Ф. Набиуллин, В. А. Ломоносов, Р. Р. Усманов, Р. Ю. Дистанов // Технический отчет по договору № 489 от 16.07.02г. (I, II этап) / ОАО «НИИТ». – Уфа, 2002.

2. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Юрьев В. Л., Целищев В. А. и др. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. Л. Юрьев, В. А. Целищев, А. А. Соловьев, П. М. Кармацкий, С. В. Гурин, Р. Ю. Дистанов // Наука – производству. 45 лет на пути технического прогресса: Ежегодный научно-техн. сб. под общ. ред. В. Л. Юрьева. Уфа, 2003. – С.18 – 28.

3. Русак А. М. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева. Сб. нуч. тр. IV Междунар. совещ. по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте / А. М. Русак, В. А. Целищев, В. Л. Юрьев, П. М. Кармацкий, Ю. М. Ахметов, С. В. Гурин, А. А. Соловьев, Р. Ю. Дистанов // М.: ИМАШ РАН, 2004. С. 133–144.

4. Соловьев А. А., Пархимович А. Ю. Качественный анализ системы регулирования давления магистрального газа / «Вестник УГАТУ», Т8 №1(17) – Уфа, 2006. – С. 7–12.

5. Пархимович А. Ю., Соловьев А. А. Исследование экспериментальных характеристик вихревого регулятора / Вестник УГАТУ. – 2006. Т18 №1(17).

6. Соловьев А. А. Исследование возможности получения изотермического процесса при дросселировании в вихревом регуляторе давления газа / А. А. Соловьев, С. В. Гурин // «Вестник УГАТУ», том 8, №1 – Уфа, 2006. – С. 3 – 6.

7. Ахметов Ю. М., Бакиров Ф. Г., Гурин С. В. и др. Опыт реализации квазиизотермического редуцирования в вихревых регуляторах давления энергетических систем / Ф. Г. Бакиров, Ю. М. Ахметов, А. А. Соловьев, С. В. Гурин, А. Ю. Пархимович // Вестник УГАТУ. 2007. Т9. № 6 (24). С. 3–6.

8. Ахметов Ю. М., Пархимович А. Ю., Свистунов А. В. Численное моделирование процессов стратификации в изотермическом вихревом регуляторе с внутренним смешением / Вестник УГАТУ. – 2010. Т.10, №14(37).

9. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике.– М.: Машиностроение, 1969. – 183 с.

10. Мухутдинов Р. Х., Амиров Р. Я., Альмеев Л. Э., Ханнанов М. М. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Под общей редакцией Я. С. Амирова. – Уфа: Изд-во «Реактив», 2001. – 347 с.

11. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш.А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под ред. А. И. Леонтьева. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.

12. Патент 2237918 РФ, МПК G05D16/00. Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты) / М. З. Асадуллин, Ю. М. Ахметов, Р. Ю. Дистанов, В. А Ломоносов, А. Ф. Набиуллин, В. Г. Поликарпов, А. М Русак, Р. Р. Усманов, В. Л. Юрьев (РФ). – 2003114801/28; Заявлено 19.05.2003; Опубл. 10.10.2004. Бюл.28.(НИИТ).

УДК 621.6

Ю. М. Ахметов, Э. И. Зангиров,
А. В. Свистунов, А. А. Чиндина (УГАТУ)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСТРОЙСТВАХ ТОРМОЖЕНИЯ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

Транспортировка природного газа в России осуществляется в основном по газопроводам высокого и среднего давлений. Редуцирование давления газа до потребительского уровня сопровождается снижением температуры (при давлениях магистральных трубопроводов до 7,5 МПа потребителю поступает $3 \cdot 10^{-3}$ МПа, что вызывает снижение температуры не менее чем на 25 градусов), обморожением трубопроводов, кристаллизацией тяжелых углеводородов и несанкционированной влаги, попавшей в трубопровод в результате нарушения технологии транспортировки. Побочные явления редуцирования негативно сказываются на эффективности и безопасности системы транспортировки природного газа и требуют комплексного подхода к решению поставленной задачи.

Вихревой эффект, или эффект Ранка, проявляется в закрученном потоке газа и реализуется в устройстве, называемом вихревой трубой (трубой Ранка-Хилша, вихревым энергоразделителем, вихревым холодильником) [1].

Большое число экспериментальных исследований проведено для выявления рациональных геометрических соотношений и конструкционных исполнений вихревых труб. Цель некоторых работ [1, 2, 3] состояла в поиске методов воздействия на процессы в камере энергоразделения, отличающихся от методов, изложенных в работах Ж. Ранка.

Одно из первых предложений, направленных на повышение эффективности энергоразделения вихревой трубы (ВТ), сделал А. П. Меркулов в середине 50-х годов. Оно заключается в торможении вихревого потока на горячем выходе вихревой трубы, которое, по гипотезе А. П. Меркулова, создает благоприятные условия для формирования приосевого потока, направленного к диафрагме и, следовательно, позволяет уменьшить длину камеры энергоразделения. Этот способ повышения эффективности реализован в конструкции, показанной на рис. 1.

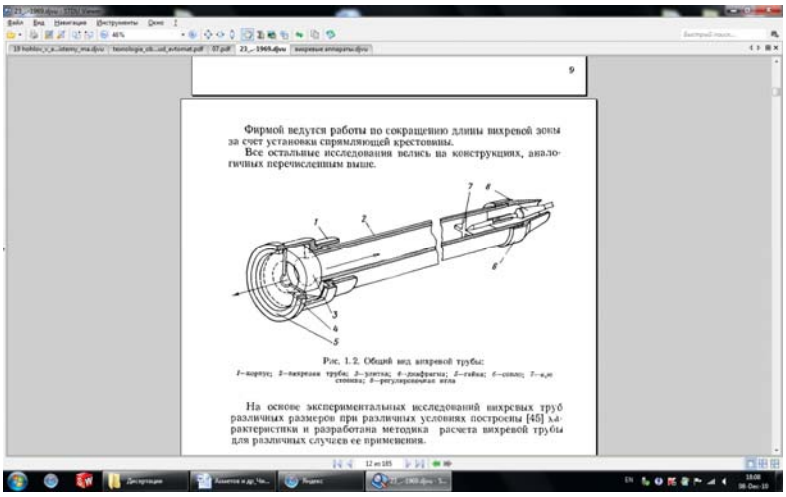


Рис. 1. Общий вид вихревой трубы: 1 – корпус; 2 – вихревая труба; 3 – улитка; 4 – диафрагма; 5 – гайка; 6 – сопло; 7 – крестовина; 8 – регулировочная игла [1]

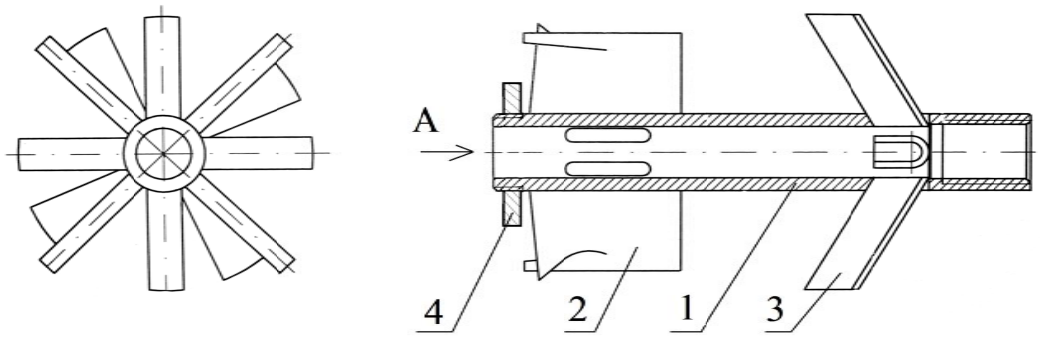


Рис. 2. Крестовина с устройством возврата потока: 1 – трубка возврата потока; 2 – лопасти; 3 – возвратные лопасти; 4 – отражательный диск [1]

Испытания вихревой трубы на экспериментальном стенде УГАТУ подтвердили, что условия температурного разделения потоков зависят от конструкции крестовины. Использование базовой крестовины с отражательным диском (рис. 2) диаметром порядка половины диаметра вихревой трубы ($d_{од}$=20 мм, $d_{ВТ}$=42 мм) приводит к повышению температуры горячего потока на режиме $\mu=G_{вх}/G_{хол}=1$ ($G_{вх}$ – расход газа на входе в ВТ, $G_{хол}$ – расход газа через холодный выход ВТ) с 75..80°С до 125..130°С. Повышение температуры по отношению к «классическому» варианту (четырех лопастная крестовина) наблюдается до значений $\mu\approx0{,}7$, затем данные измерений практически совпадают.

