

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Калужский филиал МГТУ имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ

**Материалы
Всероссийской научно-технической конференции**

Том 1



УДК 378:001.891
ББК 74.58:72
Н34

Руководители конференции

А. В. Царьков (директор КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана);
А. А. Столяров (зам. директора по научной работе)

Оргкомитет конференции

А. А. Столяров (председатель оргкомитета);
В. В. Лебедев (ученый секретарь);
Е. Н. Малышев; Г. В. Орлик; Н. Е. Шубин; А. А. Жинов; Ю. П. Корнюшин;
А. И. Пономарев; А. К. Рамазанов; А. А. Анкудинов; Б. М. Логинов;
В. Г. Косушкин; В. В. Андреев; А. В. Мазин; А. А. Шубин; А. К. Горбунов;
А. В. Максимов; В. Н. Пащенко; М. В. Астахов; Е. Н. Сломинская;
О. Л. Перерва; Г. И. Ловецкий; А. Ю. Красноглазов; В. М. Алакин

Н34 **Научное** технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 15 – 17 ноября 2016 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 276 с.

В сборнике материалов Всероссийской научно-технической конференции представлены результаты научных исследований, выполненных учеными в течение ряда лет. Систематизированы материалы различных научных школ. Результатами научных исследований являются новые методы, вносящие вклад в развитие теории, а также прикладные задачи, воплощенные в конструкции и материалы.

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72

© Коллектив авторов, 2016
© Калужский филиал МГТУ
им. Н. Э. Баумана
© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2016

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

М.В. Крюков, В.М. Попков

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Под автоматизацией проектирования подразумевается использование ЭВМ для решения задач при рациональном распределении функций между технологом и ЭВМ.

Автоматизация проектирования технологических процессов является сложной и актуальной задачей современного машиностроения. Сложность заключается в том, что такие задачи трудно формализовать и что они в большинстве случаев требуют творческого подхода к решению.

При использовании средств автоматизации можно снизить трудоемкость и время работ по проектированию на 30-40%. Использование ЭВМ для разработки технологического процесса штамповки позволяет сократить сроки подготовки производства, сократить себестоимость разработки технологических процессов, исключить ошибки технолога при проектировании, быстро рассчитывать все необходимые параметры процесса, сократить затраты на испытание образца и спроектировать штамп. Достижение этих результатов обеспечивается путем: автоматизации заполнения документации, использования технологий параллельного проектирования, использования типовых и групповых процессов, повышения качества и скорости управления технологическим процессом и замены испытание опытного образца его компьютерной моделью.

На сегодняшний день существует 3 уровня автоматизации проектирования технологических процессов:

Первый уровень автоматизации. Такой уровень подразумевает автоматизацию только оформления различных видов документации (маршрутные карты, операционные карты и т.д.)

Второй уровень автоматизации. Достигается использованием баз данных и расчетных модулей.

Третий уровень автоматизации. В этом случае возможно автоматизированное принятие решения о выборе технологических баз, выборе технологического процесса обработки и т.д. [1]

Автоматизация подразумевает использование систем автоматизированного проектирования (САПР).

САПР – организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств методического, программного, информационного, технического и организационного обеспечения. Методическое обеспечение представляет собой сведения, необходимые для моделирования и расчетов. Программ-

ное обеспечение – совокупность программ, которые разрабатываются для решения конкретных задач. Информационное обеспечение включает базу данных, содержащую нормативно-справочные материалы. Техническое обеспечение – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для проектирования. Организационное обеспечение – совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, а также форму представления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов, необходимых для выполнения проектирования.

Различают два основных режима использования ЭВМ: диалоговый и пакетный. Диалоговый режим используется при решении творческих задач, когда ЭВМ используется как обширная база необходимых данных. При пакетном режиме оператор вносит данные в компьютер, где с помощью наборов специальных программ происходит обработка информации и вывод результатов расчета.

При проектировании технологических процессов листовой штамповки должны решаться следующие задачи:

1. Выбор оптимального раскроя полосы на заготовки.
2. Расчет перемычек и припусков.
3. Расчет технологических параметров (усилие пресса, угол пружинения и т.д.).
4. Нормирование операций.
5. Проектирование штампа.
6. Написание управляющих программ для станков с ЧПУ.
7. Формирование технологической и конструкторской документации [2].

В современной практике нашли наибольшее применение следующие программы:

КОМПАС-Штамп. Возможности: проектирование штампов для различных операций холодной листовой штамповки, технологические расчеты (развертки гнутого профиля, технологических параметров отбортовки и вытяжки, усилия штамповки), построение схем раскроя полосы при штамповке, оформление комплекта конструкторской документации на штамп [3].

РАМ-STAMP. Возможности: автоматическое построение конечных элементных моделей инструмента по его геометрической модели, оптимизация процессов пробивки, вырубки, обрезки, расчет и проверка штампуемости заданной детали [4].

AutoForm. Возможности: проверка деталей из листового металла на технологичность, проектирование процессов зафланцовки, компенсация инструмента на основании на результатах расчета пружинения, определение стоимости штампов, определение оптимальной линии обрезки и контура заготовки, оценка штампуемости [5].

Технотран. Возможности: подготовка управляющих программ с функциями организации производственного процесса, автоматическое размещение деталей на листе, программирование обработки, оптимизация порядка обработки, разметка листа, создание документов (карта раскроя листа, спецификация раскроя листа, спецификация задания на раскрой), получение управляющей программы для станков с ЧПУ [6].

Список литературы

[1] Капустин Н. М. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. *Высшая школа. Сер. Машиностроение*, 2012. с. 14-34.

[2] Семенов Е. И. Ковка и штамповка: справочник. *Москва. Сер. Машиностроение*, 1985. с. 351-370.

[3] Добровольская М.А. *КОМПАС-Штамп: новые возможности для оснастки* URL:<http://www.sapr.ru/article.aspx?id=14904&iid=707> (дата обращения 16.10.2016).

[4] Лавриненко В.Ю. *Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки* URL: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/33282/1/itvmim_2012_49.pdf (дата обращения 16.10.2016).

[5] *Обзор продуктов AutoForm* URL: <http://www.autoform.com/ru/products/product-overview/> (дата обращения 16.10.2016).

[6] *Технотран. Листовая штамповка*. URL: <http://www.tehtran.com/nestp.html> (дата обращения 16.10.2016).

Крюков Максим Викторович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: clouthead@gmail.com

Попков Вячеслав Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: clouthead@gmail.com

В.М. Попков, В.К. Воронин

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РОССИЙСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Машиностроение в России, как и во всем мире, является ведущей отраслью промышленности. Именно оно определяет уровень производственного потенциала страны, и от него зависит большинство ведущих отраслей экономики. Машиностроение является поставщиком капитальных ресурсов для предприятий всех отраслей, обеспечивая производство всеми необходимыми машинами и оборудованием. Так же от машиностроения зависят такие важные показатели ВВП, как материалоемкость и энергоемкость, а они в свою очередь влияют на обороноспособность государства и экологическую безопасность производства.

Россия обладает достаточным потенциалом для успешного развития машиностроительного комплекса, однако в настоящее время наша страна значительно уступает в данном вопросе практически всем развитым странам. Для успешного развития отечественного машиностроения и промышленности в целом необходимо решить целый ряд актуальных на сегодняшний день проблем.

Как известно существует 6 технологических укладов, характеризующихся единым техническим уровнем составляющих его производств, связанных потоками качественно однородных ресурсов, опирающиеся на общие ресурсы квалифицированной рабочей силы и общий научно-технический потенциал. Технологический уклад охватывает замкнутый производственный цикл – от добычи природных ресурсов и профессиональной подготовки кадров до непроизводственного потребления. Исходя из такого представления технологической структуры экономики, ее динамика описывается как процесс развития и последовательной смены технологических укладов. Наша страна на сегодняшний день использует потенциал лишь 4 технологического уклада, в то время как другие развитые страны перешли к 5 и постепенно осваивают 6.

Таким образом на большинстве Российских машиностроительных предприятиях около 30% оборудования, средний возраст которого превышает 20 лет, хотя по средним нормативам полное обновление оборудования и выпускаемой продукции должно происходить каждые 7-8 лет. Отсюда следует следующая проблема – низкое качество выпускаемой продукции. Ведь невозможно производить качественную продукцию на устаревшем оборудовании. На сегодняшний день только 10% продукции машиностроительных предприятий нашей страны соответствует мировым стандартам, около 20% продукции в первый же год эксплуатации выходит из

стройка. Отсутствие спроса из-за низкого качества продукции приводит к минимизации прибыли машиностроительных предприятий.

По последним данным цены на российское сырье превышают мировые показатели, что так же сказывается на благосостоянии отечественного машиностроения. Все дело в том, что вся сырьевая промышленность РФ сосредоточена в руках монополистов и отсутствие конкуренции позволяет им устанавливать любые цены. Финансовые проблемы машиностроительных предприятий не позволяют создать условия для привлечения молодых высококвалифицированных специалистов.

Еще одной проблемой Российского машиностроения является высокая материалоемкость. Из-за несовершенства организации производственных процессов возникают потери материалов и сырья. В настоящее время существует ряд зарубежных систем и методик направленных на снижение потерь в процессе производства. Наиболее широко известные из них Lean Production, Just In Time, 6 Sigma, 5 S и др. Однако существует ряд проблем, которые не позволяют эффективно использовать их на Российских предприятиях:

- необходимо наличие бесперебойной системы, обеспечивающей согласованность всех поставок сырья и других необходимых ресурсов;
- поставляемые материалы не должны иметь дефектов, иначе вся система моментально разрушается;
- результат во многом зависит от квалификации руководства и персонала;
- необходимость обучения и вовлечения персонала;
- упускаются такие возможности для улучшения производственного процесса, как сокращение непроизводительной деятельности;

Таким образом для эффективного снижения материалоемкости необходима полная адаптация к уже существующим системам, либо разработка новой, подходящей для Российских предприятий, системы.

Так же существует проблема низкой автоматизации производства. Для организации автоматизированного производства требуется четкость и бесперебойность работы всех звеньев заводского механизма. Для достижения максимального экономического эффекта не достаточно внедрить в производство отдельные автоматические машины и агрегаты. Только комплексная автоматизация позволит добиться ощутимых результатов. Необходимо создание подетально или технологически специализированных производственных участков и цехов, расположенных в одном производственном помещении, для того чтобы была возможность объединить их единой системой транспортировки. Как известно в процессе изготовления продукции на перерывы между операциями расходуется огромное количество времени, в десятки, а иногда и в сотни раз превышающее время самих операций. Так же при непосредственной обработке деталей на станках около 30%

времени расходуется на формообразование, а остальные 70% - на установку заготовки, смену инструмента, переналадку оборудования и др. Основой автоматизации является непрерывность и автоматическое действие всех машин и агрегатов. Максимальной эффективности можно добиться путем автоматизации как можно большего числа операций, начиная от подачи исходного материала и заканчивая получением готового изделия.

Рассмотренные проблемы тесно связаны между собой и образуют замкнутый круг. Так, например, для автоматизации производства необходимо современное оборудование, которое в свою очередь требует больших финансовых вложений, а для получения прибыли требуется доступное сырье и современное оборудование, производящее качественную продукцию, пользующуюся спросом. Таким образом можно сделать вывод, что для решения основных проблем современного машиностроения в России необходим комплексный подход для одновременного решения взаимосвязанных проблем и поднятия производства на новый уровень, соответствующий мировым стандартам.

Список литературы

- [1] Промышленность России. 2014. Стат. Сб.//Росстат.2014
- [2] Григорьев С.Н. Кадровое обеспечение российского машиностроения Вестник МГТУ Станкин. 2015. - № 1. - С. 5.
- [3] Абрамян С.И. ,Федотов А.А. Возможности оптимизации производства на основе использования методов снижения потерь, Материалы II Всероссийской электронной научно-практической конференции "Проблемы и перспективы развития социально-экономического потенциала Российских регионов", ООО "Издательский дом "Пегас", ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова", Чебоксары, 2013.

Попков Вячеслав Михайлович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: v-a-r-o-n-a@mail.ru

Воронин Виктор Константинович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: v-a-r-o-n-a@mail.ru

И.Д. Соколова, А.С. Свитка

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На состояние режущего инструмента влияет совокупность параметров: обрабатываемый материал, технологическое оборудование, режим резания, порядок технического обслуживания, восстановления и ремонта. Контроль и регистрация состояния режущего инструмента являются важными функциями системы управления. Контроль должен осуществляться в двух аспектах: учет местонахождения каждого инструмента в интегрированной производственной системе и регистрация срока его службы.

Комплексное использование системы диагностики состояния режущего инструмента, возможности его быстрой автоматизированной замены, а также применение высокопроизводительных и надежных режущих инструментов с покрытием являются главными резервами повышения производительности, экономичности и эффективности сложных автоматизированных систем с гибкой или жесткой связью, залогом рентабельности их эксплуатации [1].

Методы активного контроля состояния режущего инструмента разделяют на прямые и косвенные. Прямые методы измерения предусматривают непосредственное измерение параметров износа. Износ контролируется по лунке, образующейся на передней поверхности. Проводятся исследования расстояния от режущей кромки до центра лунки, глубины лунки, ширины ленточки износа по задней поверхности, уменьшения объема или массы инструмента, размерного износа режущей кромки, разброса размеров деталей в партии и т.д. Указанные параметры можно определить радиоактивными, оптико-телевизионными, лазерными, электромеханическими, ультразвуковыми или пневматическими методами.

Радиоактивный метод предполагает использование радиоактивных датчиков. Уровень радиоактивности стружки зависит от объема унесенного инструментального материала и, следовательно, от полного износа инструмента. Падение радиоактивности означает, что зона износа распространилась дальше мест расположения радиоактивных частиц [1]. Низкая точность, сложность измерительной аппаратуры, невозможность работы с переточенным инструментом, необходимость работы с радиоактивными веществами, – все это является недостатками метода. Радиоактивный метод, несмотря на относительную простоту его осуществления, не получил широкого распространения.

Принцип работы оптических и оптико-электронных устройств измерения износа основан на том, что с изменением износа меняется отража-

тельная способность задней грани инструмента. Метод является перспективным, но высокая чувствительность к внешним условиям эксплуатации (запыленность воздуха, влияние СОЖ и т.д.) препятствует его внедрению в производственных условиях.

В основе пневматического метода лежит зависимость сопротивления истечению воздушной струи от расстояния между соплом датчика и контролируемой поверхностью. В таком способе для измерения износа инструмента применяется пневматический датчик. Рост износа инструмента приводит к уменьшению расстояния между соплом и поверхностью резания детали, и, следовательно, ведет к изменению сопротивления истечению воздушной струи. При измерении изменений этого сопротивления определяется размерный износ инструмента. Данный способ применяют только на отделочных операциях из-за его существенных недостатков: сложность практической реализации, связанная с необходимостью применения специальных конструкций инструмента с пневмоканалами, а также с обеспечением подачи воздуха при автоматической смене инструмента; зависимость результатов измерения от точности и шероховатости поверхности "заслонки".

Использование электромеханического метода связано с измерением износа инструмента в рабочем пространстве станка с помощью контактных датчиков, преобразующих перемещение щупа, движущегося по инструменту, в электрический сигнал. О величине износа судят по разности измеренных сигналов датчика до и после обработки [1]. Достоинством способа является отсутствие влияния условий обработки на результат измерений, но данный способ может быть использован не на всех станках, поскольку наличие в рабочем пространстве станка дополнительного устройства снижает универсальность, производительность станка и уменьшает его надежность.

Принцип работы ультразвукового метода основан на измерении длины режущего лезвия с помощью определения времени прохождения ультразвуковой волной заданного расстояния. При заданной скорости и найденном времени распространения ультразвука в среде вычисляется длина режущего лезвия. Для получения ультразвуковых колебаний в среде в виде импульса используется пьезоэлектрический источник. При столкновении импульсов с препятствием часть энергии излученной волны отражается и возвращается к источнику излучения в виде эхо-импульса, пьезопреобразователь переходит из режима излучения в режим приема.

Общим недостатком методов активного контроля является невозможность их использования во время обработки детали в процессе резания.

В связи с этим в нашей стране и за рубежом проводились и проводятся многочисленные работы, направленные на использование возможности оценки состояния инструмента по измерению различных параметров процессов, сопровождающих резание. При использовании косвенных методов

датчиками принимаются сигналы, поступающие от определенных участков инструмента, машины, заготовки. Эти сигналы содержат информацию о размерах и скорости износа инструмента.

Существует достаточно большое количество способов косвенного измерения параметров в процессе обработки, основанных на измерении заготовки [1]. Метод механического косвенного измерения основан на контроле размеров с помощью щупов, что требует значительных дополнительных затрат, высокую точность станка и его измерительной системы. Использование контактных датчиков на операциях настройки инструмента дает экономию времени до 95%.

Для косвенных измерений параметров износа инструмента также могут быть применены пневматические, оптические, индуктивные, емкостные, фотоэлектрические, электронные способы. Но точность измерения невысока из-за ее зависимости от ошибок при изготовлении элементов системы обработки, ошибок, вызванных упругими деформациями в системе обработки, погрешностей вследствие температурных деформаций и т.д.

Метод измерения шероховатостей обработанной поверхности связан с зависимостью шероховатости от износа инструмента. Но шероховатость трудно использовать в качестве контролируемого параметра из-за ее нестабильности, сложностью измерения, необходимости применения точного оборудования.

Следующий метод косвенного измерения параметров износа инструмента основывается на зависимости между температурой резания и параметрами износа инструмента для заданного сочетания материала заготовки и инструмента и для данных условий и режимов обработки. При этом в процессе обработки температура резания измеряется непрерывно или периодически. Критерием износа является интенсивность тепловыделения в зоне резания. В условиях малолюдной технологии измерение теплового потока в инструменте путем определения перепада температур в двух точках корпуса инструмента вблизи режущих кромок считается одним из наиболее простых и надежных методов автоматического контроля износа инструментов. Недостатками метода являются его малая точность и необходимость применения специального инструмента.

Информацию о состоянии режущего инструмента из зоны резания можно получить непосредственно путем измерения Т.Э.Д.С. (термо-электродвижущей силы резания), генерируемой в зоне скользящего контакта режущего инструмента с обрабатываемой деталью. Известны результаты исследований влияния технологических режимов, износа инструмента на постоянную и переменную составляющие Т.Э.Д.С., интенсивность колебаний в различных частотных диапазонах, полученные методом естественной термопары. Показано, что износ инструмента, в основном, влияет на переменную составляющую Т.Э.Д.С. [2]. Недостатками данного способа является необходимость использования токосъемника и изолирование режущего инструмента от станка для измерения величины Т.Э.Д.С., что усложняет условия эксплуатации.

Метод силового измерения – один из наиболее известных косвенных способов контроля состояния режущего инструмента. Он основан на измерении сил резания и крутящего момента. Контролируемым параметром служит электрический ток, пропорциональный крутящему моменту, в цепи привода подачи и в электродвигателе главного привода. Отмечается запаздывание токового сигнала на 40-80 мс от сигнала датчика в трехкомпонентном резцедержателе при ступенчатых изменениях глубины резания, поэтому такой сигнал может быть использован для контроля поломок инструмента при черновых операциях [1].

Способ измерения мощности резания основывается на том явлении, что в результате изменения крутящего момента на валу двигателя вследствие изменения состояния режущего инструмента изменяется его потребляемая мощность. Износ режущего инструмента определяется при регистрации колебаний потребляемой электродвигателями мощности. Данный метод достаточно прост, обеспечивает доступность информативного параметра, не его нельзя использовать при обработке инструментов малого диаметра, так как мощность, развиваемая приводным электродвигателем, практически не отличается от мощности холостого хода. Кроме того, датчики, измеряющие величины крутящего момента и мощности не являются достаточно эффективными, так как изменение крутящего момента и мощности происходит недостаточно быстро.

Вибрационный метод основан на регистрации характеристик вибрации инструмента в процессе обработки [3]. Виброакустический сигнал разлагается на низкочастотные и высокочастотные составляющие. По их соотношению судят об износе инструмента. В качестве диагностического сигнала о состоянии инструмента, обрабатываемости материала, и для оптимизации скорости резания и геометрии инструмента используется интенсивность высокочастотных волн напряжений. Достоинствами метода являются простотастройки датчиков в станок без изменения его конструкции, информативность сигналов, отработанность основных элементов аппаратуры обработки сигналов [4]. Применение этого метода позволяет избавиться от недостатков вышеприведенных способов: необходимость установки датчика на каждом режущем инструменте, электроизоляция инструмента, сильное влияние температуры, стружки и СОЖ (смазочно-охлаждающей жидкости) на измеряемый параметр.

Ненадежное закрепление инструмента, несвоевременная смена затупившегося инструмента и его неправильная заточка являются основными причинами износа и поломки режущего инструмента, что требует внимательного подхода к контролю состояния режущего инструмента и качества его изготовления. Перспективным направлением является использование акустического излучения, сигнал которого регистрируется специальным датчиком, воспринимающим ударные волны, возникающие при высвобождении энергии.

Список литературы

[1] [Электронный ресурс] Состояние режущего инструмента http://www.technologia.ru/documentation/cutting_of_metals/7.html (дата обращения 16.09.2016 г.)

[2] [Электронный ресурс] Диагностика состояния режущего инструмента на основе вероятностных и информационных параметров акустической эмиссии и термоЭДС <http://www.dslib.net/mex-obrabotka/diagnostika-sostojanija-rezhuwego-instrumenta-na-osnove-verojatnostnyh-i.html> (дата обращения 16.09.2016 г.)

[3] *Добровинский И.Р., Медведик Ю.Т., Медведик М.Ю., Чапаев В.С.* Измерение износа резца виброакустическим методом и моделирование напряженности акустического поля внутри режущего инструмента // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. - №2(26). – С. 59-70.

[4] *Иващенко А.П.* Методы и средства контроля состояния режущего инструмента // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-3. – С. 393-396.

Соколова Ирина Дмитриевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru

Свитка Анастасия Сергеевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: svitka1993@yandex.ru

Б.Н. Агеев, Е.Н. Малышев

АНАЛИЗ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время, в связи с повышением требований к производительности механической обработки, с одной стороны, и с широким внедрением в промышленность электронно-вычислительных машин с другой, встал вопрос о пересмотре методов поиска наиболее эффективных схем формирования.

Современные ЭВМ обладают огромными возможностями для совершенствования проектирования вообще и процесса проектирования эффективных схем механической обработки в частности. Они дают возможность с предельной быстротой и точностью решать самые сложные аналитические задачи, осуществлять анализ получаемых результатов, отыскивать оптимальные параметры для конструкции и, в конечном счете, позволяют полностью автоматизировать процесс проектирования. Чтобы использовать эти возможности ЭВМ для проектирования способа формообразования поверхностей изделий, необходимо создавать такие методы расчета, которые были бы аналитическими, имели строгую формализацию всего процесса проектирования, позволяли бы четко, определять критерии оптимизации, были бы в максимальной степени общими и позволяли, бы решать рассматриваемые задачи комплексно.

Теоретические основы для таких методов должны содержать решения вопросов формообразования поверхностей инструментами, расчета схем резания, технологичности и т.д.

Главными факторами в процессах формообразования, реализуемых на металлообрабатывающем оборудовании, являются геометрический (определяется геометрией поверхности обрабатываемой детали и исходной инструментальной поверхности) и кинематический (определяется закономерностями относительного движения детали и инструмента без учета физических явлений, протекающих в зоне обработки, действующих сил, температур и активных сред) [1]. Формообразующей системой (ФС) называют совокупность звеньев технологической системы, взаимное положение и перемещение которых обеспечивает заданную траекторию движения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали. В звено входят все те элементы, которые во время работы остаются относительно неподвижными. Например, звеном является шпиндель вместе с патроном и зажатой в нем обрабатываемой деталью. Два последовательных звена имеют в относительном движении не более одной степени свободы, т.е. звено может либо поворачиваться относительно оси, фиксированной в соседнем звене, либо двигаться поступательно вдоль фиксированной оси, либо быть

относительно неподвижным. При анализе геометрии и кинематики все звенья ФС являются равноправными, т.е. достаточным является рассмотрение лишь относительного движения звеньев[2].

Для аналитического описания процесса относительного перемещения звеньев ФС элементам системы придают движения со скоростями, равными по величине и противоположно направленными скоростям движений, которые совершает заготовка относительно инструмента в реальном процессе обработки. Неподвижной считается система координат S_0 , связанная с заготовкой. Система координат S_i связана с i -м звеном и все подвижные звенья ФС пронумерованы последовательно, начиная от обрабатываемой заготовки ($i = 0$) и заканчивая инструментом ($i = l$).

Относительное движение звеньев ФС может быть представлено в виде координатного кода ФС:

$$k = k_1 k_2 \dots k_l$$

где k_i ($i=1, \dots, l$) - обозначение движения i -го звена ФС относительно ($i-1$)-го; l — число подвижных звеньев системы.

С каждым звеном ФС однозначно связывается один из приведенных в табл. 1 символов:

Таблица 1. Обозначение k_i относительного движения звеньев в координатном коде ФС

Ось	Поступательное движение звена относительно предыдущего вдоль оси	Вращательное движение звена относительно предыдущего вокруг оси
X	1	4
Y	2	5
Z	3	6

Например, координатный код формообразующей системы, реализующей обработку поверхностей вращения методом точения, представляет собой трехзначное число $k = 631$ (рисунок 1). При модульном построении такой системы нулевым звеном ($i = 0$) является обрабатываемая заготовка со шпиндельным модулем. Следующее звено ($i = 1$) – станина. В относительном движении станина вращается вокруг оси Z_0 в направлении, обратном направлению вращения шпинделя, этому движению соответствует символ 6, т.е. $k_1 = 6$. Аналогично, поступательное движение продольного суппорта ($i = 2$) относительно станины совершается вдоль оси Z_1 , т.е. $k_2 = 3$, и, наконец, поперечный суппорт ($i = 3$) поступательно движется вдоль оси X_2 , т.е. $k_3 = 1$.

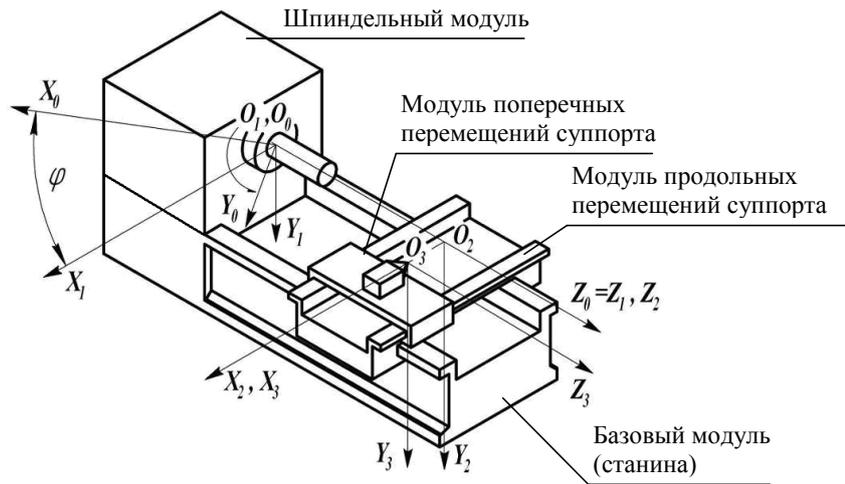


Рис. 1

Составим координатный код ФС вертикально-фрезерного обрабатывающего центра (на рисунке 1 инструментальный магазин условно не показан). В этом станке предусмотрено четыре движения формообразования ($n = 3$): вращение шпинделя, продольное, поперечное и вертикальное перемещения суппортов.

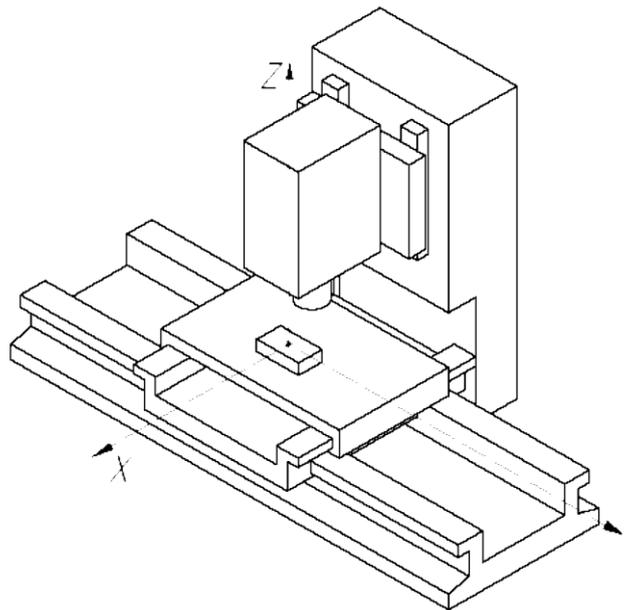


Рис. 2

Нулевым звеном ($i = 0$) является обрабатываемая деталь со столом поперечного суппорта. Следующее звено ($i = 1$) — продольный суппорт. Поскольку нулевое звено всегда считается неподвижным, то в относительном движении продольный суппорт поступательно движется вдоль оси X , то есть $k_1 = 1$. Станина совершает поступательное движение вдоль оси Y , то есть $k_2 = 2$. Аналогично, поступательное движение вертикального суппорта относительно станины совершается вдоль оси Z , то есть $k_3 = 3$, и, нако-

нец, шпиндель вращается вокруг оси Z . Этому движению соответствует символ 6, то есть $k_4 = 6$. Таким образом, для данного ОЦ координатный код ФС представляет собой четырехзначное число: $k = 1236$

Приведенный вариационный метод анализа позволяет выявить технологические возможности технологических систем с точки зрения формообразования.

Список литературы

[1] Решетов Д.Н., Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986 г.

[2] Косилова А. Г., Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976 г.

Агеев Борис Николаевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: ageevboris58@gmail.com

Мальшев Евгений Николаевич - канд. техн. наук, зав. каф. "Технологии машиностроения" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

С.В. Зудин

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЬБЫ НА ЕЕ ПРОЧНОСТЬ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Разрушение витков резьбы – довольно распространенная проблема крепежных изделий. К конструктивным параметрам, определяющих прочность витков можно отнести: диаметр d и шаг резьбы P , высота гайки H (длина свинчивания), радиус впадины резьбы R , соотношение механических характеристик материалов *болта (шпильки) и гайки* (корпуса). В меньшей степени влияют поперечные размеры *гайки* (размер под ключ).

Рассмотрим каждый из параметров в отдельности.

Влияние диаметра резьбы. В результате экспериментов и исследований было установлено, что с увеличением диаметра резьбы (при постоянной высоте гайки и постоянном шаге) несущая способность соединения, оцениваемая по нагрузке, разрушающей резьбу, возрастает либо нелинейно (для стальных соединений), либо пропорционально диаметру (для соединений стальных шпилек с корпусными деталями из алюминиевых и магниевых сплавов). В первом случае интенсивность повышения несущей способности резьбы незначительно снижается при больших диаметрах и в практических расчетах можно считать, что прочность резьбы увеличивается пропорционально ее диаметру.

Влияние шага резьбы. Уменьшение шага резьбы при неизменных наружном диаметре и высоте гайки снижает прочность соединения, так как для мелкой резьбы труднее обеспечить перекрытие витков, одинаковое с крупной резьбой, в пределах одного класса точности. Помимо этого, радиальные деформации тела гайки в нагруженном состоянии, также сильнее сказываются на несущей способности соединений с мелкой резьбой. Снижение прочности соединения при уменьшении шага резьбы было обнаружено позднее.

Соотношение прочности материала гайки и болта. Влияние шага резьбы на прочность соединения в существенной мере зависит от материалов резьбовых деталей. При значительном отличии пределов прочности материалов болта и гайки ($\sigma_{в, б} / \sigma_{в, г} > 1,4$) и одинаковых модулях упругости ($E_{б} = E_{г}$), прочность резьбы с увеличением шага изменяется пропорционально следующему отношению - $\sigma_{в, б} / \sigma_{в, г}$. Это объясняется улучшением условий деформирования и разрушения витков резьбы гайки, в последствии смещения наибольшего давления в области контакта к основанию витков гайки. Нужно отметить, что при $\sigma_{в, б} \gg \sigma_{в, г}$ - пластические деформации витков резьбы болта очень малы. Соединения с гайками из материала с меньшим модулем упругости (примером может служить магниевый сплав с $E = 40$ ГПа) влияние шага сказывается в равной степени, как и для стальных соединений.

Необходимая высота гайки (длина свинчивания). *Необходимая высота гайки* зависит от диаметра и шага резьбы, соотношения механических свойств материалов резьбовых деталей, а также типа соединения, влияющего на характер распределения нагрузки между витками. Повышение *высоты гайки* свыше необходимой неэффективно, так как прочность соединений, ограниченная несущей способностью стержня болта, при этом не увеличивается. Увеличение необходимой высоты гайки с ростом отношения d/P связано с влиянием диаметра и шага на прочность резьбы соединения и стержня болта (или шпильки для фланцевых соединений).

Влияние материала болта и гайки на прочность витков резьбы. *Соотношение механических характеристик материалов болта и гайки* воздействует на процесс деформирования и характер разрушения витков резьбы, поэтому несущая способность соединений при разных отношениях $\sigma_{в, б} / \sigma_{в, г}$ заметно различается, даже для материалов болта и гайки с одинаковыми модулями упругости. Можно привести пример изменения нагрузки, разрушающей резьбу М24х1 соединений, в зависимости от отношения H/d при разной прочности шпилек из сталей 30ХГСА и стали 45. Материал гаек — сталь 45 ($\sigma_{в} = 680$ МПа). Увеличивая предел прочности шпилек от 740 до 1660 МПа (высокопрочные шпильки), можно более чем в 2 раза увеличить несущую способность резьбы соединения. Это обстоятельство, которое можно объяснить улучшением условий деформирования витков гайки, необходимо учесть при проектировании и изготовлении соединений литых, кованных или штампованных корпусов из пластичных и, как правило, мало прочных низкоуглеродистых сталей. При $\sigma_{в, б} \approx \sigma_{в, г}$ наблюдается срез витков шпильки. При этом прочность соединения в этом случае будет невелика. При $\sigma_{в, б} \approx (1,3 \dots 1,8)\sigma_{в, г}$ соединение разрушается вследствие пластического изгиба витков (смятия). При этом может происходить выламывание витков одной из деталей. Можно сделать важный вывод: для более полного использования механических характеристик гаек (корпусных деталей) нужно применять болты (шпильки) из материала с $\sigma_{в, б} \geq 1,3\sigma_{в, г}$.

Таким образом, на прочность витков резьбы оказывают влияния как конструктивные геометрические факторы: диаметр, шаг резьбы, длина свинчивания, радиус впадины резьбы R и их взаимные соотношения, — так и материал обеих соединяемых деталей. Прочность резьбы возрастает с увеличением ее диаметра, шага, высоты гайки, прочности материала болта (шпильки). Более высокую нагрузку могут выдерживать резьбовые соединения, в которых происходит разрушение срезом витков гайки.

Список литературы

- [1] Якушев А. И. Влияние технологии изготовления и основных параметров резьбы на прочность резьбовых соединений. — М. :Оборонгиз, 1956.
- [2] Иосилевич Г. Б., Строганов Г. Б., Шарловский Ю. В. Затяжка и стопорение резьбовых соединений. — М. : Машиностроение, 1985. — 224 с.

Зудин Сергей Владимирович — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: zudin.sv@mail.ru

Т.Ю. Карабахина, В.Г. Карабахин

ВЫБОР МАТЕРИАЛА УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТРУБ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ ПРЕССОВОЙ РАЗДАЧИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для закрепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов широко распространены методы механической развальцовки [1], раздачи с использованием энергии взрыва [2], гидрораздачи. Известен способ и разработано устройство прессовой раздачи труб упругим элементом [3], обладающий рядом преимуществ по сравнению с перечисленными методами. Для его промышленного применения при изготовлении теплообменного оборудования ответственного назначения необходимо решить ряд вопросов, одним из которых является выбор материала упругого элемента.

Материал упругого элемента оказывает непосредственное влияние на многочисленные параметры процесса раздачи. Упругий элемент передает рабочее усилие на элементы теплообменного аппарата, определяя прочность закрепления трубы в трубной решетке. Кроме того, физико-механические свойства материала упругого элемента определяют трудоемкость ввода инструмента внутрь трубы и последующего извлечения, стойкость эластичной втулки, возможность переработки и вторичного использования.

В настоящей работе представлены результаты испытаний прочности на растяжение соединений труб с трубными решетками, полученных методом прессовой раздачи упругим элементом, изготовленным из различных материалов. В качестве объектов исследования были взяты однотрубные образцы из титановых сплавов. Рабочее давление при закреплении труб выбирали исходя из условия обеспечения степени раздачи трубы в диапазоне 4÷7%. Трубы в имитаторах трубной решетки закрепляли в гладком отверстии без последующей сварки соединения.

Упругую втулку изготавливали из поливинилхлорида марки ПБ-2, полиуретана ЛУР-СТП, силикона, пластика поливинилхлоридного И40-13, полиэтилена 10803 и др. материалов. В ходе получения соединений исследовали эксплуатационно-технологические свойства материалов: возможность создания условий всестороннего сжатия, равномерность раздачи трубы по длине участка закрепления, возникновение эффекта вакуумной присоски, степени разрушения упругой втулки. В результате выполненных исследований эксплуатационно-технологических свойств материалов определение усилия страгивания при растяжении продолжили с втулками из поливинилхлорида марки ПБ-2, пластика поливинилхлоридного И40-13, полиэтилена 10803.

На рисунке представлена диаграмма средних значений прочности соединений труб в трубных решетках, полученных методом прессовой раздачи упругим элементом

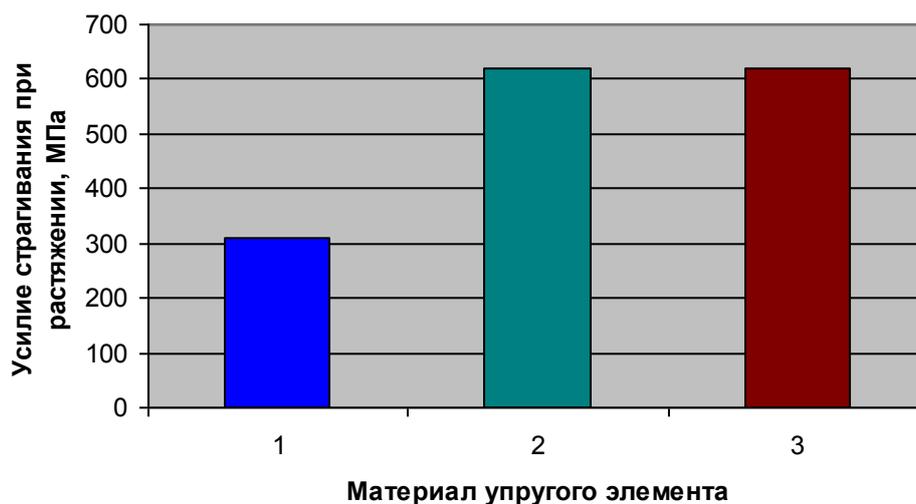


Рис. 1. Диаграмма значений прочности закрепления труб в трубных решетках упругим элементом из различных материалов: 1 – пластикат поливинилхлоридный И40-13, 2 – полиэтилен 10803, 3 – поливинилхлорид марки ПБ-2.

Список литературы

[1] Юзык С.И. Развальцовка труб в судовых теплообменных аппаратах. – Л.: Судостроение, 1978. – 144с.

[2] ГОСТ 23691-79 – ГОСТ 23693-79. Соединение труб с трубными решетками и коллекторами теплообменных аппаратов. Запрессовка труб с применением источников импульсного давления. – Введ. 01.01.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 64 с.

[3] Пат. 118893 РФ, МПК В21D39/06. Устройство прессовой раздачи труб в отверстиях трубных решеток/ В.Г. Карабахин, Т.Ю. Карабахина – Изобретения. Полезные модели. – 2012. – №22.

Карабахина Татьяна Юрьевна - старший преподаватель кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: karabakhina@ya.ru

Карабахин Владимир Геннадиевич - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: karabakhina@ya.ru

Ю.С. Демиш, И.К. Устинов

ВЫБОР СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современное машиностроение на данном этапе развития характеризуется высокой точностью выпускаемой продукции. Трудоемкость контрольных операций в технологическом процессе занимает в отдельных случаях до 40%.

В этом случае применение средств активного и автоматизированного контроля позволяет повысить эффективность технологических процессов и снизить количество настроек режущего инструмента, а так же снизить процент брака и простоя оборудования. Все эти факторы дают позитивное направление в области применения современных средств измерения.

Средство измерений – техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным в пределах установленной погрешности и в течение известного интервала времени.

Все средства измерений, независимо от их конкретного исполнения, обладают рядом общих свойств, необходимых для выполнения ими их функционального назначения. Метрологическими характеристиками называются технические характеристики, описывающие эти свойства и оказывающие влияние на результаты и на погрешности измерений, предназначенные для оценки технического уровня и качества средства измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений.

В основу создания нового поколения средств контроля и измерений геометрических параметров изделий положены следующие исходные принципы:

1. Использование перспективной элементной базы для автоматической обработки результатов контроля;
2. Цифровое представление измерительной информации;
3. Возможность выдачи цифровой информации на внешние устройства обработки, управления и регистрации;
4. Паспортизация результатов измерений;
5. Возможность встройки в автоматизированные технологические комплексы.[1]

Для дальнейшего выбора и применения современных средств измерения для инструментальных систем предлагается следующая методика выбора:

1. По степени автоматизации технологического процесса средства контроля разбиваются на следующие подразделы:

- автоматизированные системы (смена инструмента производится вручную, измерительное средство только сигнализирует о результатах контроля);
- полуавтоматические системы (загрузка инструмента осуществляется вручную, все остальные операции технологического процесса автоматизированы);
- автоматические системы (весь цикл технологического процесса автоматизирован);
- самонастраиваемые системы (цикл технологического процесса автоматизирован с работой адаптивной системы поднастройки).

2. По степени воздействия на технологический процесс возможно следующее разделение:

- пассивные средства контроля (работа только с размерами);
- активные средства контроля (работа со всеми размерами измерения, с воздействием на технологический процесс).[2]

Вышеуказанные средства контроля для инструментальных систем полностью позволяют выполнять все виды технологических операций, необходимые для сравнения действительного размера обрабатываемой детали заданным размером, в фактической зависимости от результатов сравнения с целью активного управления технологическим процессом.

Список литературы

[1]. Информационно-измерительная техника и технологии: учебник / [В.И. Калашников и др.]; под ред. Г.Г. Ранеева. – М. :Высш. шк., 2002. – 454 с.

[2]. *Каменчев В.А.* Контрольно-измерительные работы в машиностроении и их комплексная автоматизация: учеб.пособие / В.А. Каменчев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 144 с.

Демиш Юлиана Сергеевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: uliana.demish.94@gmail.com

Устинов Игорь Кириллович - канд. техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru

В.Ю. Потемкин, Л.А. Санова

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАТРИЦ ПРЕСС-ФОРМ МЕТОДОМ ГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Открытие явления гальванопластического копирования сделано знаменитым русским ученым Борисом Семеновичем Якоби. 5 октября 1838 г. на заседании Академии наук был прочитан доклад Якоби об изобретении техники гальванопластики и продемонстрированы образцы гальванопластических копий гравированных печатных форм. Этот день считается официальной датой изобретения гальванопластики [1].

Гальванопластика позволяет получать сложнопрофилированные полости с высокой точностью и малой шероховатостью поверхности, что определило ее применение в производстве технологической оснастки.

Качество формообразующих деталей, или как чаще их называют вставок (вкладышей), полученных гальванопластическим методом, значительно выше, чем при механическом способе изготовления матриц.