В работах А. П. Меркулова, А. Д. Суслова, Ш. А. Пиралишвили и других авторов [1, 2, 3, 4, 5] рассматривается схема работы вихревой трубы с возвратом горячего потока, отобранного с периферии горячего выхода, в осевую зону ВТ. При этом горячий поток охлаждается в теплообменнике, и его подача в зону повышенных температур приводит к увеличению холодильного

эффекта (как указывалось выше, большинство работ посвящено изучению вихревой трубы как устройства охлаждения). Авторами данных исследований это объясняется существенным снижением общего уровня температур в вихревой зоне, что и приводит к уменьшению выходной температуры холодного потока (увеличению хладопроизводительности).

На основании такого вывода было сделано заключение, что возврат неохлажденного горячего потока в осевую зону вихревой трубы позволит повысить температуру холодного потока. Для проверки данного предположения УГАТУ совместно с ОАО НИИТ была разработана конструкция крестовины с возвратом горячего потока с периферии горячей зоны вихревой трубы в приосевую область с наиболее низкой температурой (конструкция данной крестовины показана на рис. 2) [1, 2, 4, 5, 7, 11, 16].

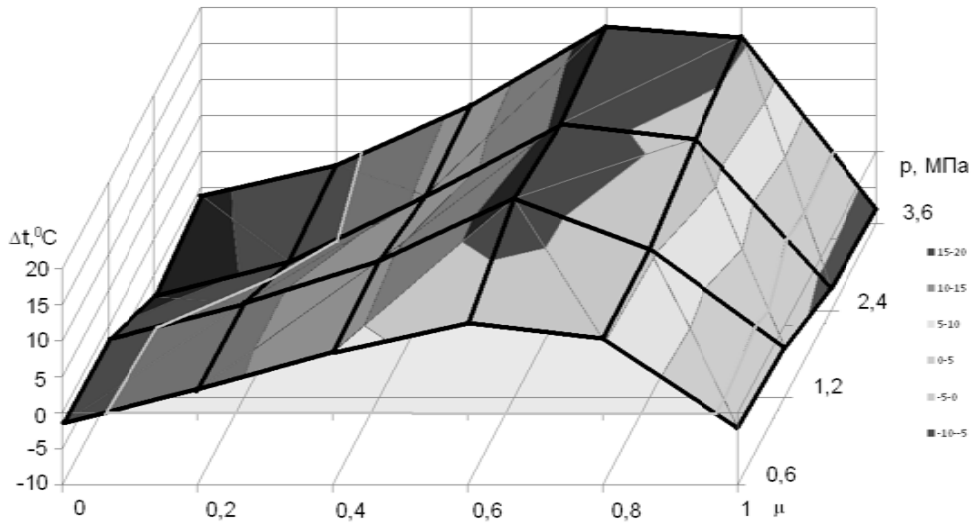


Рис. 3. Характеристики зависимости величины избыточной температуры смешения холодного и горячего потоков газа от доли охлажденного потока

На основе экспериментальных данных [14] можно построить характеристики зависимости величины перепада температур на входе и смешанном потоке, полученном от нагретого и охлажденного газа от доли охлажденного потока газа (рис. 3). Нулевая плоскость отделяет отрицательную и положительную области перепада температур при дросселировании, что подтверждает возможность квазиизотермического дросселирования давления.

Численное моделирование течения газа производилось в пакете прикладных программ *SolidWorks Cosmos FlowWorks*. Моделировалось течение газа в твердотельной модели изотермического вихревого регулятора давления (ИВРД) газа (рис. 4) с учетом теплообмена в металле [13].

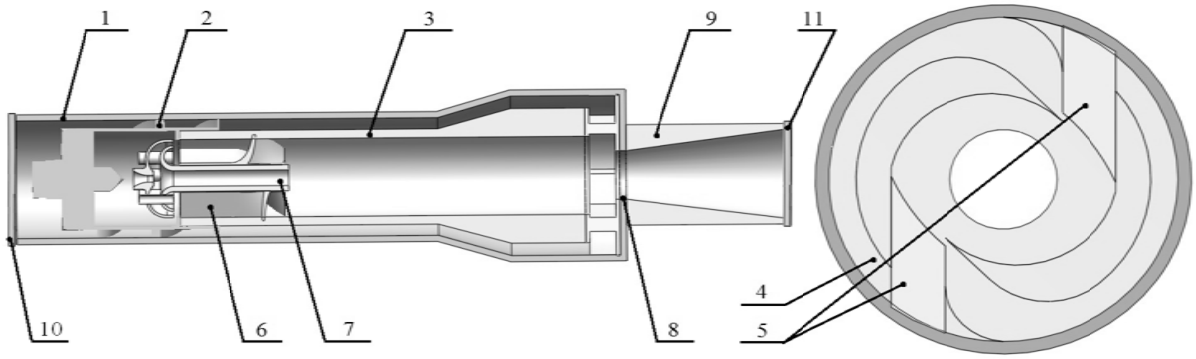


Рис. 4. Твердотельная модель: 1 – наружная труба; 2 – винтовая головка; 3 – камера энергоразделения (вихревая труба); 4 – закручивающее устройство; 5 – регулирующие клинья; 6 – устройство торможения; 7 – устройство поворота потока газа; 8 – диафрагма; 9 – диффузор; 10 – заглушка на входе; 11 – заглушка на выходе

Визуализация течения с помощью линий тока спроецированных на плоскость симметрии камеры энергоразделения (рис. 5–7) показывает наличие замкнутых циркуляционных зон между центральным и периферийным потоками.

Рис. 5. Проекция линий тока на плоскость симметрии камеры энергоразделения без устройства поворота

От конфигурации проточной части зависит возникновение существенных отличий в структуре потока. Так, из результатов численного моделирования видно, что структура, возникающая при отсутствии устройств, препятствующих разрушению вихрей, состоит из вихревого жгута, расположенного на протяжении всей внутренней стенки вихревой трубы. Это обеспечивает повышение температуры потока в зоне винтовой головки, что негативно сказывается на параметрах смешанного потока.

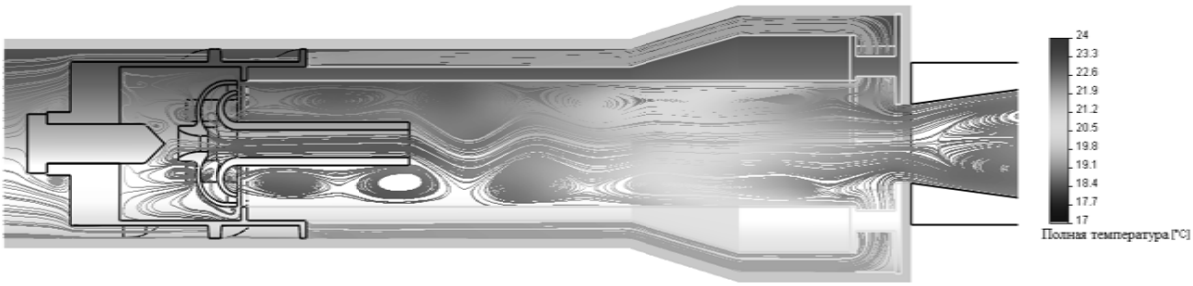


Рис. 6. Проекция линий тока на плоскость симметрии камеры энергоразделения без крестовины

Установка устройства возврата потока частично дезорганизовывает образование вихревого жгута, объем которого увеличивается, а длина уменьшается. За счет этого, температура

потока в зоне винтовой головки существенно отличается от температуры потока в случае свободной проточной части, и влияет на подогрев потока на выходе.