Отклонение размеров получаемых формообразующих деталей от размеров копируемых форм или мастер - моделей составляет всего лишь от 2 до 10 мкм.

Шероховатость поверхности полностью определяется шероховатостью поверхности формы. Поскольку формы являются выпуклыми, т.е. более удобными и менее трудоемкими для слесарно-механической обработки, качество поверхности формообразующей детали получается более высокими, чем при традиционном способе изготовления матриц пресс-форм.

Приведем принципиальную схему процесса гальванопластики, а затем более подробно рассмотрим каждый из этапов.

На данной схеме (рис.1) используется мастер-модель из воска, поэтому перед помещением в гальваническую ванну модель покрывается серебром или графитом для обеспечения надежной электропроводности. Состав ванны может содержать несколько металлов, а иногда он последовательно меняется по мере нанесения слоя соответствующего металла достаточной толщины.

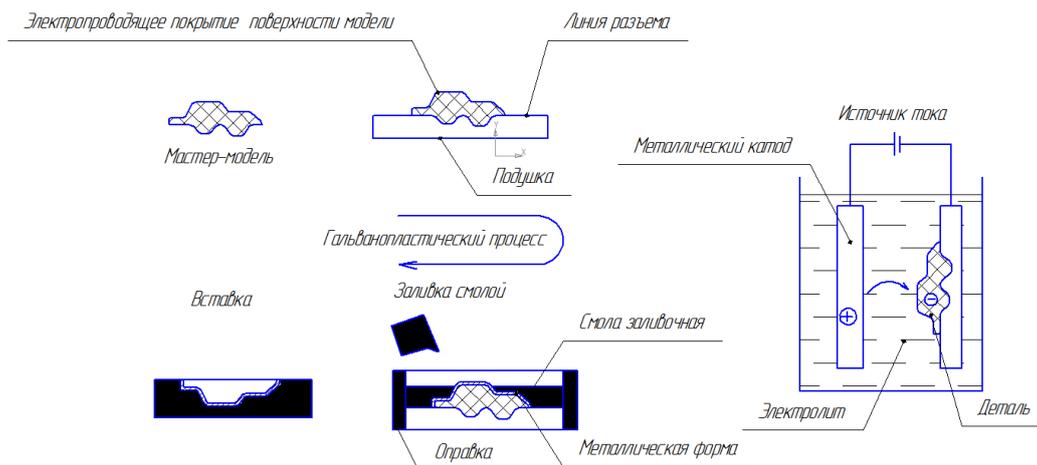


Рис. 1. Принципиальная схема гальванопластического процесса

Для формирования рабочего слоя наибольшее распространение получил сульфаматный электролит никель-кобальт [2]. Это объясняется тем, что в данном электролите можно вести процесс при больших значениях плотности тока, а получаемые осадки имеют небольшие внутренние напряжения и обладают высокой твердостью. Осадки, полученные из сульфаматного электролита, имеют мелкозернистую структуру, они гладкие и эластичные. В итоге получается форма толщиной 4-5 мм, состоящая из металлического сплава или нескольких слоев металлов и сплавов.

На формах, имеющих переходы с острыми углами, при электроосаждении формируются тонкие неоднородные слои металла, которые после наращивания копии необходимо пропаявать. Для образования сплошной прочной структуры углы закругляют под радиусом около 0,5—1,0 мм [3].

В технологии гальванопластики также используют формы с глубокими щелями и впадинами (рис. 2). При наращивании толстых слоев меди на таких формах по мере увеличения ширины щели толщина слоя металла в ней возрастает, а начиная с толщины 4 мм, мало меняется. При ширине щели 3—4 мм толщина слоя металла на внутренней поверхности составляет около 40 % толщины наружного слоя металла. При ширине щели 0,5—1,0 мм происходит ее зарастание с образованием в точке 2 слоя металла толщиной 0,07—0,08 мм. Колебания толщины слоя в точках 1,2,3 и точках 4, 5, 6 по всей длине составили соответственно 18—20 и 18—34 % [3].

Никелевые формы, полученные методом гальванопластики, дают наилучшие результаты благодаря высокому пределу прочности, упругости и твердости (например, для сплава NiCo твердость 50 по шкале Роквелла С), а также совместимости с основным материалом и хорошей коррозионной стойкостью.

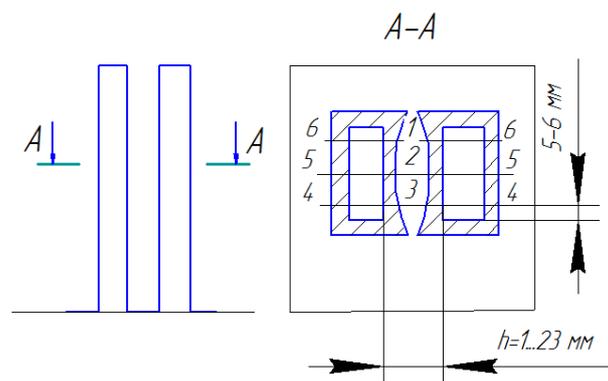


Рис. 2. Схема расположения точек измерения толщины h осажденного слоя

Технологическая схема изготовления вставок пресс-форм во многом определяется материалом форм. Если используются металлические формы, технологическая схема проще и цикл изготовления вставок короче. Однако стоимость полученных матриц повышается за счет большего объема механической обработки и доводки форм. Схема изготовления вставок в данном случае включает в себя следующие основные операции [3]:

1. Подготовка поверхности формы
2. Получение рабочего слоя (осаждение сплава никель-кобальт или никеля)
3. Создание конструкционного слоя
4. Крепление вставок в матрице

Рабочая поверхность вставки матрицы соприкасается непосредственно с перерабатываемым в ней материалом, поэтому она должна иметь высокую твердость и обладать коррозионной стойкостью. Этим требованиям полностью отвечает сплав никель-кобальт, который и используется для получения рабочего слоя вставок.

Назначение конструкционного слоя – придание вставке жесткости и получение базовых поверхностей, необходимых для укрепления ее в матрице. Конструкционный слой по своему назначению должен обладать прочностью, теплопроводностью и хорошей адгезией к поверхности электроосажденного рабочего слоя, не вызывая его повреждения. Он должен быть устойчивым к рабочим температурам прессования и литых пластмасс.

Если формообразующая деталь пресс-формы имеет плоскость разъема, то соответственно в конструкции формы должна быть плоскость разъема. В этом случае изготавливают две полуформы, которые укрепляют на подвесочном приспособлении параллельно друг другу с двух сторон. Такие двусторонние формы предпочтительнее, так как позволяют более экономично использовать гальваническую ванну.

На рис. 3 показана конструкция формы для электролитического формования вставки, имеющей плоскость разъема. Форма состоит из двух симметричных полу форм 6, каждая из которых укреплена на металлической плите 5, выступающей на 1 мм по всему периметру из-под формы. Плита 5 исполняет роль дополнительного катода, позволяющего получить более равномерно распределение осадка по поверхности полуформ.

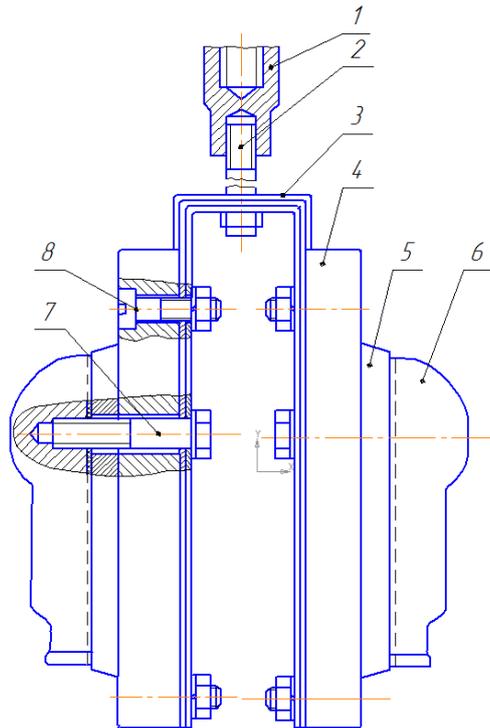


Рис. 3. Двусторонняя форма для электролитического формования вставки с плоскостью разъема

1–защитная гайка; 2– токоподвод; 3–подвеска; 4–изолятор;
5 –металлическая плита; 6– полуформа; 7,8–крепежные болты

В производстве пресс-форм встречаются следующие типы формообразующих деталей [3]:

1. Детали вращения или близкие к ним. В этом случае размер любого поперечного сечения формообразующих детали либо одинаковы, либо отличающиеся на величину, соизмеримую с толщиной осажденного металла. К этому типу относятся формообразующие детали для получения шестеренок, гаек, заглушек, втулок, ручек приборов, корпусов авторучек, карандашей и других подобных деталей.

2. Имеющие сложную пространственную конфигурацию со значительной разницей в размерах одного и того же сечения. Чаще всего формообразующие детали данного типа имеют плоскость разъема, т.е. состоят из двух частей. Пресс-формы с такими полостями используют для получения корпусов, резиновых объемных деталей, игрушек, предметов бытового назначения.

3. Плоские или близкие к плоской конфигурации, не имеющие больших перепадов по высоте. Формообразующие детали данного типа используют для получения шкал с надписями, табличек, плоских деталей с рельефным рисунком или фактурой, подошва для обувной промышленности и т.п.

При изготовлении вставок, рабочая поверхность которых имеет осесимметричную форму, роль конструкционного слоя может выполнять стальная втулка, полученная механической обработкой. Для этого форму с

рабочим слоем, обработанную на токарном станке, запрессовывают в стальную втулку. После запрессовки форма извлекается.

Для осаждения металлических слоев сплавов никель-кобальт и никель-медь используют специальные установки, в которых осуществляется движение катодных штанг. Это необходимо для получения осадков хорошего качества [3].

Использование технологии гальванопластики для изготовления вставок пресс-форм снижает затраты за счет сокращения объема труда высококвалифицированных рабочих инструментального производства. Кроме того, увеличивается межремонтный срок службы пресс-форм за счет повышения стойкости формообразующих полостей, а также улучшает качество отливаемых или прессуемых деталей и изделий.

Коэффициент использования металла в гальванопластических процессах возрастает по сравнению с механическими способами изготовления с 0,18-0,25 до 0,8-0,95, сокращается в 10-15 раз расход электроэнергии. [4] Все это способствует дальнейшему развитию гальванопластических процессов и увеличению их объема в промышленности.

Список литературы

[1] Садаков Г.А. Гальванопластика. – М.: Машиностроение. – 1987. – 288с.

[2] Вячеславов П.М. Электролитическое осаждение сплавов. – Ленинград: Машиностроение – 1986. – 112с.

[3] Ванковская К.М., Волоняк Г.А. Промышленная гальванопластика. - Ленинград: Машиностроение –1986. –103с.

[4] Кудрявцева О.В. Техническая гальванопластика. – СПб.: Политехника. – 2011. – 148с.

Потемкин Виктор Юрьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: viktor.potemkin2017@yandex.ru

Санова Людмила Александровна - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ludmila.sanova@gmail.com

Н.В. Зенкин, И.А. Варичкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СОЖ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Массовый характер использования смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в машиностроительных и металлообрабатывающих отраслях промышленности, постоянный рост торговли оборудованием для обработки металлов обуславливают необходимость применения СОЖ. Выбор СОЖ должен основываться на физико-химических и технологических свойствах и установленных для них областях рационального применения[1].

Смазочно-охлаждающие технологические жидкости являются обязательным элементом большинства технологических процессов обработки материалов резанием и давлением. Точение, фрезерование, сверление, шлифование и другие процессы обработки резанием сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов, неметаллических конструкционных материалов, штамповка и прокатка металлов характеризуются крупными статическими и динамическими нагрузками, высокими температурами, воздействием обрабатываемого материала на режущий инструмент, штамповочное и прокатное оборудование. В этих условиях основное назначение СОЖ — уменьшить температуру, силовые параметры обработки и износ режущего инструмента, штампов и валков, обеспечить удовлетворительное качество обработанной поверхности. Помимо этого СОЖ должны отвечать гигиеническим, экологическим и другим требованиям, обладать комплексом антикоррозионных, моющих, антимикробных и других эксплуатационных свойств. Применение СОЖ при обработке металлов резанием и давлением позволяет увеличить производительность оборудования, повысить точность обработанных поверхностей и снизить их шероховатость, уменьшить брак, улучшить условия труда и в ряде случаев сократить число технологических операций[2].

Проведение эксперимента по выявлению влияния различных видов СОЖ на шероховатость поверхности при фрезеровании.

С целью определения влияния различных видов СОЖ на шероховатость при фрезерной обработке, была проведена обработка на вертикально-обрабатывающем центре. При этом применялась концевая фреза $\varnothing 19$ мм с пластинами из твердого сплава. В качестве заготовки использовалась пластина из стали Ст3.



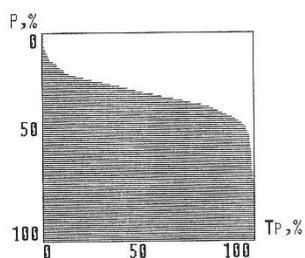
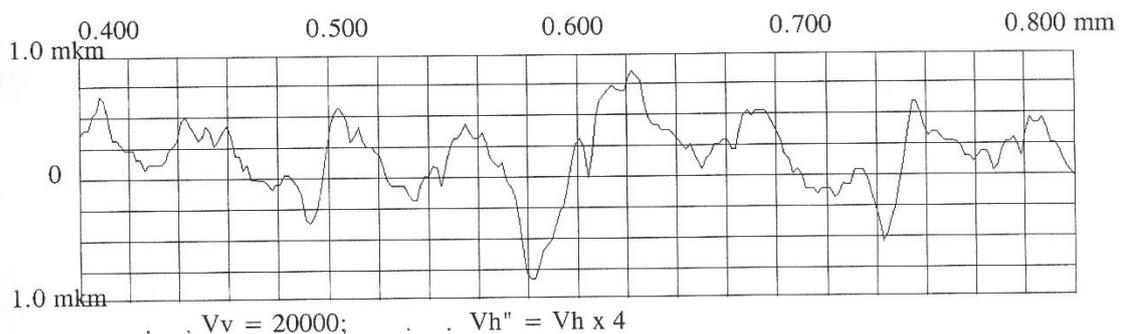
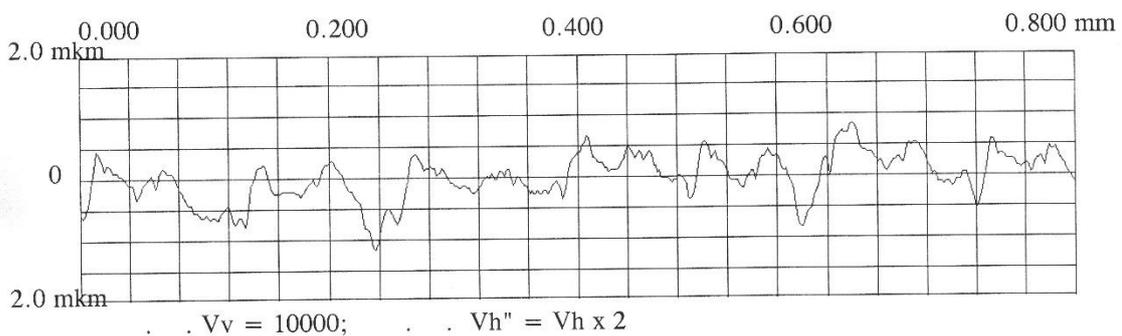
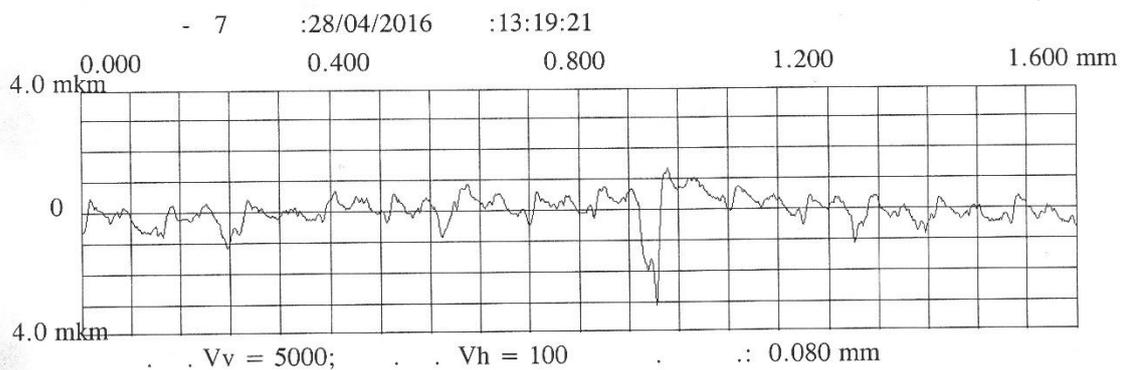
Рис. 1. Процесс обработки заготовки с использованием СОЖ

Эксперимент повторялся 4 раза с применением различных видов СОЖ: смазочно-охлаждающая жидкость марки FUCHS ECOCOOL 68 CF 2, масло, вода и без применения СОЖ. Обработка производилась в 2 этапа. Первый участок обрабатывался при величине подачи $S_1 = 0,02$ мм/зуб, а второй участок при величине подачи $S_2 = 0,06$ мм/зуб.



Рис. 2. Пример обработанного участка

После выполнения обработки и очистки заготовки, была измерена шероховатость (R_a) на всех участках обработки с помощью профилометра.



P, %	TP, %	P, %	TP, %
5	0,6	40	87,2
10	2,2	50	97,4
15	6,4	60	98,3
20	12,6	70	99,0
25	32,2	80	99,6
30	52,6	90	99,6

Ra = 0.303 mkm Rz = 1.676 mkm
 Rmax = 3.167 mkm Sm = 43.60 mkm

Рис. 3. Пример профилограммы участка обработки с СОЖ при подаче $S_2 = 0,06$ мм/зуб

На каждом участке измерения проводились по 3 раза, после чего было определено среднее значение шероховатости (Ra). Обработав данные, по-

лучились следующие значения шероховатости, при использовании различных видов СОЖ, в зависимости от подачи:

$S_1 = 0,02$ мм/зуб

$S_2 = 0,06$ мм/зуб

1. Вода – $R_a = 0,518$ мкм
2. Масло – $R_a = 0,620$ мкм
3. Без СОЖ – $R_a = 0,631$ мкм
4. С СОЖ – $R_a = 0,634$ мкм



1. СОЖ – $R_a = 0,307$ мкм
2. Масло – $R_a = 0,650$ мкм
3. Без СОЖ – $R_a = 0,688$ мкм
4. Вода – $R_a = 0,754$ мкм

Из результатов видно, что при подаче $S_1 = 0,02$ мм/зуб наименьшая шероховатость получилась при использовании воды в качестве СОЖ ($R_a = 0,518$ мкм). При использовании масла, СОЖ марки FUCHS и без применения смазочно-охлаждающей жидкости, результаты получились примерно одинаковые – $R_a \approx 0,63$ мкм.

При подаче $S_2 = 0,06$ мм/зуб ситуация кардинально изменилась. При использовании СОЖ марки FUCHS шероховатость оказалась в 2 и более раза ниже ($R_a = 0,307$ мкм), чем при использовании других видов СОЖ. При использовании масла и без применения СОЖ, шероховатость оказалась примерно одинаковой – $R_a \approx 0,65$ мкм. Хуже всего себя проявила вода, при использовании которой удалось добиться значения $R_a = 0,754$ мкм.

Стоит отметить, что использование масла в качестве СОЖ позволяет получить неплохие результаты, как при больших, так и при маленьких значениях подач.

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что использование СОЖ целесообразно только при больших значениях подач ($S = 0,06$ мм/зуб), что дает существенное улучшение шероховатости по сравнению с другими видами СОЖ. При низких значениях подач ($S = 0,02$ мм/зуб) использование СОЖ нецелесообразно, т.к. использование воды в качестве смазочно-охлаждающей жидкости позволяет получить более низкую шероховатость.

Список литературы

[1] Бердический Е.Г. *Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов*. Справочник. Москва, Машиностроение, 2004. – 58 с.

[2] Энтелис С.Г., Берлинер Э.М. *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием*. Справочник. Москва, Машиностроение 1986. – с. 115-117.

Зенкин Николай Васильевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Варичкин Иван Алексеевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivan.varichkin@rambler.ru

С.А. Бысов, Р.М. Юхимец

КОНЦЕНТРАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ И СБОРКИ КАК РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Неспособность производства к быстрой и эффективной перестройке на выпуск новых изделий не позволяет решать задачу быстрого реагирования на изменяющиеся условия. Современные гибкие производства решают такую задачу за счет применения широкоуниверсального и высокоавтоматизированного оборудования. Это является причиной их низкой эффективности, поскольку такое оборудование и его обслуживание стоит очень дорого, а его возможности в каждый момент времени используются не полностью. Очевидна необходимость поиска путей повышения эффективности использования, имеющегося на предприятиях производственного оборудования. Существует возможность применения металлорежущего оборудования для выполнения операций не связанных со снятием металла. Сюда можно отнести: навивание пружин на токарных станках [1], применение металлообрабатывающего оборудования для операций, связанных с поверхностно-пластическим деформированием [2], выполнение сборочных работ на металлообрабатывающих станках [3]. Каждый из приведенных примеров позволяет расширить технологические возможности имеющегося оборудования, так же сократить время производства изделия.

В частности, время, затраченное на перемещение детали на сборку и возвратное время сборочных единиц на станок с целью осуществления обработки в сборе, является непроизводительно затраченным временем и может достигать нескольких часов. В качестве примера рассмотрим технологический процесс изготовления изделия «Крышка генератора» (рис. 1).

Годовая программа выпуска такого типа изделий – 400 шт/год. Тип производства – серийный.

Технологический процесс включает:

- Изготовление втулки с обеспечением сопрягаемого размера $\varnothing 32_{p6}^{(+0.042/+0.026)}$
- Обработка крышки на токарном станке с ЧПУ 16К20Ф3 включая сопрягаемые поверхности: обработка отверстия под запрессовку втулки с обеспечением размера $\varnothing 32_{p6}^{(+0.025/+0.000)}$, предварительная обработка отверстия $\varnothing 140$.
- Установка осуществляется в трехкулачковый патрон по необработанным поверхностям.
- Сборка: запрессование втулки в крышку на ручном прессе с номинальным усилием 10 кН.

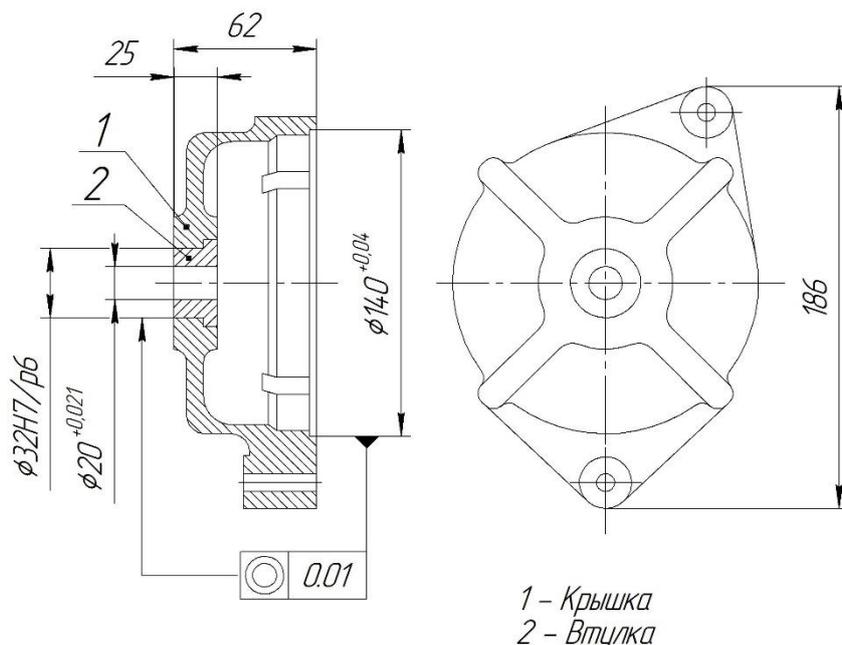


Рис. 1. Изделие «Крышка генератора»

- Доработка крышки генератора на токарном станке с ЧПУ: расточить отверстия $\varnothing 20$ ($^{+0.021}_{+0.000}$) и $\varnothing 140$ ($^{+0.04}_{+0.000}$) совместно для обеспечения требуемой соосности. Установка осуществляется в трехкулачковый патрон по необработанным поверхностям.

Затраты времени на осуществление технологического процесса изготовления «Крышки генератора» представлены в таблице 1.

Партия запуска N составляет 40 деталей.

Далее рассмотрим технологически процесс изготовления того же изделия с применением принципа концентрации операций металлообработки и сборки на одном станке. Разработанный технологический процесс включает:

- Обработка крышки на токарном станке с ЧПУ 16К20Ф3, включая сопрягаемые поверхности: обработка отверстия под запрессовку втулки с обеспечением размера $\varnothing 32$ р6 ($^{+0.025}_{+0.000}$), предварительная обработка отверстия $\varnothing 140$.
- Сборка: запрессование заранее изготовленной втулки в крышку на токарном станке с ЧПУ посредством исполнительных механизмов станка
- Доработка крышки генератора на токарном станке с ЧПУ: расточить отверстия $\varnothing 20$ ($^{+0.021}_{+0.000}$) и $\varnothing 140$ ($^{+0.04}_{+0.000}$) совместно для обеспечения требуемой соосности. Установка осуществляется в трехкулачковый патрон по необработанным поверхностям. Обработка и сборка осуществляются на одном станке.

Таблица 1. Основные затраты времени по операциям технологического процесса изготовления «Крышки генератора»

Операция – Токарная с ЧПУ		
Станок – 16К20Ф3		
Содержание операции – обработка крышки		
$T_{пз}$	17,5	Время подготовительно-заключительное
t_o	1,45	Время автоматического цикла обработки
t_b	2,5	Вспомогательное время
$t_{тр}$	2,6	Время транспортировки
Операция – Запрессование		
Оборудование – Ручной пресс		
Содержание операции – запрессование втулки в крышку		
$T_{пз}$	6,5	Время подготовительно-заключительное
t_o	1	Время автоматического цикла обработки
t_b	3,05	Вспомогательное время
$t_{тр}$	2,6	Время транспортировки
Операция – Токарная с ЧПУ		
Станок – 16К20Ф3		
Содержание операции – доработка втулки и крышки совместно		
$T_{пз}$	15,7	Время подготовительно-заключительное
t_o	2,14	Время автоматического цикла обработки
t_b	2,8	Вспомогательное время

Таблица 2. Основные затраты времени технологического процесса изготовления «Крышки генератора» на основе принципа концентрации операций

Операция – Токарная с ЧПУ		
Станок – 16К20Ф3		
Содержание операции – обработка крышки, запрессование втулки посредством продольной подачи станка, доработка крышки в сборе.		
$T_{пз}$	23,5	Время подготовительно-заключительное
t_o	3,8	Время автоматического цикла обработки
t_b	2,5	Вспомогательное время

Таким образом, на основании приведенных данных, видно, что суммарное время обработки сократилось на 51%. Кроме сокращения затрат времени на производство изделия, концентрация операций металлообработки и сборки позволяет исключить потребность в применении специального сборочного оборудования и как следствие необходимость переустановки детали, что влечет за собой исключение погрешности установки детали при сборке и доработке готового изделия. Для наглядности на рис. 2 представлена временная диаграмма сравнения двух технологических процессов.

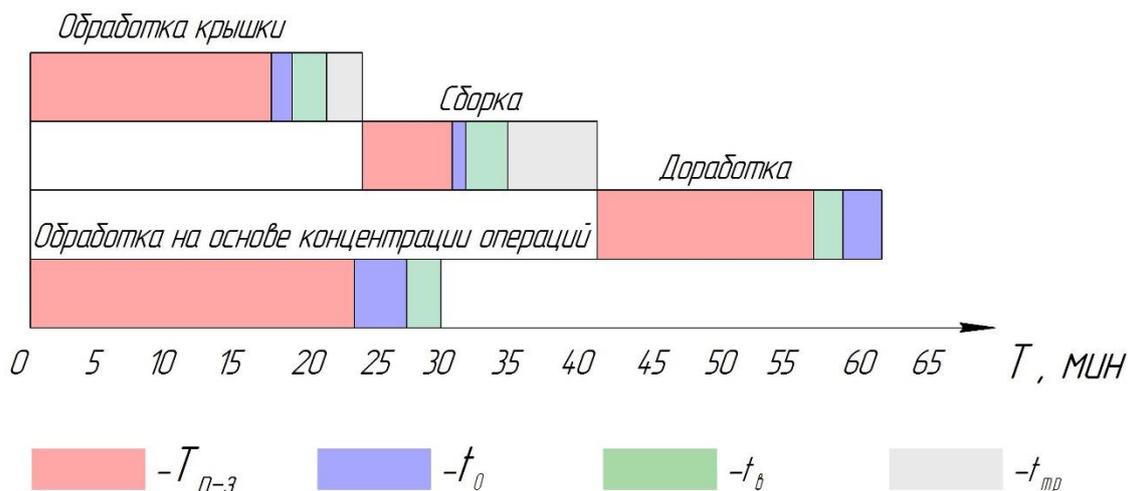


Рис. 2 Временная диаграмма сравнения двух вариантов технологического процесса изготовления изделия «Крышка генератора»

Список литературы

[1] Малышев Е.Н., Малышев А.Н. Повышение эффективности использования обрабатывающего оборудования путем расширенной реализации его технологических возможностей // Инженерный вестник. — 2012. — №8. — С. 1-7.

[2] Лукьянов А.А. Практика внедрения технологии обработки поверхностно-пластическим деформированием путем модернизации оборудования // Технические науки-от теории к практике. —2013. №28. — С. 7-12.

[3] Малышев Е.Н., Бысов С.А. Обоснование принятия решения о концентрации обработки и сборки на одном станке // Сборка в машиностроении приборостроении. — 2010. —№11. — С. 41-17.

[4] Базров Б.М., Демин А.Б. Определение технологических возможностей станка. Вестник машиностроения, 2007, №3, С. 47-50.

[5] Новиков М.П. Основы технологии сборки машин.—М.: Машиностроение, 1980. —586 с.

[6] Бысов С.А., Юхимец Р.М. Научное развитие технологий в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 19–21 апреля 2016 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – С. 4-7

Бысов Сергей Александрович - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии машиностроения" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Юхимец Роман Михайлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: LeoBonart10@yandex.ru

И.Н. Исаков

МЕТОД СМЕЩЕНИЯ КООРДИНАТ НА ТОКАРНЫХ АВТОМАТАХ ПРОДОЛЬНОГО ТОЧЕНИЯ С ЧПУ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Токарным автоматом называют особый станок, обработка деталей на котором производится без участия рабочего. Стоит оборудование этого типа дороже обычного. Однако и в использовании считается более удобным. Все операции на таких станках производятся в автоматическом режиме. Рабочий следит лишь за загрузкой заготовок и осуществляет контроль качества изготовленных деталей.

Токарные автоматы имеют гораздо большую производительность, чем обычные станки. Поскольку частые их переналадки ведут к потере производственного времени, используют это оборудование обычно на крупносерийных производствах. Кроме того, поскольку стоит такое оборудование довольно-таки дорого, применять его целесообразно только в том случае, если имеется необходимость в изготовлении деталей очень сложных форм с большим количеством переходов [1].

Для токарного автомата продольного точения с ЧПУ была рассмотрена параметрическая оптимизация технологического процесса обработки с использованием метода смещения системы координат.

В токарных автоматах продольного точения заготовка закрепляется с помощью трех цанг. Шпиндельная цанга зажимает заготовку, люнетная поддерживает, цанга устройства подачи заготовки фиксирует конец прутка для его перемещения.

В паспорте любого токарного автомата прописана максимальная длина обработки, т.е. величина хода шпинделя по продольной оси. В зависимости от типа выбранного станка эта величина может быть 40 мм, 180 мм или 200 мм [2]. Однако возникают ситуации, когда необходимо обработать деталь, длина которой превышает указанные параметры.

Чтобы добиться обработки детали большей длины, предлагается изменить стандартную схему работы станка (рис.1, рис. 2).

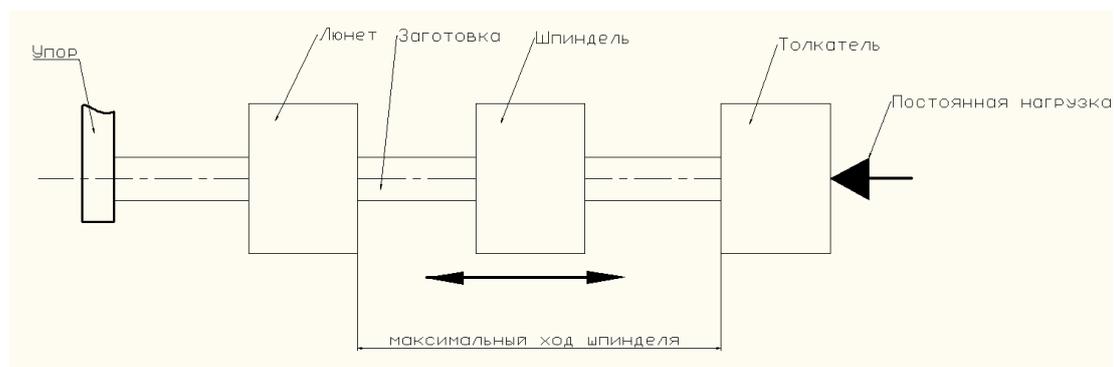


Рис. 1. Паспортная схема работы токарного автомата

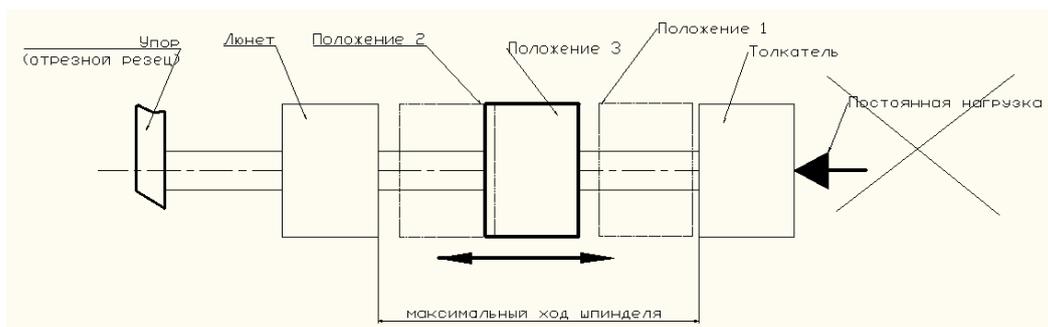


Рис. 2. Предлагаемая схема работы станка

Был разработан специальный программный модуль, отключена система подачи прутка, вместо упора использовался инструмент, который последним работает в цикле.

Это позволило разжимать цангу шпинделя до окончания цикла обработки.

Шпиндель отводится в крайнее положение (положение 1), которое фиксируется системой ЧПУ с помощью специальной команды, зажимается цанга, отводится отрезной резец, ведется обработка на максимальный ход шпинделя (положение 2), затем останавливается вращение, разжимается шпиндель и отводится на какую-то величину (положение 3).

После специальной команды система ЧПУ начинает считать это положение промежуточной точкой обработки (СМЕЩАЕТСЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ), зажимает цангу и ведет обработку далее.

Также данный метод позволяет обрабатывать детали имеющие длину, во много раз превосходящую диаметр (например, Ø1 мм на длину 50 мм), без риска, что заготовку начнет изгибать при вращении или вытянет из люнета.

Кроме того, исследования показали, что регулируя усилие зажима люнетной цанги возможно использовать метод смещения системы координат без отключения устройства подачи заготовки.

В заключение можно сказать, что используя метод смещения системы координат на токарных автоматах продольного точения с ЧПУ, удастся значительно расширить номенклатуру деталей, обрабатываемых на выбранном оборудовании.

Список литературы

[1] Волчков И.Л. Автоматизация производственных процессов// Учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2005. - 380 с.

[2] Ладыгина А.В. Особенности обработки мелкогабаритных деталей на автоматах продольного точения с ЧПУ// Исследования наукограда. Железногорск, 2013. - С. 22-25.

Исаков Иван Николаевич - ведущий инженер технолог АО "Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова". E-mail: isakovin2016@yandex.ru

М.В. Мусохранов, Ю.А. Савина

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ АНАЛИЗА ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассматривая процессы, протекающие в поверхностных слоях деталей машин, необходимо оценить параметры, которые характеризуют их состояние и по изменению которых можно судить о происходящих явлениях. Эта задача достаточно сложна, как из-за необходимости использовать большое число показателей, так и вследствие их разнообразия по своей физической природе.

Необходима теория, которая установит связи между технологией изготовления деталей, и процессами, протекающими в поверхностных слоях в ходе контакта двух поверхностей, и которая позволит в дальнейшем предсказывать характер контакта поверхностей деталей еще на стадии проектирования машины, т.е. создавать поверхности с наперед заданными свойствами [1].

Одним из рассматриваемых показателей является поверхностная энергия. В настоящее время известны несколько методов измерения поверхностной энергии твердых тел, но некоторые из них не могут быть использованы на производстве, имеют большую погрешность и требуют наличие большого количества лабораторных образцов. Оптимальным методом является метод, основанный на определении работы выхода электрона.

На уровень работы выхода электрона (РВЭ) оказывают влияние структурные превращения в поверхностном слое контактирующих деталей: искажения и разрушения кристаллических решеток, процесс легирования и др. При контактировании деталей происходит перераспределение электронной плотности. Чем больше значение РВЭ, тем больше энергетический потенциал поверхности [2]. Поверхностная энергия определяется из взаимосвязи контактной разности потенциалов и разности работ выхода электронов эталона и контролируемой детали.

Данный метод, несомненно, наиболее удобен для внедрения в технологический процесс машиностроительных предприятий. Это обусловлено экономичностью оборудования, возможностью исследовать непосредственно детали и не требует нагрева до температур, близких к температурам плавления или рекристаллизации. Кроме того, данный метод относится к неразрушающим. Метод также претендует на самую высокую точность.

Для определения зависимости между технологическими операциями, режимами резания и поверхностной энергией необходимо знать шероховатость поверхности [3]. Шероховатость поверхности можно измерить с помощью профилограф-профилометра «АБРИС-ПМ7».

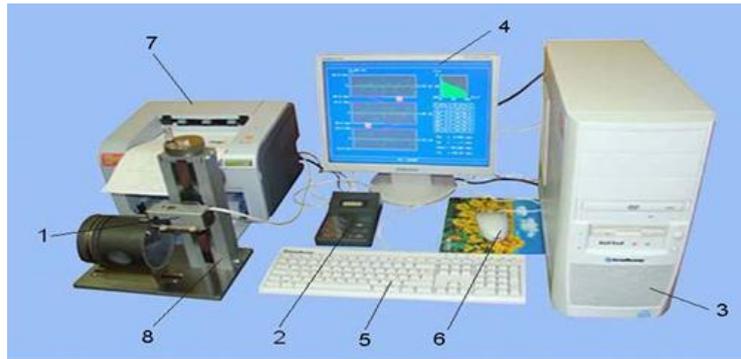


Рис. 1. Внешний вид стационарного комплекса «Абрис ПМ7»:
 1 – первичный преобразователь, 2 – отсчетное устройство,
 3 – системный блок, 4 – монитор, 5 – клавиатура, 6 – мышь,
 7 – печатающее устройство, 8 – стойка приборная

При непосредственном методе получения информации о шероховатости поверхности в качестве щупа используют остро заточенную иглу, как правило, алмазную с небольшим радиусом закругления 2...10 мкм, поступательно перемещающуюся по определенной трассе относительно поверхности [4]. Ось иглы располагают по нормали к поверхности. Опускаясь во впадины, а затем, поднимаясь на выступы во время движения ощупывающей головки по испытуемой поверхности, игла колеблется относительно головки соответственно огибаемому профилю. Механические колебания иглы преобразуются в электрические сигналы при помощи индуктивных, емкостных, пьезоэлектрических и других преобразователей того или иного типа. Снятый с преобразователя полезный сигнал усиливают, а затем определяют его параметры, характеризующие неровности исследуемой поверхности.

Данный прибор предназначен для визуального и графического отображения результатов измерения шероховатости на мониторе, их статистической обработки с помощью персонального компьютера и выводом результатов на печать.

В ходе эксперимента с помощью данного прибора измеряли шероховатость восьми образцов различных марок материала. На рис. 2 приведены данные полученные в результате измерений на приборе «Абрис ПМ7»:

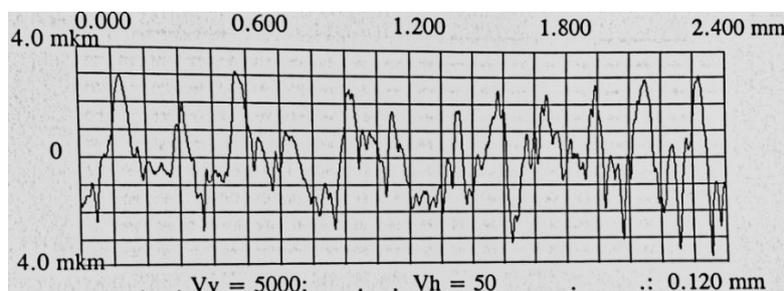


Рис. 2. Шероховатость образца марки Д16Т (40 НРВ) обработанного без СОЖ

Д16Т без сож	0			У	120			У	240			У	Общий
	У1	У2	У3	сред	У1	У2	У3	сред	У1	У2	У3	сред	У средн
1	0,616	0,606	0,615	0,612333	0,744	0,737	0,746	0,742333	0,755	0,756	0,754	0,755	0,703222
2	1,571	1,569	1,565	1,568333	1,627	1,623	1,62	1,623333	1,537	1,529	1,515	1,527	1,572889
3	0,73	0,706	0,705	0,713667	0,56	0,58	0,583	0,574333	0,649	0,653	0,651	0,651	0,646333
4	1,556	1,563	1,584	1,567667	1,663	1,664	1,651	1,659333	1,649	1,651	1,642	1,647333	1,624778

Рис. 3. Обработка данных в EXCEL

После проведения эксперимента необходимо обработать все полученные результаты. Математическая обработка включает два принципиально разных направления: детерминированную обработку результатов измерений и статистическую обработку.

Под статистической обработкой результатов измерений подразумевается обработка результатов многократных прямых измерений одной и той же физической величины. Их также называют «измерения с многократными наблюдениями» или «серия измерений». Подготовка массива результатов наблюдений (многократных измерений) к статистической обработке заключается в «исправлении результатов измерений». Задача-минимум состоит в исключении из результатов измерений переменных систематических составляющих, задача-максимум – в исключении всех систематических составляющих [5]. Статистическая обработка используется для повышения точности измерений с многократными наблюдениями, а также определения статистических характеристик случайной погрешности. В качестве точечной оценки результата измерения при измерении с многократными наблюдениями принимают среднее арифметическое значение результатов рассматриваемой серии, полученное после исправления результатов наблюдений.

Таким образом, с помощью данного эксперимента можно определить зависимость между режимами резания, технологическими операциями и поверхностной энергией с учетом микрогеометрии поверхности деталей.

Список литературы

- [1] Семенченко, В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. - М., Гостехиздат, 1957.
- [2] Мусохранов, М.В., Антонюк, Ф.И., Калмыков, В.В. Поверхностная энергия и процесс схватывания контактирующих поверхностей // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. – 2014. – № 11. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/737377.html> (дата обращения: 11.10.2016)
- [3] Гегузин, Я.Е., Овчаренко, Н.Н. Поверхностная энергия и процессы на поверхности твердых тел. – УФН 73, 1962. — с.283–328.
- [4] Дерягин, Б.В., Кротова, Н.А., Смилга, В.П. Адгезия твердых тел – М.: Наука, 1973. — 421 с.
- [5] Ящерицын П.И., Зайцев А.Г. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. - Минск: Наука и техника, 1976. — 328 с.