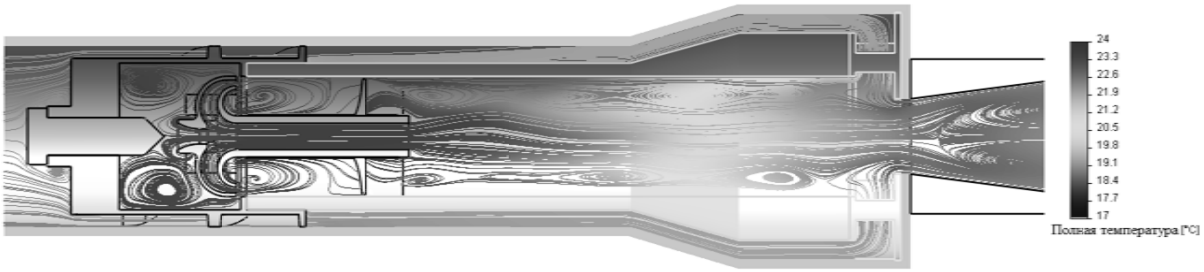


Рис. 7. Проекция линий тока на плоскость симметрии камеры энергоразделения с крестовиной

Установка лопастей в устройстве возврата потока вызывает практически полное разрушение структуры вихревого жгута, что значительно сокращает его длину и повышает температуру потока на выходе из регулятора.

Для оценки величины изменения температуры, в результате снижения давления на изотермическом вихревом регуляторе давления газа было выполнено осреднение результатов численного моделирования и определение среднемассовой температуры. Решая уравнение баланса $\sum G_i \cdot t_i = G_\Sigma \cdot t_\Sigma$ относительно среднемассовой температуры получаем:

$$t_\Sigma = \frac{\Sigma G_i \cdot t_i}{G_\Sigma},$$

где G_i – расход через проходное сечение с одинаковой скоростью [м^3/с];

t_i – локальная температура [ºС];

G_{Σ} – расход через регулятор [м^3/с];

t_{Σ} – среднемассовая температура [ºС].

Среднемассовая температура потока газа на выходе из диффузора повышается при установке внутри камеры энергоразделения устройства возврата потока газа с 20,8°С до 21,2°С, а при установке крестовины до 21,7°С, соответственно, перепад температуры составляет 1,8°С, 2,2°С, 2,7°С.

Температура потока, попавшего в межлопаточное пространство устройства торможения, подогревает как стенки лопаток, так и внутренние стенки камеры энергоразделения и винтовой головки (рис. 8) [8].

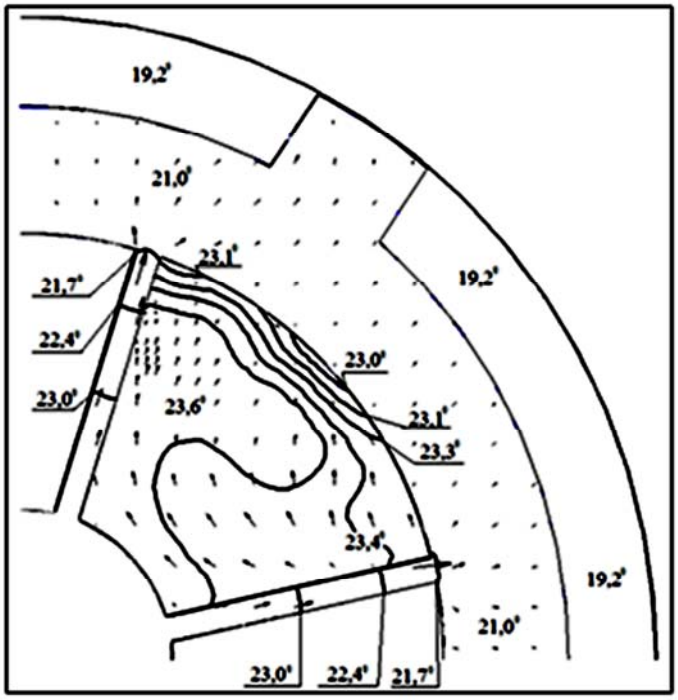


Рис. 8. Изолинии в области межлопаточного пространства в газе и в стенке

В работе [15] рассматривался возможный механизм внутренней рекомбинации тепловых потоков при стратификации и перемешивании в изотермическом вихревом регуляторе давления.

В продолжении можно заметить, что на величину перепада температур значительно влияет материал изготовления. Коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{ст}$ = 52 Вт/(м*С), алюминия $\lambda_{ал}$ = 230 Вт/(м*С), меди $\lambda_{м}$ = 390 Вт/(м*С). Соответственно, чем больше коэффициент теплопроводности, тем больше перепад температур на поверхности стенки винтовой головки (рис. 9), также увеличивается перепад температур на выходе из регулятора (рис. 10).

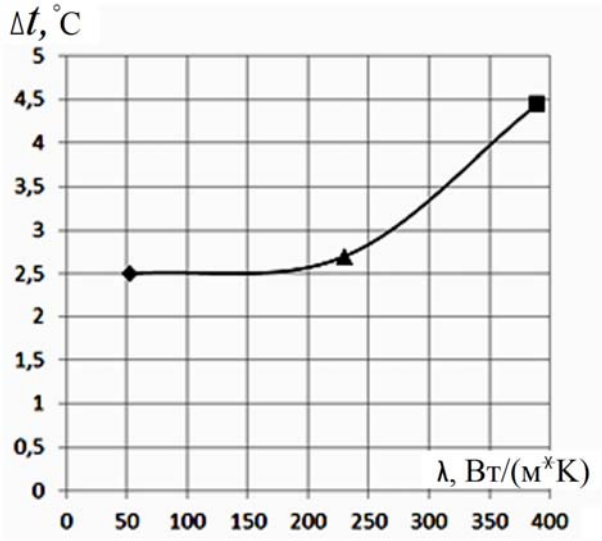


Рис. 9. Перепад температур на поверхностях стенки в зависимости от коэффициента теплопроводности

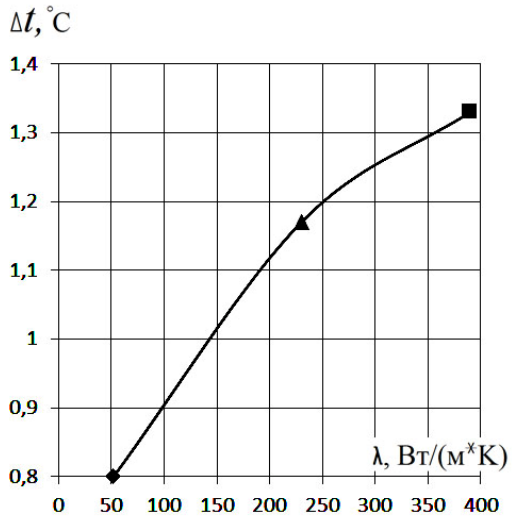


Рис. 10. Перепад температур на выходе из регулятора в зависимости от коэффициента теплопроводности

По результатам численного моделирования выявлено наличие крупной вихревой структуры в области поворота потока газа в камере энергоразделения. Разрушение данной вихревой структуры обеспечивается установкой тормозного устройства в камеру

энергоразделения, что позволяет повысить температуру смешанного потока в 1,5 раза.

Также на температуру смешанного потока оказывает влияние наличие теплопереноса из области поворота потока газа в камере энергоразделения, что подтверждено в данной работе анализом влияния теплопроводности разделяющих элементов (сталь, алюминий, медь). Применение материалов с высоким коэффициентом теплопроводности позволяет повысить температуру смешанного потока в 1,7 раз.