Мусохранов Марсель Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marls77@ya.ru

Савина Юлия Александровна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ulia1158@yandex.ru

А.Ю. Андросов, В.Е. Хайченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современные методы цифрового моделирования в полной и наиболее качественной мере позволяют реализовать требуемые характеристики выполняемой отливки, учитывая комплексность влияющих на ее воспроизводство условий: термохимических, формообразующих, молекулярно-физических, а также влияние литейной формы на характер и свойства будущей отливки. Применяемое программное обеспечение выполняет роль точного расчета конструктивных параметров операций технологического процесса литья совместно со строго выполняемым их моделирующим алгоритмом в компьютерной системе «САПР».

Упростить, конкретизировать и автоматизировать необходимые литейные операции с точностью до нюансов стало возможным с применением интегрированных проектировочных пакетов моделирования, к которым относятся следующие программы: «Poligon», «LVMFlow» (Россия); «ProCast», «SolidCast» (Америка); «MAGMASoft», «WinCast» (Германия). Функционал данных математических визуализационных систем включает в себя анализ и моделирование технологических этапов производства, таких как заливка расплавленного металла в форму, начало и конец процесса его кристаллизации, мониторинг мест образования усадочных раковин, напряжений, конкретизация необходимости удаления литников и проведения последующей термообработки, а также контроль остаточных напряжений готового продукта (рисунок 1).



Рис. 1. Пример визуализации литейных операций

Реализация заложенного потенциала данных программ осуществляется путем оптимизации режимов процесса заливки и кристаллизации расплава (рисунок 2), расчета геометрии и термо-анализа пресс-форм, функционального подбора литниковой системы, аналитического заключения структуры и физико-механических параметров отливки, расчета остаточных напряжений и деформаций.

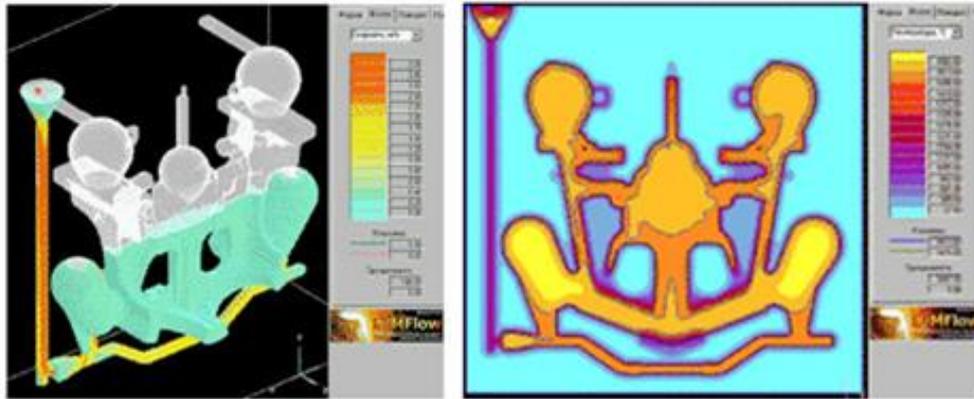


Рис. 2. Моделирование процессов заливки и кристаллизации расплава

Используемые модуляционные пакеты по своим функциональным возможностям классифицируются по величине объема данных, задействованных при проектировании технологического процесса, стоимости программного обеспечения, а также способам их полноценной работы, т.е. способам вывода и решения рабочих математических задач, т.к. уравнения температурного и физического переноса (переноса вещества) могут быть представлены как в дифференциальной, так и интегральной форме.

Нынешняя ситуация компьютерного моделирования технологических операций в литейной индустрии российских предприятий связывает себя с двумя моделирующими пакетами: «Poligon» и «LVMFlow». Данные программы в своей сущности используют разные проектировочно-математические методы моделирования: метод конечных разностей и метод конечных элементов.

Используемый метод конечных разностей («МКР») базируется на аналитическом варианте решения дифференциальных зависимостей физических величин литейных операций. Аналитический подход заключается в записи данного решения дифференциального уравнения путем аппроксимационного ряда с заданной степенью точности. Графически такое решение иллюстрируется в виде пространственной сетки (заданной поверхности формы). Метод позволяет факторизовать математические операторы, т.е. заменить решение многомерной задачи на вычисление нескольких иных – арифметических (разностных) задач, что значительно повлияет на скорость решения систем уравнений и, следовательно, на получения необходимого результата. Ограниченностью возможностей метода является неточная аппроксимация форм модулируемой отливки, т.к. степень ее точности зависит от длины задаваемого математического ряда. Данный недостаток может существенно сказаться лишь для визуализации процессов гидродинамики, что нельзя заметить в термомеханических и физических зависимостях. Равным образом при выполнении тонкостенных отливок функционал данного метода может не дать качественного результата, если минимизация величины слоя стенки приведет к ее эквивалентности шагу дифференциальной сетки.

Отличный от «МКР» метод конечных элементов («МКЭ») основывается на термомеханических зависимостях, а также функциях переноса вещества, запрограммированных в интегральном виде. Решение задачи представляется возможным, разделив диапазон решения на отдельные участки. В данных участках задаются аппроксиманты основных необходимых для учета зависимостей. В последствии отображения интегральных зависимостей на данные зоны, получают разностную систему интегральных уравнений, которая хоть и запутаннее ранее изложенной системы «МКР», но приоритетнее в применении из-за точности аппроксимации форм моделируемого объекта.

В зависимости от степени приближенности моделирования к реальности выполняемых процессов, а также количества обрабатываемых данных возникает проблема альтернативы касательно прикладного использования того или иного визуализационно-проектировочного пакета. Выбор не столь очевиден, т.к. преимущества и недостатки той или иной программы существенно зависят от локального вида ситуации, а, например, при расчете и моделировании линейных форм объектов (поверхностей заданных линейной функциональностью) как метод конечных разностей, так и конечных элементов показывают одинаковый результат выполненной работы.

Различия между конкурирующими технологиями (рисунок 3) проявляются при столкновении с модуляцией поверхностей со сложной геометрией формы (поверхности второго порядка, поверхности вращения, скульптурные поверхности).

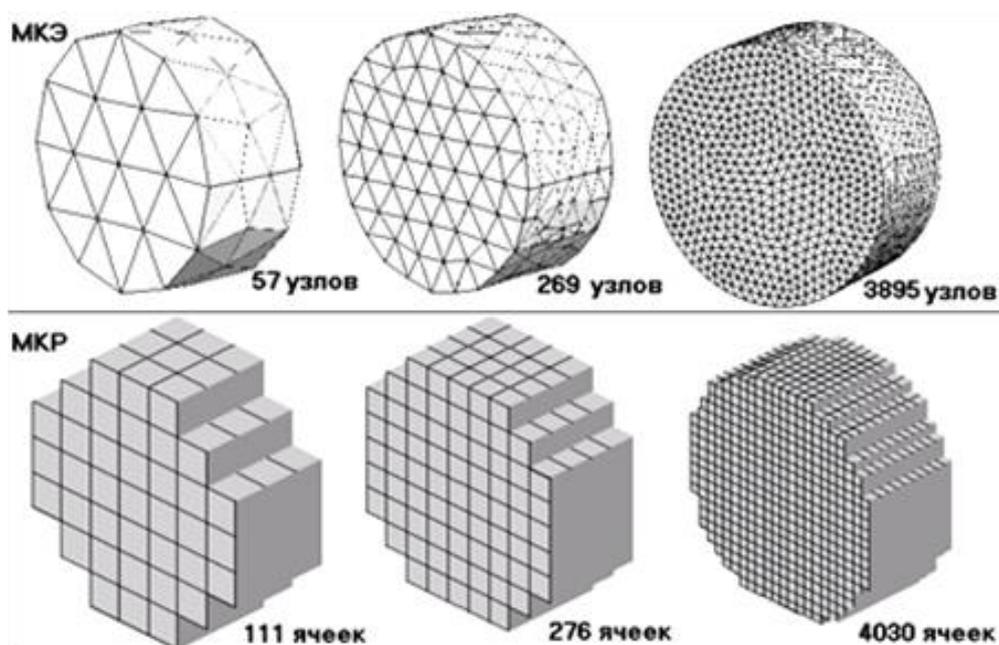


Рис. 3. Пример визуализации поверхности цилиндрической формы альтернативными методами «МКЭ» и «МКР»

Наиболее эффективным в данной потребности выполнения расчета является метод конечных элементов, который наиболее точно разбивает данную поверхность на микро-участки, вписывая в них геометрические элементы, которые в отличие от «МКР» не обязательно располагаются ортогонально друг к другу, а располагаются свободным образом, так как это требуется (параболически, гиперболически и т.д.). Интегральные функции служат не только для аппроксимации геометрии отливки, а также параллельно программируют заданные физические величины (температуру, давление, текучесть) в любой точке заготовки (рисунок 4).



Рис. 4. Пример аппроксимации функциональной зависимости методами «МКР» и «МКЭ»

В этом и состоит главное отличие от дифференциального метода конечных разностей, т.к. в отличном случае все необходимые характеристики определяются лишь в основных узловых точках поверхности.

Таким образом довольно понятным становится факт более глубокого и точного анализа форм и параметров объекта методом конечных элементов, в результате чего формируются ключевые преимущества данной технологии: формы модулируемой поверхности носят независимый от программного обеспечения характер, возможность определения механических и физических величин в каждой точке поверхности, допустимость одновременного геометрического и физического проектирования процессов литья, качественная оценка послеоперационных параметров отливки.

К недостаткам метода конечных элементов, по сравнению с «МКР» стоит отнести длительность выполнения расчетных действий из-за сложности кодировки функциональных зависимостей, повышенные мощностные характеристики требуемой вычислительной техники и объемы необходимых накопителей информации, а также трудность освоения и оперирования программным обеспечением данного метода в связи с его объемным функ-

ционалом: необходимость правильного подбора формы отливки, правильное зонирование интегральной области, правильность определения границ криволинейных поверхностей и т.д., в противном же случае результат выполненных операций может отличаться качественным уровнем продукта.

Таким образом, делая вывод, следует акцентировать внимание в альтернативности подхода процесса моделирования технологического процесса литейного производства: сложнотехнологические способы проектирования («МКЭ») геометрии отливки, ее механических параметров, выявления дефектов и т.д. дают полноту результата в том случае, если применение упрощенных программ («МКР») мало эффективно из-за ограниченности своего потенциала. В итоге синхронно-заменяемое использование различных технологий производства ведет к минимизации брака отливок, а также скорости и точности их изготовления, что в конечном итоге делает продукцию более качественной.

Список литературы

[1] *Абрамов А.А., Бройтман О.А., Тихомиров М.Д.* Применение компьютерного моделирования при разработке технологий изготовления отливок из алюминиевых сплавов / *А.А. Абрамов, О.А. Бройтман, М.Д. Тихомиров.* – М.: Изд-во «Литейное производство». – 2006, № 11, с. 31-34.

[2] *Тихомиров М.Д.* Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача / *М.Д. Тихомиров.* – М.: Изд-во «Литейное производство». – 1998, № 4, с. 30-34.

[3] *Тихомиров М.Д., Комаров И.А.* Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей? / *М.Д. Тихомиров, И.А. Комаров.* – М.: Изд-во «Литейное производство». – 2002, № 5, с. 22-28.

[4] *Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Абрамов А.А.* Физико-математические основы компьютерного моделирования литейных процессов. Система моделирования «Полигон»: Сб. ЦНИИ Материалов – 90 лет в материаловедении. Юбилейный выпуск / *М.Д. Тихомиров, Д.Х. Сабиров, А.А. Абрамов.* – СПб., 2002, с. 151-176.

[5] *Тихомиров М.Д.* Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов: Материалы научно-практического семинара «Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности» / *М.Д. Тихомиров.* – СПб., 2004, с. 14-28.

[6] *Тихомиров М.Д.* Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования / *М.Д. Тихомиров.* – М.: Изд-во «Литейное производство». – 2004, № 5, с. 24-30.

Андросов Алексей Юрьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: armogen99@gmail.com

Хайченко Виктор Ефимович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kniizst2012@yandex.ru

А.В. Волков, И.К. Устинов

О КРИТЕРИЯХ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В процессе анализа литературных источников по расчетному определению сил резания при точении установлено, что авторы работ весьма редко указывают сведения о точности или погрешности определения усилий резания [3-9]. Это может быть связано, как с высокой сложностью используемых алгоритмов, - недостаточным развитием базовых теоретических положений, используемых в их основе, - недостаточной точностью самих расчетных и экспериментальных формул, так и с иными причинами. Целью данной работы является выбор критериев адекватной оценки погрешностей расчета и измерения усилий резания.

Не представляет сомнений, что критерием адекватной оценки погрешностей, в том числе расчета и измерения усилий резания, может являться только уточненный критерий, разработанный на базе теории вероятностей и математической статистики при использовании теории измерений [1,2]. Это связано со значительным разнообразием и сложностью аналитических и экспериментальных алгоритмов, на основе которых разрабатываются формулы расчета и определения усилий резания [3-9]. В то же время большинство аналитических формул в данной области не ординарны и связаны с использованием массивов экспериментальных данных, содержат значительное количество не стандартизованных констант и коэффициентов [3-9], потому даже некоторая имеющаяся возможность расчета погрешностей для части формул не позволяет надеяться на адекватную сравнимость их точности без применения стохастических методов обработки получаемых результатов [1].

Известно, что в металлообработке, как и вообще в технике, методическое качество средств и результатов измерений характеризуют указанием их погрешностей. Виды проявления и причины возникновения погрешностей как средств, так и результатов измерений весьма разнообразны, потому на практике используют различные разновидности погрешностей, среди которых нас будут интересовать следующие [2]:

1. *Абсолютные погрешности* Δ_x или Δ_y — оценки абсолютной ошибки измерения. Если случайная величина распределена по *нормальному закону*, то обычно за абсолютную погрешность принимают ее *среднеквадратичное отклонение* – σ (с.к.о.).

2. *Относительные погрешности* — погрешности измерения, выраженные отношением абсолютной погрешности к действительному или измеренному значению измеряемой величины, - понятие, введенное для ха-

рактические характеристики точности результатов измерения — $\gamma = \Delta_x / x \approx \Delta_y / y$, выражаемое в относительных единицах или в процентах (где x и y — текущие значения входной и выходной величин). *Относительные приведенные погрешности* $\gamma_{пр}$ — погрешности, выраженные отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона.

3. *Инструментальные (приборные) погрешности* — погрешности, которые определяются погрешностями применяемых *средств измерений* и вызываются несовершенством принципа действия, неточностью *градуировки шкалы*, ненаглядностью прибора.

4. *Методические погрешности* — погрешности, обусловленные несовершенством метода, а также упрощениями, положенными в основу методики.

5. *Случайные погрешности* — т.е. все погрешности, меняющиеся (по величине и по знаку) от измерения к измерению и описание которых может быть осуществлено только статистически.

Новицкий П.В. и Зограф И.А. справедливо отмечают [2], что применение методов математической статистики к обработке результатов измерений правомерно только в предположении независимости отдельных получаемых отсчетов, условия непрерывности и независимости для случайных погрешностей соблюдаются (а иногда могут и не соблюдаться) лишь приближенно, т.е. термин «непрерывная случайная величина» в математике существенно более узкое понятие, чем термин «случайная погрешность» в измерительной технике. Именно поэтому [2]: - «... *единственным возможным разработанным способом обработки получаемых экспериментальных данных, содержащих случайные погрешности, является использование методов математической статистики*».

Известно, что для оценки величины разброса случайных погрешностей относительно центра распределения, на практике используются различные приемы, приводящие к существенно разным результатам. В этом контексте нас будут интересовать *квантильные оценки случайной погрешности* [2]. Площадь, заключенная под кривой плотности распределения, согласно правилу нормирования, равна единице, т.е. отражает вероятность всех возможных событий. Эту площадь можно разделить на некоторые части вертикальными линиями. Абсциссы таких линий называют *квантилями* [2]. Медиана — это 50% - ная квантиль, так как она делит площадь под кривой $p(x)$ на две равные части.

Так как квантили, ограничивающие доверительный интервал погрешности, могут быть выбраны различными, то при сообщении такой оценки должно обязательно указываться и значение принятой *доверительной вероятности* P_d . Удобнее всего для этого обозначение доверительной погрешности снабжать индексом, численно равным принятой доверительной вероятности, т.е. писать, например $\Delta_{0,9}$ при $P_d = 0,9$, $\Delta_{0,95}$ при $P_d = 0,95$ и т.д. [2].

Известно, что в разных областях знаний используют различные значения доверительной вероятности, равные 0,5; 0,8; 0,9; 0,95 и 0,99 [2].

Погрешность $\Delta_{0,9}$ обладает уникальным свойством, т.к. для широкого класса наиболее употребительных законов распределения вероятностей она имеет однозначное соотношение с с.к.о. в виде $\Delta_{0,9} = 1,6\sigma$ вне зависимости от вида закона распределения [2]. При $F(x) > 0,95$, т.е. при $P_D > 0,9$ интегральные кривые для разных законов распределения резко расходятся между собой, и производить их усреднение не имеет смысла [2]. Потому при обработке экспериментальных данных некорректно пользоваться вероятностями $P_D > 0,9$ без знания о полученном законе распределения погрешностей [2]. По экспериментальным данным легко определить значение Δ_D лишь с доверительной вероятностью $P_D \leq 0,95$, ($n \approx 80$), а определение $\Delta_{0,99}$ или $\Delta_{0,997}$ практически трудноосуществимо (нужно $n \gg 400 - 1333$) [2]. Т.е. число отсчетов n , необходимое для определения по экспериментальным данным Δ_D с заданной вероятностью P_D (при числе отброшенных отсчетов $n_{отб} = 1$) таково [2]:

Таблица 1

P_D	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	0,997
n	20	40	80	200	400	800	1333

Новицкий П.В. и Зограф И.А. отмечают, что [2]: - «очень часто доверительные погрешности рассчитывают, вводя ничем не обоснованное предположение о том, что вид закона распределения погрешностей будто бы точно известен. В частности, используют прием, заключающийся в вычислении по небольшой выборке в 20—30 отсчетов оценки с.к.о. σ , а затем указывают погрешность с доверительной вероятностью $P_D = 0,997$, равную $\Delta_{0,997} = 3\sigma$ на основании предположения о нормальности закона распределения». Т.е. фактически, если исследователями выбирается 5-14 измерений для обработки, — это заведомо снижает доверительную вероятность получаемых результатов до $P_D < 0,8$ (стр. 52 [2]).

В настоящее время практически не известны результаты оценки точности трудо- и материалоемких операций обработки металлов резанием при числе измерений более 5-14, прежде всего из-за значительных затрат на эксперименты [3-9]. Таким образом, реально получить доверительную вероятность $P_D \geq 0,8$ при опытах в металлообработке весьма проблематично.

В связи с тем, что различные исследователи в области металлообработки используют как понятия погрешности, так и понятие корреляции, рассмотрим их соотношение.

Если при изменении величины x другая величина y изменяется так, что каждому значению x_i соответствует совершенно определенное значение y_i , - это однозначно функциональная связь. На практике, например, для случая линейной зависимости на графике экспериментальных данных такая связь может явно просматриваться, но строгого соответствия между x_i и y_i не иметь. Т.е. одному и тому же значению x_i в разных реализациях могут соответствовать различные значения y_i в некотором интервале $L_{\Delta y}$, т.е. полосе неопределенностей [3]. Подобные нежесткие линейные связи величин в теории вероятностей называются корреляционными [3]. Теснота корреляционной связи может быть оценена относительной вытянутостью поля экспериментальных точек, т.е. отношением ширины полосы точек $L_{\Delta y}$ вдоль оси y к протяженности всего поля L_y вдоль той же оси [2]. В теории измерений $N = L_y / L_{\Delta y}$ понимается как число различимых градаций измеряемой величины [2]. В теории вероятностей каждый из размеров L_y и $L_{\Delta y}$ принято характеризовать, соответственно, значением с.к.о. отдельных точек от их среднего арифметического значения \bar{y} в виде σ_y и с.к.о. отдельных точек от линии $y = kx$ в виде $\sigma_{\Delta y}$ [2].

Уровни коэффициентов корреляции обычно делятся на два поддиапазона - слабой и сильной корреляции, например, значение ρ , большее 0,9 – 0,96 однозначно относится к сильной корреляции. Граница между уровнями корреляционной связи определяется по равенству мощностей сигнала и шума, т.е. соответствует $\rho = \sqrt{0,5} \approx 0,7$ [2]).

Используемая в техническом моделировании приведенная погрешность γ_{np} - это отношение половины ширины полосы неопределенности $L_{\Delta y} / 2$ к длине диапазона L_y , т.е. $\gamma_{np} = L_{\Delta y} / (2L_y) = 1 / (2N)$. Она является негативной характеристикой тесноты корреляционной связи. В теории вероятностей для той же цели используется позитивная оценка в виде коэффициента корреляции ρ [2]:

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + (\sigma_{\Delta y} / \sigma_y)^2}}$$

Учитывая, что при измерениях погрешность составляет, как правило, единицы или доли процента, т.е. $\sigma_{\Delta y} \ll \sigma_y$, практически можно пользоваться приближенным соотношением [3]:

$$\rho = \sqrt{1 - (\sigma_{\Delta y} / \sigma_y)^2} = \sqrt{1 - (2\gamma)^2}$$

Таким образом, коэффициент корреляции ρ и приведенная погрешность γ_{np} — это два понятия, характеризующие одно и то же свойство, и потому они находятся в строгом соответствии между собой и могут равноправно использоваться для характеристики этого свойства [2].

Мы полагаем, что использование материала данной работы при изучении погрешностей расчета и определения сил резания позволит обеспечить адекватное сравнение и оптимизацию имеющихся алгоритмов расчета, что даст возможность углубленного анализа положений теории резания и придания нового импульса практической реализации оптимизированных не только по величине, но и по точности алгоритмов определения усилий резания.