ВЫВОДЫ

Возможность квазиизотермического дросселирования давления подтверждается использованием устройств на основе вихревых труб.

Разрушение крупной вихревой структуры в области поворота потока газа в камере энергоразделения за счет установки тормозного устройства позволяет повысить температуру смешанного потока в 1,5 раза.

Усиление обратной связи от внутреннего потока газа через лопатки тормозного устройства в наружный поток, за счет выбора материала с большим коэффициентом теплопроводности, позволяет повысить температуру смешанного потока в 1,7 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике.– М.: Машиностроение, 1969. – 183 с.

2. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев под ред. А. И. Леонтьева. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.

3. Райский Ю. Д., Тункель Л. Е. Применение вихревых труб в схемах подготовки природного газа. – М.: ВНИИЭГаз, 1974. – 56с.

4. Мартынов А. В., Бродянский В. М. Что такое вихревая труба? – М.: Энергия, 1976. – 153с.

5. Вихревые аппараты / А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – М.: Машиностроение, 1985. –256 с.

6. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Юрьев В. Л. и др. Разработка, изготовление и поставка опытного образца изотермического регулятора давления для редуцирования на ГРС без подогрева газа / А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. Л. Юрьев, А. Ф. Набиуллин, В. А. Ломоносов, Р. Р. Усманов, Р. Ю. Дистанов // Технический отчет по договору № 489 от 16.07.02г. (I, II этап) / ОАО «НИИТ». – Уфа, 2002.

7. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Юрьев В. Л., Целищев В. А. и др. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. Л. Юрьев, В. А. Целищев, А. А. Соловьев, П. М. Кармацкий, С. В. Гурин, Р. Ю. Дистанов // Наука – производству. 45 лет на пути технического прогресса: Ежегодный научно-техн. сб. под общ. ред. В. Л. Юрьева. – Уфа, 2003. – С.18 – 28.

8. Пат. 2237918 РФ, МПК G05D16/00. Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты) / Асадуллин М. З., Ахметов Ю. М., Дистанов Р. Ю., Ломоносов В. А., Набиуллин А. Ф., Поликарпов В. Г., Русак А. М., Усманов Р. Р., Юрьев В. Л. (РФ). – 2003114801/28; Заявлено 19.05.2003; Опубл. 10.10.2004. Бюл.28.(НИИТ)

9. Соловьев А. А., Пархимович А. Ю. Качественный анализ системы регулирования давления магистрального газа / «Вестник УГАТУ», Т8 №1(17) – Уфа, 2006. – С.7–12.

10. Пархимович А. Ю., Соловьев А. А. Исследование экспериментальных характеристик вихревого регулятора / Вестник УГАТУ. – 2006. Т18 №1(17).

11. *Ахметов Ю. М., Бакиров Ф. Г., Гурин С. В. и др.* Опыт реализации квазиизотермического редуцирования в вихревых регуляторах давления энергетических систем / Ф. Г. Бакиров, Ю. М. Ахметов, А. А. Соловьев, С. В. Гурин, А. Ю. Пархимович // Вестник УГАТУ. 2007. Т9. № 6 (24). С. 3–6.

12. Ахметов Ю. М., Пархимович А. Ю., Свистунов А. В. Численное моделирование процессов стратификации в изотермическом вихревом регуляторе с внутренним смешением / Вестник УГАТУ. – 2010. Т.10, №14(37).

13. Ахметов Ю. М., Целищев В. А., Чиндина А. А. и др. Исследование влияния тормозного устройства на структуру потока и параметры изотермического вихревого регулятора давления / Ю. М. Ахметов, А. Ю. Пархимович, А. В. Свистунов, А. А. Соловьев, В. А. Целищев, А. А. Чиндина // «Вестник УГАТУ», 2011 Т15 № 4 (44), стр. (149-153), УГАТУ, – Уфа, 2011г.

14. Мухутдинов Р. Х., Амиров Р.Я., Альмеев Л. Э., Ханнанов М. М. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / под общей редакцией Я. С. Амирова. – Уфа: «Реактив», 2001. – 347 с.

15. Чиндина А. А., Свистунов А. В. Описание возможного механизма внутренней рекомбинации тепловых потоков при стратификации и перемешивании в изотермическом вихревом регуляторе давления / Сб. докладов Всероссийской научно-техн. конф. «Динамика машин и рабочих процессов» Челябинск: ЮУрГУ, 2012. С 201–204.

16. Ахметов Ю. М., Целищев В. А., Чиндина А. А. и др. Исследование и применение вихревых технологий на кафедре ПГМ УГАТУ /А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, А. Ю. Пархимович, А. В. Свистунов, А. А. Соловьев,

В. А. Целищев, А. А. Чиндина // Научный журнал «Вестник УГАТУ» – Уфа: УГАТУ, 2012. Т16. № 2 (47), стр. (151–162).

УДК 621.6

Ю. М. Ахметов, Р. Р. Калимуллин,
Е. А. Глухов, М. В. Мухаметов (УГАТУ)

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ПО ЗАМКНУТОМУ ЦИКЛУ

При поиске альтернатив традиционным углеводородным топливам, наиболее приемлемым был бы вариант возобновляемых источников энергии, наличие которых не привязано ко времени и местоположению, как в случае с энергией ветра или приливов. Также, одним из критериев новых источников энергии является экологичность. Под эти требования подходит водород, содержащийся в воде.

Одним из методов получения водорода является электролитическое разложение воды, при этом для снижения энергетических затрат часто используют дополнительный термический нагрев (вплоть до образования пара). Устройством, позволяющим реализовать данные процессы, является электрогидродинамический преобразователь (ЭГДП) жидкости.

Источником тепловой энергии в ЭГДП является электрическая дуга. Рабочая жидкость хранится в пористом наполнителе бака. Тепловая энергия от дуги передается через испаритель рабочей

жидкости и испаряет её. Далее пар подается между электродами и проходит через электрическую дугу, при этом происходит диссоциация пара. Проходя через зону электрической дуги, пар смещает ее по внутренней поверхности сопла, вытягивая дугу наружу и замыкая ее на внешнюю кромку сопла. В выходном отверстии пар воздействует на дугу и центрирует ее, не позволяя дуге замкнуться на боковые стенки выходного отверстия. Истекающие газы, протекая через сопло, охлаждают его.

Для измерения температурного поля истекающих газов применялись хромель-копелевые термопары.

Описание системы измерений температурного поля пара приведено в [1].

Проведена серия экспериментов с изменением межэлектродного зазора (рис. 1), получены зависимости расхода рабочей жидкости, потребляемой мощности и распределения температурного поля истекающих газов. Гребенка термопар, расположенных на равных промежутках в радиальном направлении от оси сопла ЭГДП, устанавливалась на расстоянии от 60 до 180 мм от среза сопла.

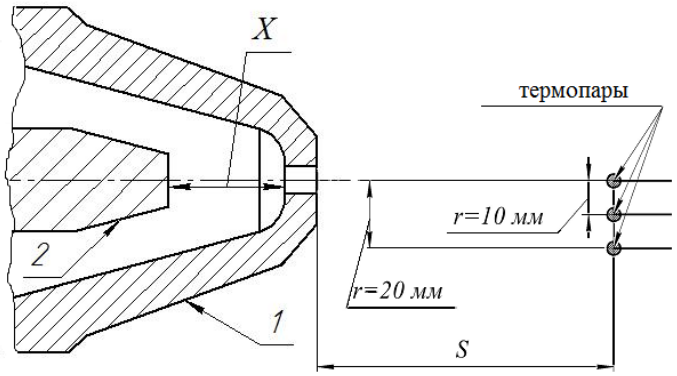


Рис. 1. Схема стенда: 1 – сопло-катод; 2 – анод; *X* – межэлектродный зазор; |*r* – расстояние от оси сопла до термопары; *S* – расстояние от сопла до термопар

На рис. 2 показано распределение температуры истекающих газов при межэлектродных осевых зазорах 6, 7, 8 и 9 мм.