Выводы:

1. Реальная величина доверительной вероятности при трудо- и материалоёмких опытах в обработке материалов резанием фактически не превышает $P_d \leq 0,8$, (при $n \leq 20$). Потому возможно ограничиться данной величиной при оценке реальной точности экспериментов в металлообработке.

2. Использование материала данной работы при оценке погрешностей расчета и определения сил резания позволит обеспечить адекватное сравнение и оптимизацию имеющихся алгоритмов расчета, что даст возможность углубленного анализа положений теории резания и придания нового импульса практической реализации оптимизированных не только по величине, но и по точности алгоритмов определения усилий резания.

Список литературы

[1] Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. — М.: Высшая школа, 2002. — 348 с.

[2] Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. — 304 с.

[3] Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С., Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, — 448 с.

[4] Верещака А.С. Резание материалов: Учебник/А.С. Верещака, В.С. Кушнер. — М.: Высш. шк., 2009. — 535 с.

[5] Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием: учебное пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. — Ростов н/Д : Феникс, 2008. — 411 с.

[6] Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. — 640 с.

[7] Грубый С.В. Методы оптимизации режимных параметров лезвийной обработки: Учеб. пособие. — М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. — 96 с.

[8] Волков А.В. «Возможности коэффициента резания при точении». Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 134-143.

[9] E.M. Trent, P.K. Wright, Metal Cutting. Forth Edition, Butterworth, Boston USA 2000, 446.

Волков Александр Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru

Устинов Игорь Кириллович - канд. техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru

А.Д. Левин, А.Г. Вяткин

ОБЗОР МЕТОДОВ ВЫПОЛНЕНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Применение разделительных операций, преимущественно в качестве заготовительных, является неотъемлемой частью производства во многих отраслях промышленности, таких как, например, автомобилестроение, станкостроение и т.д.

К наиболее распространенным методам выполнения разделительных операций можно отнести:

1. Рубка (резка) листового металла на гильотинных ножницах;
2. Ленточная резка на ленточнопильных станках;
3. Кислородная резка;
4. Плазменная резка;
5. Лазерная резка;
6. Гидроабразивная резка.

Каждый метод обладает своими преимуществами и недостатками, способен достигнуть определенную точность обработки и качество реза, а также имеет ограничения по толщине и марке (виду) разрезаемого материала.

Рубка - это отделение части контура заготовки по незамкнутому контуру на специальном оборудовании - ножницах. По конструкции различают следующие типы ножниц:

- Гильотины для рубки металла;
- Дисковые и многодисковые ножницы.

Гильотинные ножницы, в свою очередь, отличаются конструкцией: существуют с параллельными и наклонными ножами. В некоторых случаях ножницы данного типа способны резать материал толщиной до 60 мм.

Обычно этот метод применяется, как заготовительная операция, для разрезания листов на полосы, а далее - этих листов на карточки определенных размеров. Наибольшее применение получили гильотинные ножницы с наклонными ножами.

В серийном и массовом производстве широкое применение нашли ножницы дискового типа. Такие ножницы обеспечивают резку в продольном направлении, что позволяет из рулона стандартных размеров получить ленты требуемой ширины, тем самым увеличивая область применения ленточного материала и его рациональный расход.

Дисковые ножницы выпускаются следующих типов:

- Дисковые с параллельными осями;
- Дисковые ножницы с наклонным нижним ножом;

- Дисковые с наклонными ножами. Используются для резки круглых, дисковых кольцевых и криволинейных заготовок с малым радиусом кривизны;
- Многодисковые с параллельными осями.

Лидирующие позиции среди различного оборудования для выполнения разделительных операций занимают ленточнопильные станки. Данное оборудование выгодно отличает ряд преимуществ: высокая стойкость режущего инструмента и производительность, низкая себестоимость резки, простота обслуживания оборудования и достаточно высокое качество обработки, а также высокий КИМ.

Резка на станке с ленточной пилой может проводиться в двух режимах:

- Стандартно - перпендикулярно оси оборудования;
- Под углом – угол не превышает 60° .

Ленточнопильные станки бывают различны по степени автоматизации. При работе в ручном режиме пильная рама опускается автоматически, а подъем осуществляется оператором; подача заготовки также осуществляется вручную. Полуавтоматический станок имеет автоматическое опускание и подъем пильной рамы, а подача заготовки вручную. При использовании автоматических ленточнопильных станков от оператора требуется только включить программу, в которую задаются режимы резания и параметры заготовки, далее станок функционирует полностью в автоматическом режиме.

На сегодняшний день широкое применение получила кислородная резка за счет высокой производительности. Принципу действия кислородной резки заключается в горении металла, который предварительно должен быть подогрет в месте разреза до температуры воспламенения, кислород при этом не подводится. Равномерное перемещение резака по линии реза начинают только после того, как будет прорезана вся толщина металла. Максимальная толщина газокислородной резки металла составляет 200 мм. Но недостатком данного метода является невозможность обработки алюминия и его сплавов, а также высоколегированных, высокоуглеродистых и хромоникелевых сталей.

Этих недостатков лишена резка с использованием плазмы. При плазменной резке металл плавится посредством сжатой электрической дуги с последующим удалением жидкого металла высокоскоростным плазменным потоком. В настоящее время плазменная резка является одним из самых экономически выгодных методов выполнения разделительных операций благодаря следующим преимуществам: в процессе раскроя металла плазмой не требуется заправка баллонов специальным газом и, соответственно, их доставка, не требуются специальные присадки для резки ценных металлов. Для возможности обеспечения плазменной резки необходимы только электроэнергия и воздух, а также сопла и электроды в качестве расходных материалов. Такая экономическая выгода имеет место при об-

работке листового металла, толщина которого не превышает 120 мм или менее, в зависимости от теплопроводности материала. Основным недостатком данного метода является тепловое воздействие на кромки обрабатываемого материала, в следствие которого кромки упрочняются и, соответственно, усложняется их дальнейшая обработка.

Наиболее современным методом раскроя листового материала является лазерная обработка. Лазер представляет собой устройство, которое создает когерентный поток света, за счет использования квантово-механического эффекта стимулированного излучения. Луч может быть, как непрерывным с постоянной амплитудой, так и импульсным, достигающим экстремальных пиковых мощностей.

Все оборудование для лазерной обработки, в независимости от конструктивных особенностей, имеет три основные части: рабочую среду, систему накачки и резонатор. Лазеры часто классифицируют по физическому состоянию активного вещества, таким образом различают:

- Твердотельные лазеры;
- Жидкостные лазеры;
- Газовые лазеры;
- Полупроводниковые.

К преимуществам лазерной обработки можно отнести ширину реза, которая является наименьшей из перечисленных методов, достаточно высокую производительность, высокое качество кромок без неблагоприятных напряжений, а также отсутствие необходимости в дополнительной обработке неотвеченных деталей. Наибольшая эффективность применения лазера достигается при раскрое металла толщиной до 6 мм. Недостатками этого метода можно назвать низкий КПД и невозможность обработки алюминия, титана и сплавов на их основе, а также высоколегированных сталей, по причине их высокой отражательной способности.

Инновационной и наиболее прогрессивной технологией обработки различных материалов является гидроабразивная резка. Резка осуществляется за счет тонкой сфокусированной струи воды с добавлением абразивных частиц. Основными частями данного оборудования можно назвать насос сверхвысокого давления и сопло, выполняемое из рубина, сапфира или алмаза. Этим методом возможно резать практически любые материалы, в том числе стали толщиной до 300 мм.

Наиболее важным преимуществом гидроабразивной резки является отсутствие нагрева обрабатываемых материалов. Отсюда появляется возможность использовать полученные детали без дополнительной обработки, так как качество поверхностей кромок имеет высокое качество. Также при этом виде обработки получается очень тонкий рез, что повышает КИМ.

К недостаткам относится достаточно низкая экономическая эффективность, так как под действием высокого давления дорогостоящие рабочие части быстро изнашиваются и подлежат замене.

Список литературы

[1] Якухин В.Г. Высокотехнологические методы обработки металлов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2008.

[2] Косилова А.Г., Мещеряков Р.П. Справочник технолога-машиностроителя. Том 1 М.: Машиностроение, 1986. – т. 1.

[3] "tools-expert"/ Журнал о профессиональном инструменте. – 2012. - <http://tools-expert.ru/articles/theory/250/>

Левин Артем Дмитриевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: doolciamanti@gmail.com

Вяткин Андрей Геннадьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

Н.В. Зенкин, А.В. Барков

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одной из основных погрешностей механической обработки является погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы. По данным работы [6], доля погрешности, вызванной деформациями технологической системы, может достигать от 20% до 70% от общей погрешности обработки.

В общем случае величина упругих отжатию ТС может быть рассчитана по формуле [5, стр. 112]:

$$y = \frac{P_y}{J}, \quad (1)$$

где P_y – величина силы резания, J – жесткость технологической системы.

Таким образом, для расчета упругих отжатию ТС необходимо знать значение сил резания и жесткости системы.

Часто с целью упрощения расчетов вводится понятие податливости технологической системы. Под податливостью ТС понимают величину, обратную жесткости [1, стр. 91]:

$$\omega = \frac{1}{J} \quad (2)$$

где J – жесткость технологической системы.

Жесткость технологической системы также может быть рассчитана по математическим зависимостям. Но такой расчет очень трудоемок. Поэтому более рациональным способом определения жесткости технологической системы является экспериментальные способы, описанные в работе [3].

Одним из таких методов является метод Корсакова В.С., основанный на определении разности заданной и фактической глубин резания. Корсаков вводит понятия остаточной глубины резания ($t_{осм.}$) – слоя металла, который не был удален с заготовки из-за действия деформаций, и равный по величине самой деформации. При измерении фактической глубины резания следует учитывать, что шероховатость выглаженной и обработанной поверхностей отличается. Разница шероховатостей оказывает влияние на точность измерения $t_{факт.}$. Поэтому для точного определения фактической глубины резания необходимо использовать формулу:

$$t_{факт.} = A + (R_{ZB} - R_{ZA}) \quad (3)$$

где A – величина, полученная при измерении, R_{ZB} и R_{ZA} – шероховатость обработанной и «выхоженной» поверхности соответственно.

Недостаток данного метода в том, что величина деформаций здесь напрямую зависит от величины компонента силы резания P_y , поэтому данный метод применим лишь для небольших глубин резания и небольших значений главного угла в плане, когда преобладает именно составляющая P_y . В противном случае необходимо использовать другие методы определения жесткости.

Учитывает влияние других компонентов сил резания метод, предложенный Соколовским А.П. Данный метод основан на том, что при обработке заготовок с неодинаковым припуском погрешность заготовки (ступенчатость, биение, несоосность и т.д.) остается на обработанной детали, но при этом величина погрешности становится меньше. При этом чем выше жесткость технологической системы, тем меньше величина погрешности на обработанной детали.

Степень копирования погрешностей можно оценить по формуле [4, стр.55]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{заг.}}{\Delta_{дет.}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{заг.}$ – погрешность заготовки, $\Delta_{дет.}$ – погрешность детали.

Поскольку при проведении испытаний геометрия режущей части, материал и режимы резания не меняются, то можно сказать, что степень копирования характеризует жесткость технологической системы, которую можно определить как [4, стр. 55]:

$$J = \lambda \cdot C_p \cdot s^{0.75} \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

где ε – степень копирования погрешностей, s – подача, C_p – коэффициент, характеризующий условия обработки, λ – соотношение между компонентами силы резания.

При обработке усилия резания могут распределяться таким образом, что отжим инструмента будет происходить не от, а на заготовку. Для таких случаев Соколовский вводит понятие отрицательной жесткости.

При больших глубинах резания на величину и направление упругих деформаций влияют в разной степени все компоненты силы резания, поэтому формула (1) не применима. Более точным является соотношение:

$$y = \frac{P_o}{J}, \quad (6)$$

где P_o - эквивалентная сила отжима, вычисляемая по формуле:

$$P_o = \xi \cdot P_z + \eta \cdot P_y + \gamma \cdot P_x, \quad (7)$$

где ξ , η , γ – коэффициенты, характеризующие влияние каждого компонента силы резания на величину деформаций ТС.

Еще один метод определения жесткости разработан Кораблевым П.А.

Суть данного метода состоит в том, что образец обрабатывается с прямой и обратной подачами. При этом технологическая система

деформируется под действием сил резания. После обработки всей поверхности детали технологическая система возвращается в настроенное положение и при обратной подаче снимается стружка, толщина которой зависит от режимов обработки и жесткости системы.

При этом величина разности размеров поверхностей, обработанных только с прямой и с прямой и обратной подачами, и является величиной упругой деформации технологической системы, по которой судят о жесткости ТС:

$$y = \frac{D_{п.} - D_{н.о.}}{2}, \quad (8)$$

где $D_{п.}$ и $D_{н.о.}$ – диаметры поверхностей, обработанных с прямой и прямой и обратной подачами соответственно.

Преимущество перечисленных выше методов в том, что они, не требуя сложного измерительного инструмента, оценить жесткость технологической системы в рабочих условиях. Основной недостаток – данные методы применимы в основном для станков токарной группы, и не пригодны для других методов обработки, например фрезерования.

Список использованной литературы

[1] Жуков Л.Э. *Технология машиностроения. Ч. 1: Учебное пособие.* Санкт-Петербург, Изд-во СПбГТУ, 1999, 295 с.

[2] Калмыков В.В., Барков А.В. Аналитическое и статистическое оценивание упругих деформаций при фрезеровании по контуру. *Фундаментальные исследования*, 2016, №8-1, с.34-38.

[3] Мальцев В.Г., Моргунов А.П., Морозова Н.С. Графическая форма представления производственного способа А.П. Соколовского определения жесткости технологической системы. *Динамика систем, механизмов и машин*, 2014, №2, с. 319-322.

[4] Соколовский А.П. *Жесткость в технологии машиностроения.* Москва, Изд-во Машиностроение, 1946, 206 с.

[5] Суслов А.Г., Дальский А.М. *Научные основы технологии машиностроения.* Москва, Изд-во Машиностроение, 2002, 684 с.

[6] Шелихов Е.С. *Повышение точности изготовления нежестких валов на станках с ЧПУ методом автоматической коррекции управляющей программы.* Дис. канд. Техн. наук. Оренбург, 2016, 182 с.

Зенкин Николай Васильевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Барков Александр Викторович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: cbzst@yandex.ru

И.Д. Соколова, К.В. Болдычев

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МАШИНОСТРОЕНИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время с помощью автоматизированных систем проектирования (САПР) можно значительно повысить темпы и качество проектирования, решить сложные инженерные задачи. На предприятиях используются эффективные специализированные программы: самостоятельные и в виде приложений к общетехническим программам.

САПР (англ. CAD, Computer-Aided Design) - программный пакет, предназначенный для проектирования (разработки) объектов производства (или строительства), а также оформления конструкторской и/или технологической документации [1].

На отечественных предприятиях широко используется программный пакет **AutoCAD**, разработанный компанией Autodesk и предназначенный для визуализации, моделирования и анализа поведения разрабатываемых конструкций на ранних стадиях проектирования [1]. На рисунке 1 показаны возможности данного программного обеспечения в области трехмерного моделирования [2]. Созданный более 20 лет назад, в настоящее время этот программный продукт уже не соответствует требованиям большинства проектировщиков. Он применяется только при разработке небольших и простых проектов.

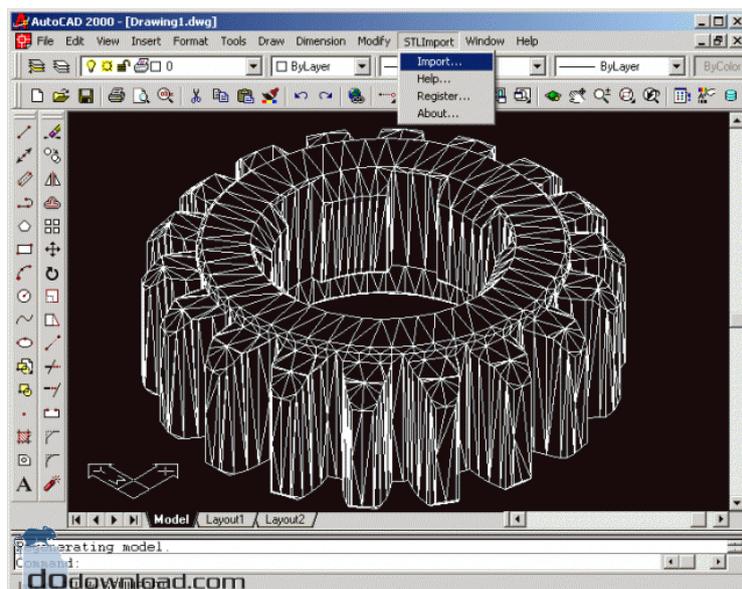


Рис. 1. Трехмерная модель зубчатого колеса, выполненная в **AutoCAD**

Система CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) - одна из самых распространенных САПР высокого уровня [3]. Эта комплексная система позволяет проводить автоматизированное проектирование (CAD), технологическую подготовку производства (CAM) и инженерный анализ (CAE). В ее состав входит новейший инструментарий 3D-моделирования, подсистема программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единая база данных текстовой и графической информации. На рисунке 2 показаны возможности данного программного обеспечения в области трехмерного моделирования процессов механической обработки.

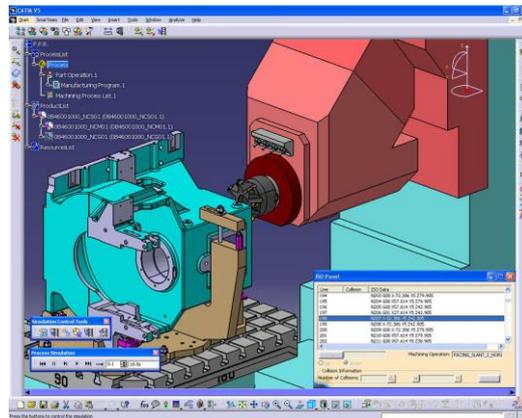


Рис. 2. Трехмерная модель процесса механической обработки, выполненная в CATIA

Также новым эффективным графическим пакетом является система **T-FLEX CAD 11**. Он содержит средства 2D-черчения, 3D-проектирования, модули конечно-элементного и динамического анализа. Новая версия пакета предлагает пользователю набор инструментов, недоступных в других программах сходного назначения [4]. На рисунке 3 (а, б) показаны возможности данного программного обеспечения в области трехмерного моделирования инструментов и деталей.

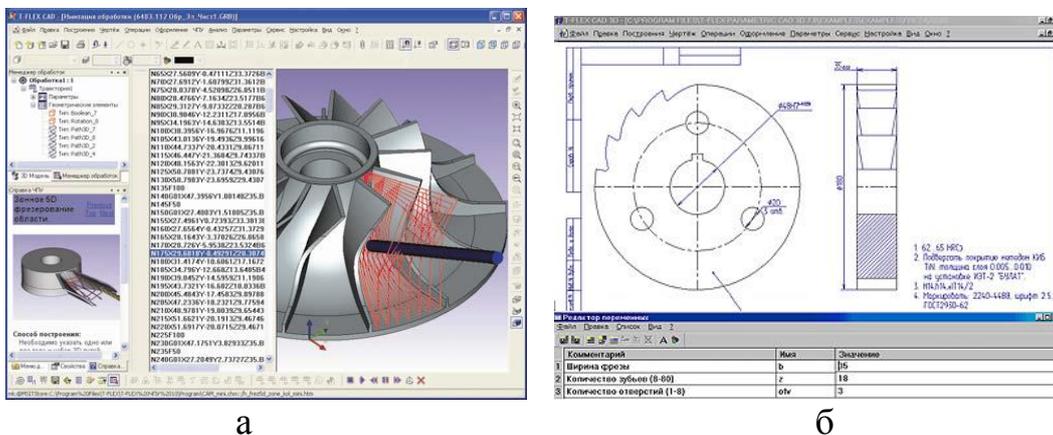


Рис. 3. а – трехмерная модель ротора двигателя, б – чертеж фрезы

Еще одной широко распространенной на российских предприятиях системой автоматизированного проектирования является **КОМПАС**, разработанный российской компанией АСКОН. КОМПАС-График предназначен для плоского черчения, КОМПАС-3D – для трехмерного проектирования. На рисунке 4 (а, б) показаны возможности данного программного обеспечения в области построения чертежей инструментов [5].

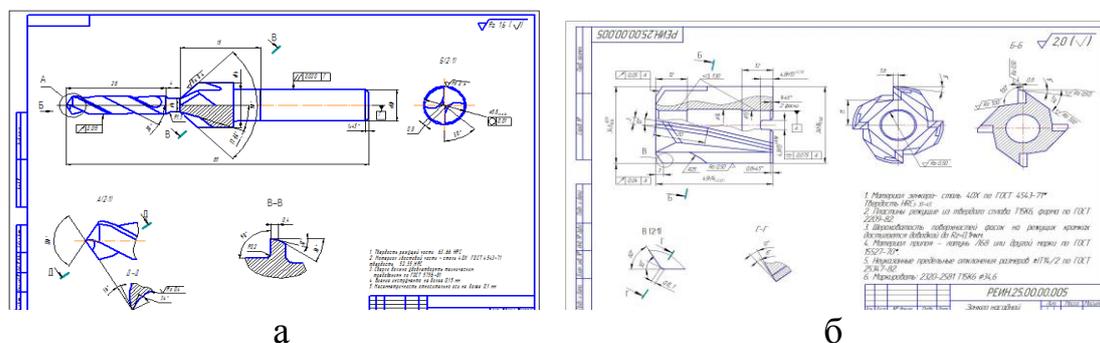


Рис. 4. а – чертеж комбинированного инструмента, б – чертеж концевой фрезы

SolidWorks – инструментальная среда, предназначенная для автоматизированного проектирования сложных изделий, проведения инженерного анализа и подготовки производства. На рисунке 5 (а, б) показаны возможности данного программного обеспечения в области трехмерного моделирования инструментов и деталей [6].