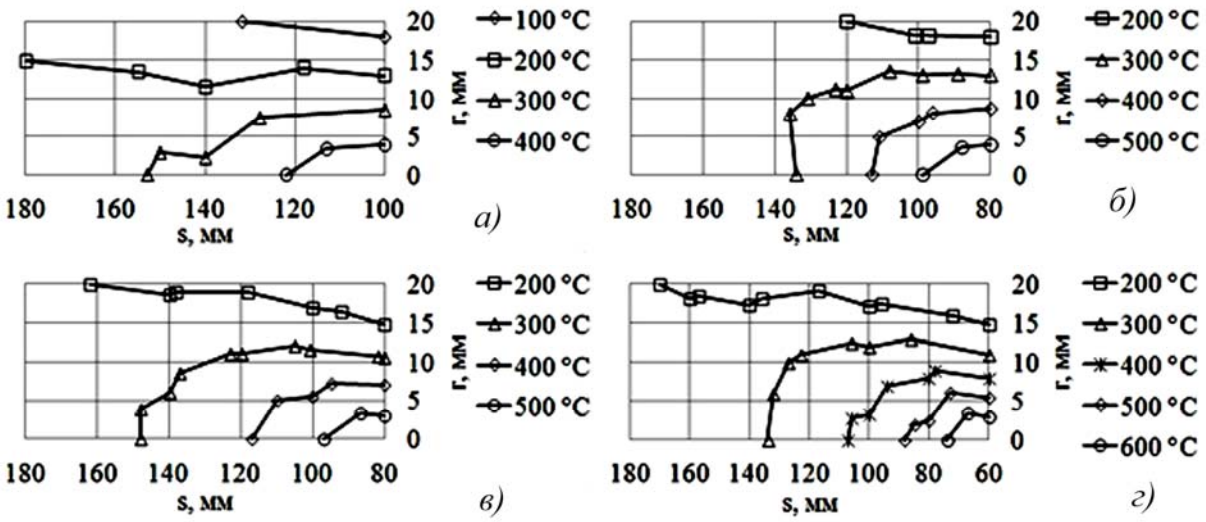


Рис. 2. Температура истекающих газов на различном расстоянии от сопла и оси сопла: *r* – расстояние от оси сопла до термопары; *s* – расстояние от сопла до гребенки термопар; *а* – межэлектродный зазор 6 мм; *б* – межэлектродный зазор 7 мм; *в* – межэлектродный зазор 8 мм; *г* – межэлектродный зазор 9 мм

При работе устройства продуктами горения могут быть частицы электродов, а также водород, выделяющийся из пара при диссоциации последнего [2].

Устройства, реализующие процесс электролитического разложения, аналогичны плазмотронам, в которых через электрическую дугу протекает плазмообразующий газ. Различные схемы плазматронов представлены на рис. 3 и рис. 4 [3].

При последовательном воздействии на рабочую жидкость кавитации, нагрева до состояния кипения, и далее, до перегретого пара, организации его прохождения через высокотемпературный разрядный промежуток с ионообразованием возможна реализация реакции с выделением значительного количества тепла [4].

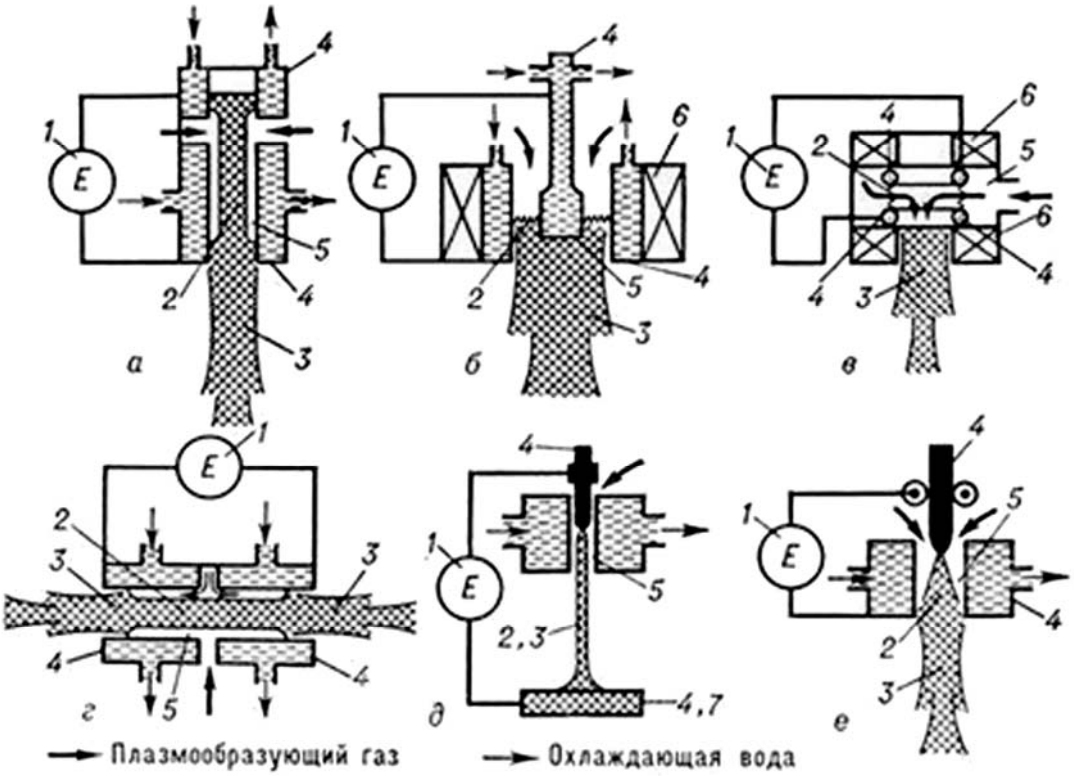


Рис. 3. Схема дуговых плазматронов: *а* – осевой; *б* – коаксиальный; *в* – с тороидальными электродами; *г* – двустороннего истечения; *д* – с внешней плазменной дугой; *е* – с расходуемыми электродами (эрозионный); 1 – источник электропитания; 2 – разряд; 3 – плазменная струя; 4 – электрод; 5 – разрядная камера; 6 – соленоид; 7 – обрабатываемое тело

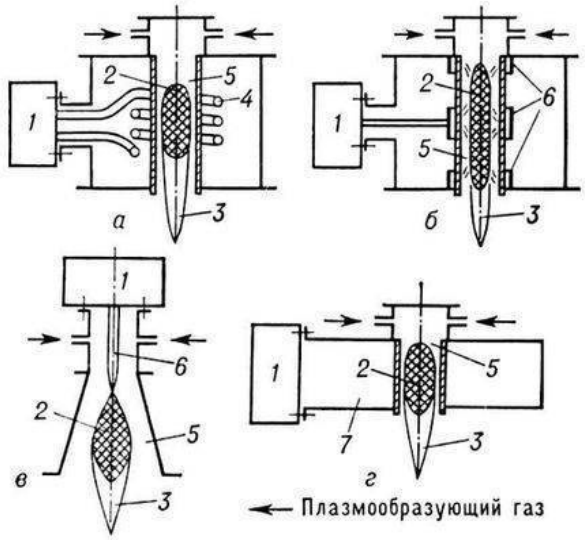


Рис. 4. Схемы высокочастотных плазматронов [3]: *а* – индукционный; *б* – ёмкостный; *в* – факельный; *г* – сверхвысокочастотный; 1 – источник электропитания; 2 – разряд; 3 – плазменная струя; 4 – индуктор; 5 – разрядная камера; 6 – электрод; 7 – волновод

Полученная тепловая энергия может быть использована для предварительного нагрева воды на начальных этапах процесса. Важную роль в подготовке рабочей жидкости (воды или водосодержащих жидкостей) играет использование вихревых теплогенераторов [5], которые могут выполняться с управлением по расходу и напору жидкости, что и обеспечит управление всем замкнутым циклом. Возможность использования вихревых теплогенераторов в подготовке рабочей жидкости представлена в научных трудах [6, 7, 8, 9].