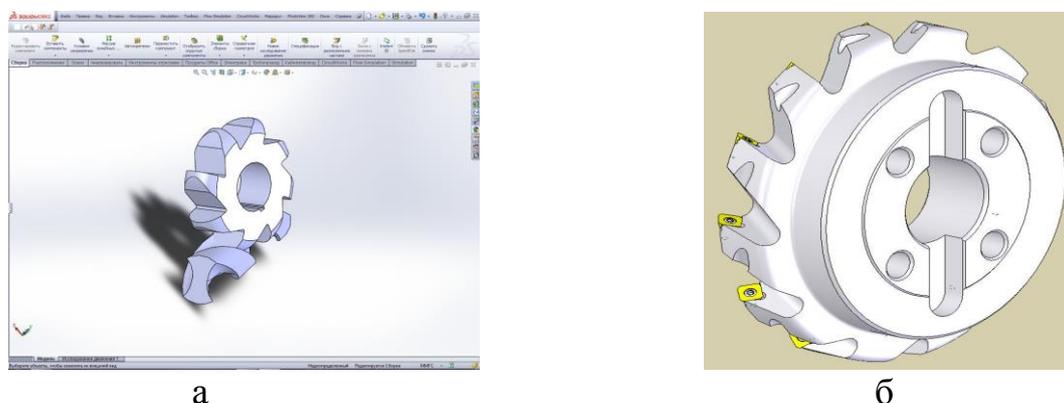


Рис.5: а – трехмерная модель процесса обработки стружечных канавок сверла, б – трехмерная модель фрезы со сменными режущими пластинами

В заключении можно отметить, что выбор необходимого программного средства, который поможет решить поставленные задачи и обеспечить полную комплексную автоматизацию зависит от предварительного исследования предприятия и квалифицированной помощи специалистов. Перспективным направлением развития САПР является обеспечение взаимосвязи между чертежными и расчетными программами, автоматизация в едином информационном пространстве всех стадий производства и проектирования.

Список литературы

[1] [Электронный ресурс] Обзор современных систем автоматизированного проектирования. <http://bourabai.ru/graphics/dir.htm> (дата обращения 7.10.2016 г.)

[2] [Электронный ресурс] AutoCAD. <http://www.autodesk.ru/products/autocad/overview> (дата обращения 08.10.2016 г.)

[3] [Электронный ресурс] CATIA. <http://www.3ds.com/ru/products-services/catia/> (дата обращения 09.10.2016 г.)

[4] [Электронный ресурс] T-FLEX PLM+. <http://www.tflex.ru/> (дата обращения 10.10.2016 г.)

[5] [Электронный ресурс] КОМПАС. <http://kompas.ru/> (дата обращения 11.10.2016 г.)

[6] [Электронный ресурс] SolidWorks. <http://www.solidworks.ru/products/444/> (дата обращения 11.10.2016 г.)

Соколова Ирина Дмитриевна –канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru

Болдычев Кирилл Виторович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: boldychev.kirill@yandex.ru

Ю.С. Демиш, И.Д. Соколова

ОБЗОР СТАНКОИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В нашей стране в станкоинструментальной отрасли на сегодняшний день существует около 100 предприятий. К ним относятся: предприятия, выпускающие металлорежущие станки, заводы, специализирующиеся на изготовлении кузнечно-прессового оборудования, научно-исследовательские институты и конструкторские бюро. Ниже приведены некоторые заводы, направленные на выпуск металлообрабатывающего оборудования:

- Рязанский завод токарных станков (Основное производство: станки токарно-винторезные, станки трубообрабатывающие, станки токарно-винторезные с ЧПУ, фрезерные станки);
- Рязанский завод промышленного оборудования (Основное производство: токарно-винторезные станки, станки с ЧПУ);
- Дмитровский завод фрезерных станков (Основное производство: универсальные консольно-фрезерные станки с различным уровнем автоматизации);
- Ульяновский завод тяжелых и уникальных станков (Основное производство: тяжелое металлорежущее оборудование повышенного и нормального классов точности);
- Ивановский завод тяжелого станкостроения (Основное производство: высокоточные горизонтально-расточные станки различных габаритов, обрабатывающие центры);
- Липецкий станкостроительный завод Возрождение (Основное производство: металлообрабатывающие станки);
- Алапаевский станкостроительный завод (Основное производство: металлообрабатывающие станки);
- Астраханский станкостроительный завод (Основное производство: станки и комплектующие к ним);
- Завод фрезерных станков в Нижнем Новгороде
- Егорьевский станкостроительный завод (Основное производство: зубофрезерные станки);
- Ейский станкостроительный завод (Основное производство: станки токарные, токарно-винторезные, сельскохозяйственная техника Краснодарский край);
- Клинский станкостроительный завод (Основное производство: зубодолбежные станки);
- Краснодарский станкостроительный завод (Основное производство: токарно-карусельное оборудование);

- Московский станкостроительный завод им. А. И. Ефремова (Основное производство: универсальные токарно-винторезные и специальные станки);
- Самарский станкозавод (Основное производство: универсальные токарно-винторезные станки повышенной и особо высокой точности, станки с числовым программным управлением);
- Саранское станкостроительное объединение (Основное производство: прессы различного назначения);
- Саратовский станкостроительный завод (Основное производство: универсальные внутришлифовальные станки высокой и особо высокой точности);
- Стерлитамакский станкостроительный завод (Основное производство: универсальные станки, обрабатывающие центры, фрезерные станки с ЧПУ и токарные станки с ЧПУ). [1]

Также в нашей стране есть немало предприятий, занимающихся ремонтом и модернизацией станков, таких как Уральский станкоремонтный завод или Балтийский станкостроительный завод. Например, в Челябинске находится Научно-производственное предприятие «Мехатроника», занимающееся разработкой и проектированием оборудования, станков.

Несмотря на большое число предприятий, относящихся к данной отрасли, по итогам прошлого года выпуск станков в России превысил 7,8 тыс. единиц. На фоне мирового рынка это крохи — менее 0,5%.

Станкостроение в постсоветские годы пережило в России жесточайший кризис. Объемы производства критически сократились — в десятки раз. Произошло это за счет сжатия внутреннего рынка (переживавшая кризис отечественная промышленность резко сократила закупки нового оборудования), и в связи с потерей экспортных возможностей, где традиционная советская ниша (поставки простых, но дешевых станков) была занята китайцами, освоившими советские технологии, но способными предложить меньшую цену за эту продукцию.

Как заявил глава правительства Д.А. Медведев, в прошлом году поддержка отрасли из федерального бюджета составила около полутора миллиардов рублей, подавляющая часть этой суммы была предоставлена по линии Фонда развития промышленности. В этом году на поддержку станкостроения предусмотрено 2,7 миллиарда рублей». Премьер отметил, что в России необходимо заниматься не только сборкой лицензионных станков, но и производить собственные, чтобы отечественная промышленность «могла побеждать на любом уровне конкуренции». [2]

Для поднятия отечественного станкостроения на мировой уровень необходимы не только производственные мощности и финансовые ресурсы, но и высококвалифицированные кадры.

Список литературы

[1] [Электронный ресурс] WikiProm Современная энциклопедия промышленности России <http://www.wiki-prom.ru/55otrasl.html> (дата обращения: 09.10.2016 г.)

[2] [Электронный ресурс] Эксперт <http://expert.ru/expert/2016/12/milliardy-na-stanki/> (дата обращения: 10.10.2016 г.)

Демиш Юлиана Сергеевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: uliana.demish.94@gmail.com

Соколова Ирина Дмитриевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru

В.В. Калмыков, И.В. Кузнецов, Д.А. Барина

ОПТИМИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время современные технологические возможности станков с ЧПУ направлены на эффективное повышение производительности, которое может быть достигнуто путем абсолютной автоматизации комплексной обработки заготовок [2]. В свою очередь, рациональный выбор режимов резания способствует уменьшению затрат времени на обработку, что играет важную роль в повышении производительности.

В общем случае затраты времени на обработку могут быть выражены через штучное время [1]:

$$t_{шт} = t_{осн} + t_{всп} + t_{обс} + t_{ном} \quad (1),$$

где $t_{осн}$ – основное время; $t_{всп}$ – вспомогательное время; $t_{обс}$ – время обслуживания рабочего места; $t_{ном}$ – время на личные потребности.

Для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) основное время является машинным, которое складывается из времени выполнения различных переходов. Данные переходы осуществляются последовательно, параллельно, параллельно-последовательно.

Машинное время на станках с ЧПУ назначается по программе и является не перекрытым машинным временем. Более современные станки с ЧПУ позволяют перекрывать машинное время, например, двухшпиндельные станки с ЧПУ с параллельной работой двух инструментальных головок [1].

Вспомогательное время – это часть штучного времени, затрачиваемая на выполнение приемов, необходимых для осуществления основных технологических операций.

Вспомогательное время определяется по формуле [3]:

$$t_{всп} = \sum t_{уст} + \sum t_{х.х.} + \sum t_{зам} + \sum t_{контр} + \sum t_{уп} \quad (2),$$

где $t_{уст}$ – время на установку, закрепление и снятие изделий; $t_{х.х.}$ – время, затрачиваемое на холостые ходы (время на подвод инструмента, поворот стола с закрепленной заготовкой и т.д.); $t_{зам}$ – замена инструмента из инструментального магазина и т.д.; $t_{контр}$ – время на контрольные операции; $t_{уп}$ – время управления станком (включение/выключение станка, технологические паузы и т.д.).

Время обслуживания рабочего места расходуется на смену и правку инструмента, уход за рабочим местом и т.д.

На сегодняшний день большое внимание в научной литературе уделено сокращению основного времени на обработку. Работам, посвященным

оптимизации вспомогательного времени, несправедливо уделяется значительно меньшее внимание. Ввиду этого следует дополнительно исследовать мероприятия по оптимизации вспомогательного времени.

Сокращение затрат времени на выполнение вспомогательных операций в настоящее время является наиболее перспективным направлением для исследований. Особое внимание следует уделить сокращению затрат времени на замену инструментов, особенно в случае многоинструментной обработки.

Замену инструментов производят при выходе их из рабочего состояния. На практике каждый инструмент, установленный в инструментальном магазине станка, чаще всего имеет стойкость отличную от других и, следовательно, изнашиваться они будут с разной скоростью. В результате время на замену полного комплекта инструментов будет достаточно большим, так как состоит из суммы времен замены всех инструментов. Если назначить оптимальные (рациональные) режимы резания, при которых стойкости каждого режущего инструмента хватало бы на обработку определенного количества заготовок, то износ всех инструментов будет происходить приблизительно в одно время. Следовательно, замена инструментов в инструментальном магазине будет производиться одновременно, что позволит значительно сократить вспомогательное время.

Список литературы

[1] Пахомов Д.С., Гребнева Т.Н.. Особенности нормирования операций станков с ЧПУ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. №2. С. 104-112.

[2] Харченко А.О., Рапацкий Ю.Л., Снижение затрат времени на смену инструмента в многоцелевом станке с ЧПУ на основе применения инструментального магазина новой конструкции // Вісник СевНТУ. – 2010. С. 229-230.

[3] ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М.: Издательство стандартов, 2003.

Калмыков Вадим Владимирович – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru

Барина Дарья Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: daria.barinova2016@yandex.ru

Кузнецов Иван Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru

Т.В. Попова, А.Г. Вяткин

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Как известно, контактное трение играет значительную роль в повышении эффективности холодной обработки давлением металлов. Закономерности изменения контактного трения выведены из обобщенной теории трения, объединяющей теорию сухого, граничного и гидродинамического трения[1]:

$$\tau_{mp} = \mu_c q (1 - \gamma) + \eta \frac{dv}{dz} v; \quad (1)$$

где τ_{mp} – удельная сила трения на границе металл-инструмент, μ_c – коэффициент трения скольжения, q – удельное усилие деформирования, $\gamma = S_{cm}/S_k$ - отношение смазанной площади и площади контакта, η – эффективная (в том числе динамическая) вязкость смазочной среды, v – скорость скольжения в зоне контакта, z – средняя толщина смазочного материала.

Формулу (1) можно разбить на формулы:

$\tau_{mp1} = \mu_c q (1 - \gamma)$ - закономерности трения при сухом контакте трущихся поверхностей, а $\tau_{mp2} = \eta \frac{dv}{dz} v$ - закономерности изменения направления сдвига поверхностей через третью (смазочную) среду.

Исследования [2] показывают, что поскольку на эффективный коэффициент сухого трения-скольжения в случае образования молекулярных связей значительно влияет сопротивление сдвигу обрабатываемого материала, которое само по себе изменяется также от гидростатического давления в зоне контакта, то μ представляет собой не константу, а функционал. Для большинства материалов этот функционал имеет вид двучленной зависимости, похожей на двучленную зависимость И.В.Крагельского [3]:

$$\mu = \frac{\alpha}{q_{гс}} + \mu_0,$$

где μ_0 – молекулярный коэффициент трения-скольжения обрабатываемого материала по инструменту; α – параметр сдвига при бесконечно большом гидростатическом давлении в зоне контакта, $q_{гс}$ - гидростатическое давление в зоне контакта.

Молекулярный коэффициент трения-скольжения определяется сопротивлением на срез металла и при холодном деформировании, связь:

$$\mu = f(\sigma_{ср})$$

близка к линейной. Тогда

$$\mu_0 = \sigma_{ср} t g \varepsilon.$$

В результате получим для первого слагаемого выражения (1):

$$\tau_{\text{тр1}} = \left(\frac{\alpha}{q_{\text{гс}}} + \sigma_{\text{ср}} t g \varepsilon \right) q (1 - \gamma) \quad (2)$$

Исходя из условия изменения эффективной вязкости смазочной среды в зависимости от температуры и гидростатического давления, рассматриваемого В.Г.Куимовым, второе слагаемое выражения (1) имеет вид:

$$\tau_2 = \eta_{20^{\circ}\text{C}} \frac{dv}{dz} e^{\beta(q_{\text{гс}} - q_0)} \frac{\gamma}{1 + A(q_0 - q_{\text{гс}}) + B(q_0 - q_{\text{гс}})^2}, \quad (3)$$

где $\eta_{20^{\circ}\text{C}}$ - вязкость смазочной среды при 20 °С; q_0 – начальное давление среды; А, В и β – константы.

Если предположить, что величина удельной контактной нагрузки q достаточно близка к гидростатическому давлению, получим следующую зависимость для количественного выражения удельной силы трения при объемном деформировании:

$$\tau = \left(\frac{\alpha}{q_{\text{гс}}} + \sigma_{\text{ср}} t g \varepsilon \right) q (1 - \gamma) + \eta_{20^{\circ}\text{C}} \frac{dv}{dz} e^{\beta(q_{\text{гс}} - q_0)} \frac{\gamma}{1 + A(q_0 - q_{\text{гс}}) + B(q_0 - q_{\text{гс}})^2}. \quad (4)$$

Анализируя выражение (4), можно сделать выводы, что для количественного определения трения при объемном деформировании необходимы следующие данные:

1) величина гидростатического давления и годограф его изменения в зоне контакта;

2) сопротивление материала на сдвиг, температура деформирования, скорость скольжения в зоне контакта, эффективная вязкость смазочной среды при нормальной температуре и атмосферном давлении, коэффициент распределения смазки по поверхности контакта.

Также зависимость (4) показывает, что попытаться установить коэффициент трения можно только для конкретных условий, ограниченных требованиями частной задачи. При этом понятие коэффициент трения как константы теряет смысл.

Список литературы

[1] Исаченков Е.И. *Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением*. - М.: Машиностроение, 1978. – 208с.

[2] Исаченков В.Е., Исаченков Е.И. *Штамповка эластичными и жидкостными средами* - М.: Машиностроение, 1976. – 48с.

[3] Крагельский И.В. *Трение и износ* – М.: Машиностроение, 1968. - 480с.

[4] Унксов. Е.П. *Теория пластических деформаций металлов*. – М.: Машиностроение, 1983. – 598с.

[5] Мастеров В.А., Берковский В.С. *Теория пластической деформации и обработка металлов давлением*. – М.: Metallurgia, 1989. – 400с.

Попова Татьяна Витальевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: tanechka54321@mail.ru

Вяткин Андрей Геннадьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

И.В. Кузнецов, Ф.И. Антонюк, Д.А. Барина

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ДИАМЕТРА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Штучные заготовки, применяемые для основных формоизменяющих операций холодной штамповки, выполняемой на прессах, изготавливают различными способами [2]. Выбор способа изготовления заготовок зависит от многих факторов, таких как серийность производства, соотношение размеров заготовок (высоты и диаметра), а также от особенностей формоизменяющих операций, однако решающую роль играет стремление обеспечить максимально возможную экономию материала.

Например, заготовки для выдавливания тонкостенных стаканов из цветных сплавов получают многорядной вырубкой из листа. В случаях, когда относительная высота заготовок небольшая ($d/h = 0,6...1,0$) их отделяют от калиброванных прутков безотходной резкой в штампах, но при этом возникают погрешности формы, для устранения которых вводят операции калибровки. Также распространение получили лентопильные станки. Данное оборудование применяют в серийном производстве при отрезке заготовок заведомо большей длины и меньшего диаметра. Ширина реза в данном случае составляет всего 0,65...0,9мм [4]. Для получения необходимого размера заготовок их подвергают осадке.

Осадка исходных цилиндрических заготовок является одним из наиболее распространенных способов уменьшения их высоты и увеличения диаметра перед основной формоизменяющей операцией холодной объемной штамповки [5].

Желательно осадке подвергать заготовки с соотношением высоты к диаметру или к меньшей стороне сечения не более 2,0...2,5. Превышение этого значения может привести к продольному изгибу (искривлению) осаживаемой заготовки. В результате трения на торцевых поверхностях заготовки боковая поверхность осаживаемой заготовки приобретает бочкообразную форму. Данное явление характеризует неравномерность деформации.

При холодной объемной штамповке оценку формоизменения осаживаемых заготовок оценивают размерными показателями: высотой и максимальным диаметром осаживаемой заготовки d_0 .

В зависимости от решаемой технологической задачи, к точности высоты и диаметра осаживаемой заготовки могут предъявляться различные требования. Большое внимание в литературе уделено погрешности высоты поковки [1, 3]. Однако, что касается погрешности диаметра поковки, то этой теме уделено недостаточное внимание.

Характер влияния различных факторов на точность осадки можно определить, основываясь на общем теоретическом подходе к точности любой операции объемной штамповки [1].

Погрешность высоты поковки можно определить по зависимости [1]

$$\Delta h_{x_i} = \frac{(\partial P / \partial x_i)_{(x_0)}}{C + (\partial P / \partial h)_{(h_0)}} \Delta x_i. \quad (1),$$

где P - сила деформирования поковки; $\partial P / \partial x_i$ - производная функции деформирующей силы по x_i ; x_i и Δx_i - фактор, задающий погрешность, и величина погрешности соответственно; C - коэффициент жесткости системы пресс-штамп; $\partial P / \partial h$ - жесткость поковки.

На основе формулы (1) и экспериментальных данных (рис. 1) в статье [1] было установлено, что повышение жесткости прессы может оказать существенное влияние на уменьшение погрешности высоты поковок. Было определено, что к наибольшей погрешности высоты приводит использование гидравлического прессы с $C = 0$ [1].

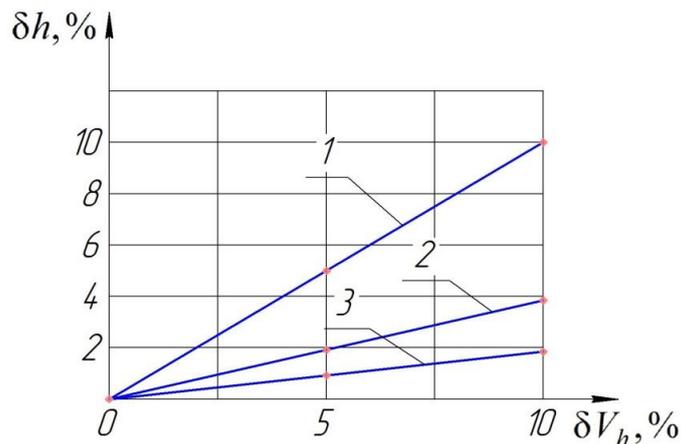


Рис. 1. Влияние жесткости прессы на относительную погрешность высоты поковки: 1, 2, 3 - $C=0$; 90; 180 МН/м соответственно [1]

Исходя из формулы (1) и экспериментальных данных [1], можно предположить, что для получения стабильного диапазона рассеивания размера d_6 осадку необходимо производить на гидравлическом прессы, так как в данном случае вся погрешность будет «поглощаться» высотным размером. В связи с этим планируется провести ряд экспериментов по выявлению погрешности диаметра поковки при холодной осадке. Для выполнения поставленной задачи, в первую очередь, необходимо выделить факторы, влияющие на погрешность диаметра поковки при холодной осадке.

Список литературы

[1] Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г., Точность холодной осадки цилиндрических заготовок // КШП. ОМД. – 2000. №10. С. 16-21.

[2] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Мкртчян А.Б., Применение статистических методов анализа к оценке изменения диаметра при холодной осадке // Технические науки. – 2016. №8. С. 9-13.

[3] Вяткин А.Г., Вяткин А.А., Факторы, влияющие на точность осадки при штамповке на гидравлическом прессе // Наука и образование, изд.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. №12. С. 29-38.

[4] Евстратов В.А., Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков.: Высшая школа, 1987. – 144 с.

[5] Ковка и штамповка: справочник. В 4-х т. Т.3 Холодная объемная штамповка/ под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384с.

Кузнецов Иван Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru

Баринова Дарья Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: daria.barinova2016@yandex.ru

Антонюк Феликс Иванович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: antonyukfi@yandex.ru

Е.С. Иванченко, А.Г. Вяткин

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Технологическая оснастка занимает особое место в современном машиностроении. Внедрение и широкое использование прогрессивной технологической оснастки является рациональной формой повышения эффективности производства и производительности труда. В машиностроении вспомогательные устройства, используемые для выполнения операций механической обработки, сборки и контроля называют приспособлениями. [1, с. 6].