Рис. 5. Цикл термохимического преобразования

При реализации данной схемы (рис. 5) возможно получение высокотемпературной струи газов, которая может применяться для специальных технологий с реализацией тепловой энергии высокотемпературных плазменных потоков (сварка, резка металлов, плавление тугоплавких материалов и др.) и как энергоноситель с преобразованием различных видов энергий в потребительские виды (электрическую, механическую, тепловую и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухаметов М. В., Новиков М. В. Определение температурного поля истекающих газов и электрических характеристик электрогидродинамического преобразователя жидкости. Сборник научных трудов VII Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых "Актуальные проблемы науки и техники", Том 2/УГАТУ, - Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 187–190.
2. Сердюков В. И., Поплавский Ю. А., Синица Л. Н. Исследование спектров излучения водяного пара в диапазоне 9600–12000 см$^{-1}$. Оптика и спектроскопия. 2006, т.101, №4.
3. Плазматрон.–URL: *http://slovari.yandex.ru/~книги/БСЭ /Плазматрон/* (дата обращения 20.06.2012)
4. Научно-технический отчет о выполнении 3 этапа Государственного контракта № П1502 от 03 сентября 2009 г. и Дополнению от 05 апреля 2010 г. № 1/П1502, Дополнению от 28 июля 2010 г. № 2.
5. Потапов Ю. С. Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиции теории движения. – Кишенев – Черкассы: Око-плюс, 2000. – 387 с.
6. Ахметов Ю. М., Калимуллин Р. Р., Целищев В. А. Численное и физическое моделирование течения жидкости в вихревом теплогенераторе. – Научный журнал «Вестник УГАТУ» – Уфа: УГАТУ, 2010. Том 14, №4(39). – С. 42–49.
7. Ахметов Ю. М., Калимуллин Р. Р., Хакимов Р.Ф., Целищев В. А. Экспериментальные исследования вихревого течения жидкости в теплогенераторе. – научный журнал «Вестник УГАТУ» – Уфа: УГАТУ, 2011, том 15, № 4 (44). – С. 169–174.
8. 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.– Научный журнал «Вестник УГАТУ» – Уфа: УГАТУ, 2012. Том 16, №2(47). – С. 163-168.

9. Калимуллин Р. Р., Свистунов А. В., Хакимов Р.Ф. Физическое моделирование процессов течения многофазных жидкостей в вихревых теплогенераторах. – Научный журнал «Вестник УГАТУ» – Уфа: УГАТУ, 2012. Том 16, №2(47). – С. 189-192.

УДК 536.42

К. А. Кярамян (ФГУП «НПЦ «Салют»),
*А. М. Лыков (*ФГБ ОУ ВПО «МГУИЭ»)

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА АЛЮМОТЕРМИТНОЙ СВАРКИ РЕЛЬСОВ

Введение

В настоящее время способ алюмотермитной сварки используется в различных областях техники. Наибольшее распространение эта технология получила при сварке рельсов, стрелочных переводов и, в первую очередь, железнодорожных. Она широко применяется на сети Российских железных дорог и за рубежом. Основными лидерами в этой технологии является российские, немецкие и французские компании.

На качество сварного шва по этой технологии влияет много факторов (качество исходной шихты – алюмотермита, тиглей, литьевых форм, а также технологические параметры процесса). Одним из значимых параметров, который влияет на структуру и соответственно на физико-механические характеристики и эксплуатационные показатели сварного шва и околошовной зоны,

являются термические условия (температура, скорость закалки), которые реагируются в процессе плавления, кристаллизации и остывания системы шов-рельс.

Температура металла, который заливается в шов, варьируется в различных технологиях за счет: изменения массы алюмотермитной смеси; добавления в исходную шихту металла, например, в виде гвоздевой обсечки. Кроме того, на термические условия проведения процесса оказывают влияние режимы предварительного прогрева свариваемых торцов рельсов (интенсивность нагрева, продолжительность, уровень температур прогрева).

Расчет термических условий процесса

В настоящей работе проведен анализ влияния температуры металла, заливаемого в шов, и степени предварительного прогрева торцев свариваемых рельсов. Процесс сварки можно схематично представить как заливку в шов металла с температурой T_0, которая выше температуры плавления $T_{пл}$ =1536°С, оплавление торцов рельсов, остывание и кристаллизацию сварного шва, остывание сварного шва и рельса.

Рассматриваемая, система шов-рельс, литьевая форма является достаточно сложной при решении задачи теплообмена в трехмерной постановке.

С целью упрощения для получения предварительных результатов по технологическим параметрам в системе шов-рельс настоящий процесс рассматривался в одномерной постановке.

Между двумя рельсами заливается металл с начальной температурой T_0, после чего реализовывался вышеописанный процесс. Задача рассматривалась как осесимметричная. Ось симметрии (x=0) находится на равном удалении от торцов рельсов 12,0 мм (зазор между рельсами перед сварной составляет 24 мм). Предварительный подогрев торцов рельсов моделировался начальным распределением температуры в рельсе в виде $T(x)=T_n \cdot e^{-\kappa x}$. Коэффициент κ определяет степень предварительного прогрева рельса (до заливки металла в шов). Следует отметить, что такая зависимость хорошо согласуется с зависимостью для прогрева полупространства постоянным тепловым потоком [1].

Для расчета термических условий процесса до стадии кристаллизации использовались зависимости, полученные в работе [2]. После кристаллизации расплава в шве (температура металла менее 1536°C) расчет термических условий проводился с использованием зависимостей, полученных в [1], для остывания полупространства с начальным распределением температуры.

Следует отметить, что на протяжении всего процесса тепловой поток на оси симметрии (x=0) равен 0 вследствие осесимметричности задачи.

Зона термического влияния определялась как расстояние от оси симметрии, на котором температура в рельсе достигает температуры аустенитного превращения (720°C) для стали с содержанием углерода 0,8 %.

На рис. 1 представлено распределение температуры в рельсе при интенсивности предварительного прогрева κ=11,5, что соответствует

нагреву торцов рельсов до температуры плавления в течение 500 секунд (перед сваркой) и *к*= 35,9.

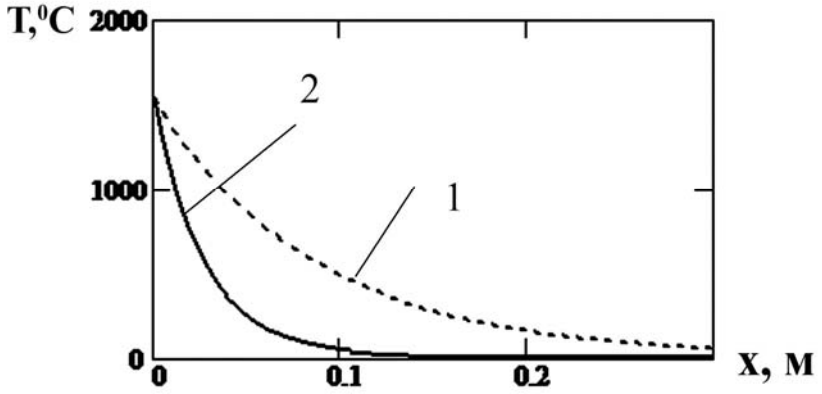


Рис. 1. Начальное распределение температуры в рельсе при различной интенсивности прогрева: 1 – к=11,5; 2 – к=35,9

На рис. 2 приведено распределение температуры по длине рельсов для *к*=11,5 при начальной температуре металла, заливаемого в шов, равной 2300°С.

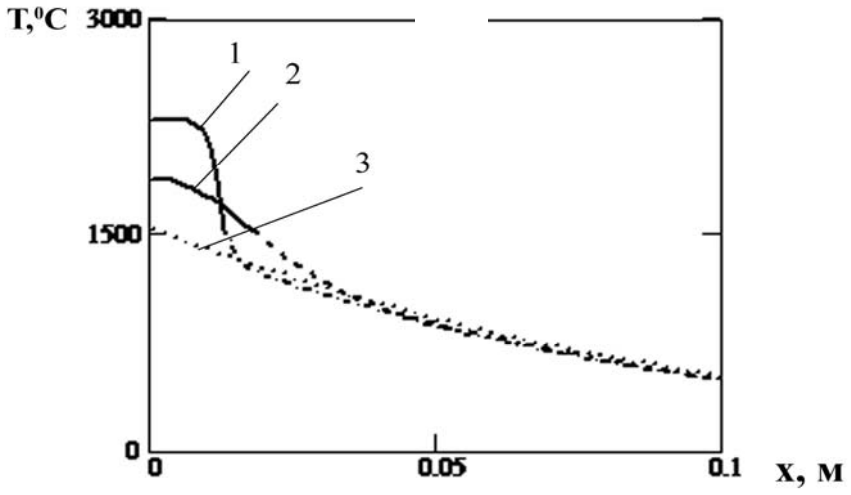


Рис. 2. Температура в расплаве (сплошные линии) и рельсе (прерывистые линии) в различные моменты времени от начала процесса (T_0=2300°С, к=11,5): 1 – 0,2; 2 – 10; 3 – 58 с

Движение фронта плавления во времени для данных параметров приведено на рис. 3, из которого видно, что торец рельса оплавляется на глубину 6 мм. Процесс кристаллизации заканчивается через 58с.

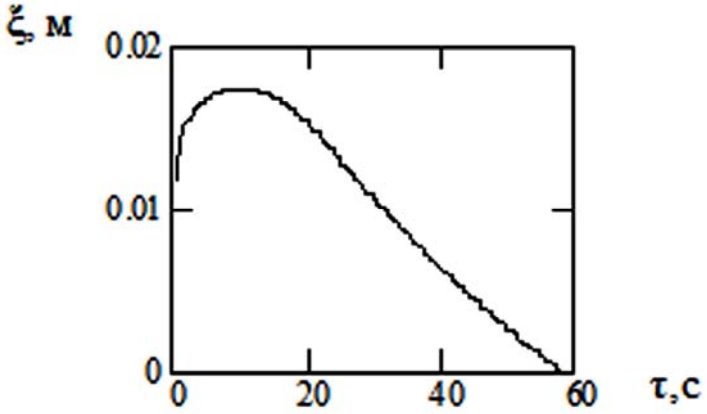


Рис. 3. Движение фронта плавления в зависимости от времени (T_0=2300°С, к=11,5)

Распределение температуры в шве и рельсе после кристаллизации расплава для различных моментов времени приведено на рис. 4. При этом зона термического влияния равна 80мм. При данных технологических параметрах процесса скорость закалки в диапазоне температур 300–800°С составляет 0,02–0,35 К/с (рис. 5).

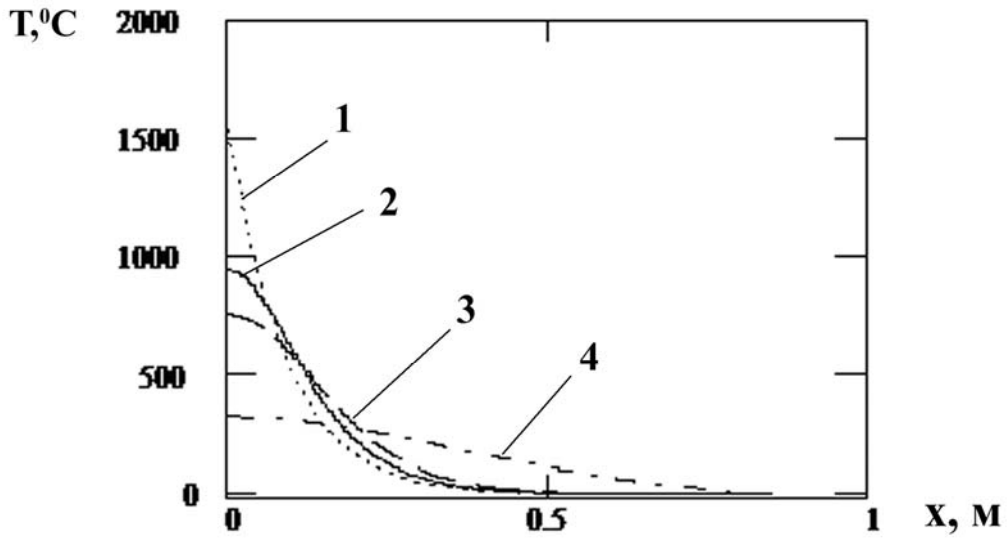


Рис. 4. Распределение температуры в шве и рельсе (после кристаллизации расплава) в различные моменты времени (T_0=2300°C, к=11,5): 1 – 0; 2 – 5,8; 3 – 13,3; 4 – 125 мин.

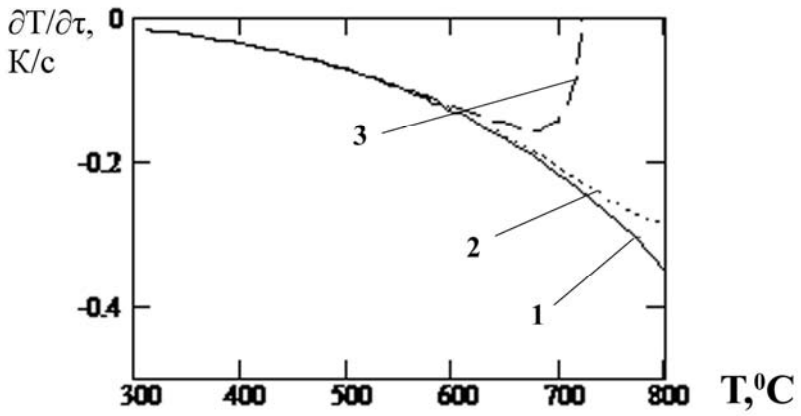


Рис. 5. Скорость закалки в шве и рельсе (после кристаллизации расплава) в зависимости от температуры на различном расстоянии от оси симметрии (T_0=2300°C, к=11,5): 1 – 1,0; 2 – 60; 3 – 80мм.

С уменьшением степени предварительного прогрева рельса (*к*=35,9) при температуре расплавленного металла 2800°С зона термического влияния уменьшается до 30 мм. Скорости закалки возрастают практически на порядок и составляют 0,2–2,0 К/с (рис. 6), что должно положительным образом влиять на сформированную

структуру металла в шве и рельсе с соответствующим увеличением твердости металла, а соответственно и сопротивлению его износу.

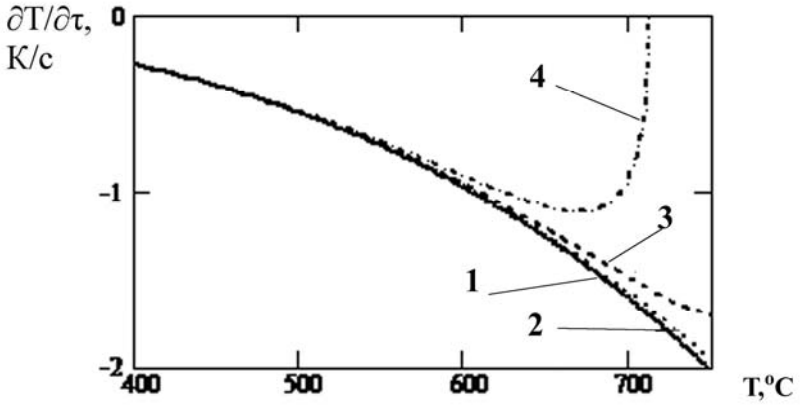


Рис. 6. Скорость закалки в шве и рельсе (после кристаллизации расплава) в зависимости от температуры на различном расстоянии от оси симметрии (T_0=2800°C, к=35,9): 1 – 1,0; 2 – 20; 3 – 25; 4 – 30мм.

При предварительном прогреве *к*=35,9 при низких температурах металла (T_0 = 2300°C) оплавление торца рельса не происходит.

На рис. 7 представлена диаграмма анизотермического превращения аустенита для стали 45, на которую нанесены кривые изменения температуры во времени для различных режимов процесса алюмотермитной сварки (содержание углерода в шве около 0,5 %). Из рисунка видно, что процесс охлаждения шва и рельса при T_0=2300°C и *к* = 11,5 протекает в условиях, близких к равновесным, что препятствует образованию закалочных структур. При температуре металла T_0=2800°C с незначительным предварительным прогревом (*к*=35,9) возможно образование закалочных структур (бейнит, троостит, сорбит). Еще большие скорости закалки 2,0–13,0 К/с наблюдаются при T_0 =3300°C практически без

предварительного прогрева рельса до начала процесса сварки ($к$ = 136).

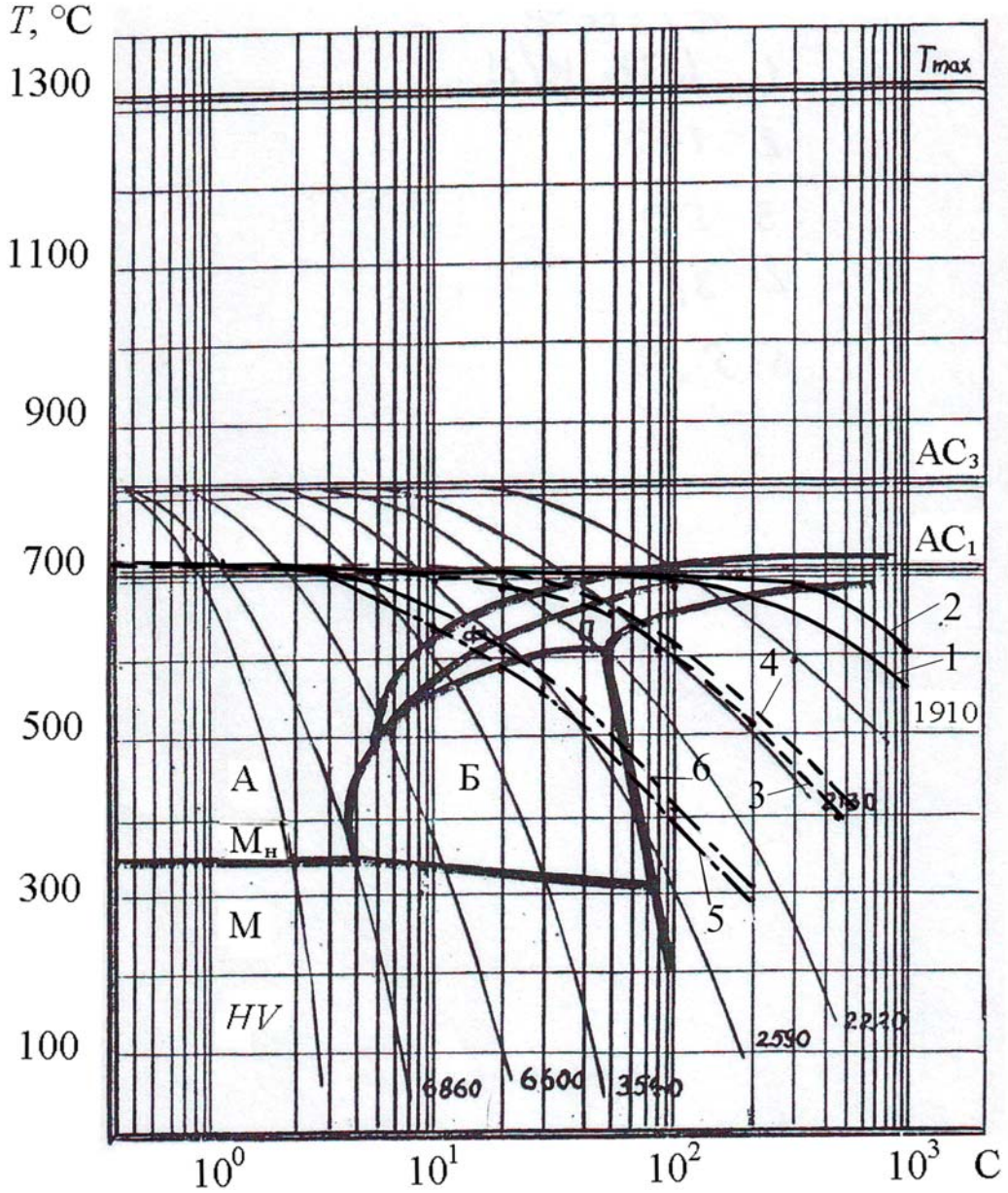


Рис. 7. Диаграмма анизотермического превращения аустенита стали 45. Изменение температуры металла во времени при различной степени прогрева рельса и начальной температуре расплава T_0: 2300°С, к=11,5 на оси симметрии (х=0) – 1, на границе зоны термического влияния (х=80мм) – 2; 2800°С, к=35,9 на оси симметрии –3, на границе зоны термического влияния (х=30мм) – 4 и 2800°С, к=86 на оси симметрии – 5, на границе зоны термического влияния (х=14мм) – 6. А–аустенит, Б–бейнит, Ф–феррит, П–перлит

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов

На рис. 8 приведены значения глубины оплавления торца рельса и зона термического влияния (начало координат x=0 на не оплавленном торце рельса) в зависимости от температуры металла T_0 для значительного предварительного прогрева рельсов перед сваркой ($к$=11,5). Значения глубины оплавления торца рельсов получено в реальном процессе алюмотермитной сварки, составляет 8 мм для шейки рельса, что согласуется с расчетным значением для T_0 =2400°С (рис. 8). Ширина сварного шва для головки рельса составляет 70 мм (глубина оплавления торца 17 мм). Такое значение ширины сварного шва обусловлено нахождением над головкой рельса дополнительной массы металла и шлака в течение всего процесса. Зона термического влияния в реальном процессе составляет 60 мм. Учитывая допущения и упрощения, принятые в расчетах, можно считать удовлетворительным соответствие реальных и расчетных геометрических параметров сварного шва.

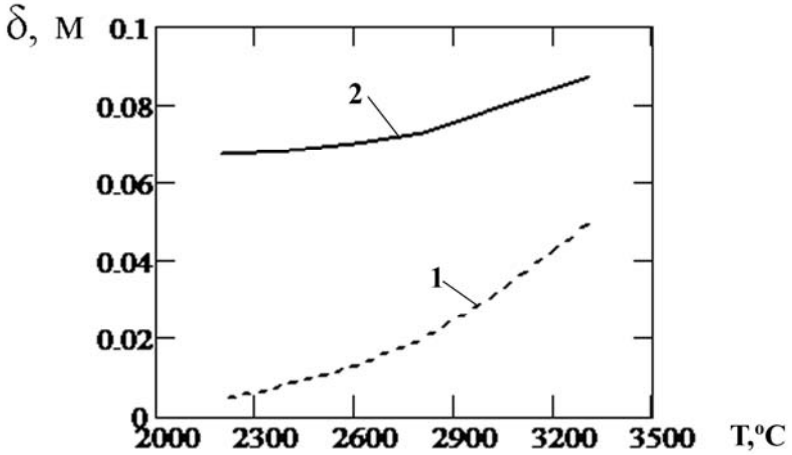


Рис. 8. Глубина оплавления торца рельса (1) и зона термического влияния (2) в зависимости от температуры расплава T_0 (к=11,5)

Выводы

Проведенный анализ термических условий процесса алюмотермитной сварки рельсов показал положительное влияние увеличения температуры исходного металла и снижения степени предварительного подогрева рельса на скорости закалки, что должно приводить к улучшению структуры металла в шве и около шовной зоне с соответствующим улучшением физико-механических характеристик и эксплуатационных показателей системы шов-рельс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 593 с.
2. Лыков А. М., Науменко Н. Н. Плавление материалов периодическим тепловым потоком. Физика и химия обработки материалов. 1995. №2. С.107–115.