Большое разнообразие конструкций приспособлений обуславливает сложность построения технологических процессов и высокий уровень предъявляемых к ним требований. При изготовлении приспособлений неправильные технологические и конструктивные решения приводят к увеличению сроков подготовки производства и снижению его эффективности. Использование приспособлений способствует повышению производительности и точности обработки, сборки и контроля; облегчению условий труда рабочих; строгой регламентации длительности выполняемых операций; расширению технологических возможностей оборудования; повышению безопасности работы и исключению аварий. [2, с. 21].

Одним из основных предназначений технологической оснастки является обеспечение точности положения заготовки. Погрешностью установки в приспособлении называют отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия от заданного. Погрешность установки включает в себя:

- погрешность базирования;
- погрешность приспособления;
- погрешность закрепления.

Погрешность закрепления - это разность предельных смещений измерительной базы в направлении получаемого размера под действием силы зажима заготовки. [1, с. 17]. Для уменьшения погрешности закрепления необходимо стремиться к постоянству зажимной силы и повышению жесткости стыка установочный элемент – базовая поверхность, жесткости узлов приспособления, а также чистоты и однородности поверхностного слоя базовых поверхностей заготовки.

Погрешность базирования возникает при несовпадении измерительной и технологической баз заготовки. Величина погрешности базирования расчетная и относится к конкретному выполняемому размеру при данной схеме установки. Она зависит от принятой схемы базирования, погрешности размеров, формы и взаимного расположения баз. [1, с. 16].

Погрешность положения заготовки, вызванная неточностью приспособления, включает в себя три элемента:

- погрешность изготовления и сборки приспособления;
- погрешность установки и фиксации приспособления;
- погрешность, вызванная износом установочных элементов приспособления.

Погрешностью установки называют отклонение фактически достигнутого положения заготовки при установке от требуемого. [1, с. 19]. При использовании одного приспособления она представляет собой систематическую постоянную погрешность; ее нередко можно частично или полностью устранить соответствующей настройкой станка.

Технологические возможности изготовления приспособлений в современных инструментальных цехах обеспечивают выдерживание составляющей погрешности установки в пределах 0,01 – 0,005 мм (для прецизионных приспособлений еще точнее). [3, с. 63].

Погрешность сборки возникает в результате смещения и перекосов корпуса приспособления на столе, планшайбе или шпинделе станка. В массовом производстве при однократном неизменном закреплении приспособления на станке эта величина может быть скомпенсирована настройкой станка. [1, с. 20].

В серийном производстве при многократной периодической смене приспособлений на станках постоянная величина погрешности сборки превращается в некомпенсируемую случайную составляющую.

Смещения и перекосы приспособлений на станке уменьшают, применяя направляющие элементы (шпонки для Т-образных пазов, центрирующие пояски, фиксаторы). При этом величина погрешности сборки 0,01 – 0,02 мм. [3, с. 58].

Погрешность, вызванная контактным износом, характеризует изменение положения контактных поверхностей установочных элементов в результате их износа в процессе эксплуатации приспособлений. [1, с. 19].

Интенсивность износа установочных элементов зависит:

- от конструкции и размеров установочных элементов;
- от материала и веса заготовки;
- от состояния базовых поверхностей заготовок;
- от условий установки заготовки в приспособлении и снятия ее (с ударом, скольжением).

Черновые базовые поверхности заготовок с остатками окалины и формовочного песка изнашивают опоры приспособлений сильнее, чем обработанные базы. Износ возрастает с увеличением веса заготовки и пути сдвига по опорам при ее установке в приспособление и снятии с приспособления.

Износ является систематически изменяющейся величиной, следовательно, необходимо его прогнозировать и контролировать при плановой

периодической проверке приспособлений. Поэтому задача исследования факторов, влияющих на величину контактного износа и определения зависимости величины износа по времени от конкретного фактора, является актуальной в условиях динамично развивающегося машиностроения.

Литература:

[1] Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений. – Москва. Машиностроение. 1983. – 277с.

[2] Ансеров М.А. Приспособления для металлорежущих станков. Ленинград. Машиностроение, 1975 – 658.с.

[3] Под редакцией Вардашкина Б.Н. и Шатилова А.А. Станочные приспособления: Справочник в двух томах. Том 2. . – Москва. Машиностроение. 1983. – 653с.

Иванченко Екатерина Сергеевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivan4enko.katerina@gmail.com

Вяткин Андрей Геннадьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

А.В. Лепченков, В.В. Калмыков

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Машиностроение является важнейшей отраслью промышленности, поскольку ее продукция используется всеми отраслями экономики страны. На сегодня одной из основных задач можно считать проблему повышения и технологического обеспечения качества поверхности деталей.

Под поверхностью детали в машиностроении понимают наружный слой детали, который по своему строению и физическим свойствам отличается от внутренней части. Свойства, которые деталь приобретает в процессе обработки, характеризуются понятием «качество поверхности» [2, с. 35].

Строение поверхностного слоя твердых тел и происходящие в нем явления играют важную роль для протекания большого количества процессов старения и разрушения материалов. Процессы, которые возникают при взаимодействии поверхностного слоя с другим телом или окружающей средой, определяют состояние поверхностного слоя [1, с. 22].

Качество поверхности характеризуется основными параметрами:

- геометрией поверхности: микрогеометрией; шероховатостью;
- структурой поверхностного слоя: кристаллическим строением; наличием дефектов; наличием структурных превращений;
- степенью деформации металла в поверхностном слое: деформацией внутри отдельных зерен; деформацией совокупности зерен (по слоям);
- наклепом поверхностного слоя: глубиной и степенью наклепа; наличием в поверхностном слое чрезмерно наклепанного металла с частично разрушенной кристаллической решеткой;
- остаточными напряжениями: знаком напряжений; величинами и распределением их по глубине;
- энергетическими параметрами;
- прочими параметрами (оптическими, магнитными, электрическими, адгезионными) [3, с. 203].

Поверхностный слой с геометрической точки зрения представляет собой сложную структуру. Любая реальная поверхность имеет отклонения формы от номинальной поверхности. Макрогеометрия поверхности - это характеристика ее формы (отклонение от плоскостности, отклонение от цилиндричности и т. д.). Микрогеометрия характеризуется шероховатостью [1, с. 22-23].

Напряженное состояние поверхностного слоя имеет свою специфику. У поверхности детали возникают местные концентрации напряжений, которые являются причиной появления усталостного разрушения [1, с. 23].

Одной из особенностей поверхностного слоя является появление внутренних остаточных напряжений. Растягивающие напряжения являются наиболее опасными. Их наличие приводит к понижению усталостной прочности и износостойкости.

Строение поверхностного слоя существенно отличается от строения основного материала из-за того, что содержит следы процесса обработки. При эксплуатации на изделие действуют силовые, температурные и другие факторы, которые влекут за собой процесс изменения свойств поверхностного слоя.

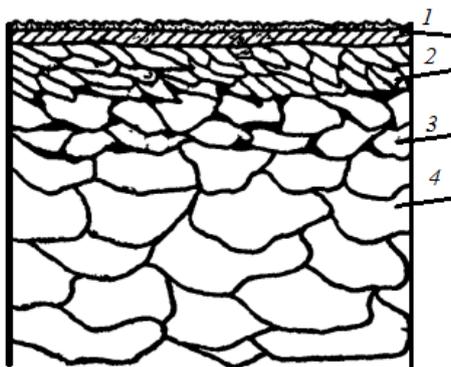


Рис. 1. Строение поверхностного слоя

Строение поверхностного слоя состоит из следующих характерных участков:

- 1- слой повышенной твердости (содержит окисные пленки);
- 2- слой с деформированной кристаллической решеткой (зерна приобретают ориентацию под действием сил резания и трения);
- 3- слой с искаженной кристаллической решеткой (характеризуется увеличенным количеством дефектов);
- 4- слой металла с исходной структурой (Рис. 1) [1, с. 24]

Оценка параметров, характеризующих состояние поверхностных слоев, должна предшествовать рассмотрению процессов, которые возникают в этих слоях. Прежде всего необходимо брать во внимание такие параметры, на значения которых можно повлиять с точки зрения технологии изготовления.

Литература:

- [1] Вишняков М.А., Вашуков Ю.А. Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения. – Самара, 2005. – 96 с.
- [2] Сорокин В.М., Курников А.С. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин: курс лекций – Н. Новгород: ВГАВТ, 2006. – 296 с.
- [3] Ящерицын П.И., Зайцев А.Г., Барботько А.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. - Минск: Наука и техника, 1976. — 328 с.

Лепченков Александр Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

Калмыков Вадим Владимирович – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

М.В. Мусохранов, О.О. Смирнов

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время в машиностроении проблема трения и изнашивания является одной из наиболее важных при эксплуатации машин, так как с ним связана надежность и долговечность деталей машин и механизмов. Возникающее при трении изнашивание приводит к нарушению геометрических размеров узлов, потере точности взаимного расположения деталей. Трение приводит к таким негативным явлениям, как потери энергии, перегрев механизмов, снижение передаваемых усилий, увеличение расхода топлива и материалов. Поэтому оценка состояния качества поверхностных слоев контактирующих деталей машин является наиболее актуальной при анализе надежности любой эксплуатируемой техники [1].

Несмотря на то, что существует огромное количество работ в области трения и изнашивания, до сегодняшнего времени многие вопросы трения остаются нерешенными, что объясняется сложностью процессов трения и обилием факторов, влияющих на их протекание. Сложность процессов трения и изнашивания требует системного подхода к их решению.

Все характеристики поверхностей трущихся тел условно можно разделить на три группы: геометрические, механические и физико-химические. К геометрическим относятся макроотклонения (овальность, волнистость и др.) и микроотклонения (шероховатость поверхности). Характеристиками механических свойств поверхностей являются предел прочности, пределы текучести, модуль упругости, твердость НВ и др. Основной физико-химической характеристикой является поверхностная энергия.

Темп износа трущихся поверхностей и его величина в значительной степени связаны с высотой и формой неровностей и направлением следов обработки. Согласно традиционному подходу, контакт двух сопряженных поверхностей рассматривается как результат зацепления и деформации взаимно внедряющихся шероховатостей (микронеровностей). Исходя из этого, можно считать, что уменьшение высоты микронеровностей приводит к уменьшению коэффициента трения, т.е. к снижению износа контактирующих поверхностей [2].

В настоящее время микрогеометрические погрешности сопрягаемых поверхностей изучены достаточно подробно, и роль шероховатости в проблеме трения и изнашивания до сих пор остается важнейшей. Однако существует ряд явлений, которые нельзя объяснить только с позиций шероховатости. Исходя из всего вышесказанного, контакт поверхностей деталей следует рассматривать с учетом сил энергетического взаимодействия, а не

только как результат зацепления микровыступов. Таким образом, наряду с такими качественными показателями, как твердость и шероховатость поверхности, необходимо ввести дополнительный параметр качества поверхностного слоя. Этим параметром является поверхностная энергия [2].

В свете рассмотрения вопроса контактирования деталей необходимо ориентироваться на схему на рис. 1. [2]. За счет относительного перемещения деталей и действия сил в местах контактов шероховатостей образуется упругопластическое состояние.

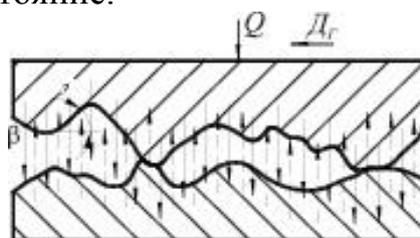


Рис. 1. Схема взаимодействия микронеровностей контактирующих деталей

Проявление энергетического поля показано условно стрелками так, что каждая сопряженная деталь передает другой детали соответствующую порцию энергии. Можно сказать, что передача энергии, как и деформирование микровыступов, происходит всегда, даже если между контактирующими поверхностями имеется малый зазор. Опыт показывает, что при весьма гладких поверхностях с достаточно малой высотой микронеровностей имеет место значительное увеличение силы трения, а не его уменьшение, как следовало бы ожидать [2].

Поверхностная энергия является важной характеристикой эксплуатационных свойств сопрягаемых поверхностей деталей машин. Ее значение оказывает влияние на коэффициент трения, а также на износостойкость и КПД машин и механизмов. Кроме того, оказывая действие на такое явление, как схватываемость сопрягаемых поверхностей, энергия может стать элементом влияния на точность позиционирования [3].

Управление поверхностной энергией дает возможность изменять свойства поверхностного слоя, а также механические свойства материала. Таким образом, для получения наименьшего коэффициента трения необходимо, чтобы разность значений поверхностных энергий трущейся пары была бы минимальной. Поэтому, лучшим вариантом будет, когда эта разность равна нулю, т.е. энергии сопряженных поверхностей равны [2].

Таким образом использование поверхностной энергии в качестве показателя состояния поверхностей деталей машин может послужить для более полной оценки свойств поверхностных слоев и создания методов управления коэффициентами трения сопрягаемых элементов машин.

Список литературы

[1] Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000.320 с.

[2] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Зенкин Н.В. Энергия поверхностного слоя металлов как инструмент воздействия на величину коэффициента трения. <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39121>(дата обращения 11.10.2016)

[3] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Сорокин С.П. Энергетические показатели качества деталей машин и методы их измерения. <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39121> (дата обращения 11.10.2016)

Мусохранов Марсель Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marls77@ya.ru

Смирнов Олег Олегович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: olegsmirnov2010@yandex.ru

Н.М. Сафронов, В.В. Калмыков

ПРЕИМУЩЕСТВА ПОВРЕМЕННО-ПРЕМИАЛЬНОЙ ФОРМЫ ОПЛАТЫ ТРУДА В БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Как и всякий товар труд имеет свою цену. Цену труда мы привыкли видеть в заработной плате. Ценность индивидуума, которому выплачивают заработную плату, определяется его квалификацией.

Заработная плата – величина денежного вознаграждения, выплачиваемая наемному работнику за выполнение поставленной задачи, объема работ или своих непосредственных обязанностей в течении определенного времени [1].

Традиционно, выделяют две формы оплаты труда: сдельную и повременную. В первом случае оплата зависит от объема выполненных работ, в другом – от времени, на протяжении которого предприятие использовало рабочую силу.

Сдельная оплата труда подразделяется на: прямую сдельную, сдельно-премиальную, сдельно-прогрессивную, косвенную сдельную, аккордную, коллективную сдельную.

Повременная же оплата труда включает в себя такие разновидности как: прямую повременную и повременно-премиальную.

Сегодня, именно повременно-премиальная форма оплаты труда считается наиболее эффективной в бережливом производстве. И с каждым днем все большее количество управленцев с этим соглашаются.

Главным преимуществом для сотрудника является его фиксированный заработок, который не зависит от объемов производства. На практике, в условиях бережливого предприятия, данная особенность является незаменимой. Это позволяет предприятию делать ориентир на качество, избегая потерь, которые принесет с собой, например, сдельная форма оплаты труда: большого количества брака и потерь перепроизводства.

Идеология бережливого производства предусматривает необходимость развития личностных качеств у сотрудников на всех уровнях. Таким образом операторы на линии уделяют больше внимания правильности выполнения процесса, а не скорости изготовления изделия. Внимательность, коммуникабельность, осознание важности проделанной работы – и это далеко не полный список личностных качеств, при развитии которых и работник и работодатель только выиграют.

Условия премирования имеют своеобразный характер. По умолчанию работнику присваивается 100% премия. Мотивацией для него является – не «потерять» ее. Причины для сокращения премии у руководства обычно

прямые и понятные, например: нарушение техники безопасности, несоблюдение рабочих инструкций, нарушение правил компании и т.д.

Для личностной мотивации сотрудников в системе бережливого производства предусмотрен принцип постоянного совершенствования («Кайдзен»). Кайдзен, или по-английски, непрерывное улучшение, продвигает работы по совершенствованию, исходя из понимания, что никакой продукт, процесс или система не могут быть все время совершенными [2]. Принцип Кайдзен дает работнику возможность принять участие в совершенствовании путем, например, подачи рационализаторских предложений. Мотивацией для работников могут выступать материальные или духовные вознаграждения от руководства.

Современные системы контроля качества (Дзидока) практически исключают возможность потерь простоя на линии по причине ошибки оператора. Они представляют собой автоматизированные системы, которые встроены в производственную линию. К таким системам относятся: Пока-эке (Рока-уоке) – защита от ошибок, анализ первопричин, контроль источника ошибок и т.п. Все эти инструменты направлены на снижение возможности возникновения брака и, следовательно, к уменьшению брака на одного оператора.

Важными условиями свободного протекания потока внутри организации являются стандартизация рабочего места и рабочей инструкции. Когда у оператора на рабочем месте находится необходимый инструмент и он точно знает какие действия ему необходимо выполнять, когда оператор будет четко понимать свои действия и осознавать их важность, тогда и начинается процесс совершенствования.

Все приведенные выше принципы взаимосвязаны и вытекают один из другого. И для претворения бережливого производства в жизнь необходимо учесть все принципы, которые оно предлагает. Достижение данной задачи возможно только при повременно-премиальной форме оплаты труда.

Список литературы

[1] Юркова Т.И, Юрков С.В. Экономика предприятия – У.: УлГТУ, 2008 – Т.1, п.13.

[2] Ершова Е.В, Ключев А.В. Организационные и методические аспекты внедрения Бережливого производства в машиностроительных предприятиях: [сайт]. URL: <http://leansystems.ru> (дата обращения: 05.09.2016).

[3] Розенко Н.В. Стандартизация – универсальный инструмент улучшений: [сайт]. URL: <http://leansystems.ru> (дата обращения: 09.10.2016).

Сафронов Никита Максимович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: safro19940704@gmail.com

Калмыков Вадим Владимирович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru

А.Б. Мкртчян, Ф.И. Антонюк

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИАМЕТРА ЦИЛИНДРА ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Штучные заготовки, применяемые для основных формоизменяющих операций холодной объемной штамповки, выполняемых на прессах, изготавливают различными способами. Их выбор зависит не только от серийности производства, соотношения размеров штучных заготовок, но и от особенностей формоизменяющих операций [5].

В случае свободной осадки (открытой), осаживаемая цилиндрическая заготовка, даже при наличии эффективной технологической смазки, приобретает бочкообразную форму.

Для количественной оценки бочкообразности при горячем деформировании применяют объемный показатель, который не учитывает величины наибольшего диаметра бочки в срединном сечении ($d_{\bar{\sigma}}$) [3].

Цель выполненной работы- с помощью статистических методов анализа выявить степень и характер влияния коэффициента контактного трения, степени деформации осадки исходных заготовок и относительной высоты осажённых цилиндрических поковок на диапазон изменения наибольшего диаметра их боковой поверхности ($d_{\bar{\sigma}}$).

Для достижения поставленной цели был выполнен полный факторный эксперимент (ПФЭ²³) в котором в качестве отклика- принят наибольший диаметр осажённой штучной заготовки- $y(d_{\bar{\sigma}})$. Исследовали следующие факторы, влияющие на отклик: $x_1(\varepsilon)$ – степень деформации исходных заготовок по высоте, $x_2(d/h)$ – относительная высота исходных заготовок, $x_3(\mu)$ – коэффициент контактного трения.

Результаты эксперимента в виде матрицы плана ПФЭ²³ представлены в табл.1.

Таблица 1. План ПФЭ²³ и его результаты

№	ε	d/h	μ	$\bar{d}_{\bar{\sigma}}$, мм	№	μ	$\bar{d}_{\bar{\sigma}}$, мм	$\Delta \bar{d}_{\bar{\sigma}}$, мм	$\bar{\delta} \bar{d}_{\bar{\sigma}}$, мм
1	0,36	3,0	0,3	28,82	5	0,1	29,6	0,77	2,67
2	0,1	3,0	0,3	28,51	6	0,1	30,14	1,63	5,7
3	0,36	1,5	0,3	28,29	7	0,1	29,30	1,01	3,57
4	0,1	1,5	0,3	27,82	8	0,1	28,23	0,41	1,47

В результате обработки результатов эксперимента получены адекватные уравнения регрессионного анализа, определяющие зависимость отклика (d_{σ}) от исследуемых факторов [2].

Выводы

На основе многофакторных экспериментов с применением статистических методов анализа установили:

- Диапазон рассеяния наибольшего диаметра выпуклости боковой поверхности осажённых заготовок, определяющий их точность, зависит от их относительной высоты ($d_{\sigma}/h = 1,5$).
- При осадке относительно низких штучных заготовок ($d_{\sigma}/h = 3,0$) доминирующее влияние на изменение диаметра наибольшей выпуклости оказывает коэффициент контактного трения.
- При осадке относительно высоких штучных заготовок ($d_{\sigma}/h = 1,5$) изменение (рассеяние) диаметра выпуклости боковой поверхности практически в равной степени зависит как от коэффициента контактного трения, так и от степени осадки исходной заготовки.
- Влияние возможного изменения коэффициента контактного трения на изменение диаметра штучных заготовок зависит от совместного влияния факторов ε и d_{σ}/h .

Список литературы

[1] Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г., точность холодной осадки цилиндрических заготовок // КИШП.ОМД. – 2000. - №10. - с.16-21.

[2] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В, Мкртчян А.Б., Применение статистических методов анализа к оценке изменения диаметра цилиндра при холодной осадке// Фундаментальные исследования 2016 .- № 8-1 .- С. 9 – 13.

[3] Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учебное пособие: в 2т./А.Л.Воронцов. - м.: изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014.

[4] Евстратов В.А. Основа технологии выдавливания и конструирования штампов. –Харьков: Высшая школа, 1987.- 144с.

[5] Ковка и штамповка: справочник. (под ред. Г.А.Навроцкого). М.: Машиностроение, 1973-496с.

[6] Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – Киев: Наукова думка, - 1990. – 187с.

Мкртчян Арман Бениаминович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: armanmkrtchyan95@mail.ru

Антонюк Феликс Иванович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: antonyukfi@yandex.ru

И.Н. Исаков

СОКРАЩЕНИЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНО-ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ГРУППИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПО ИСПОЛЬЗУЕМОМУ ИНСТРУМЕНТУ

АО "Конструкторское бюро приборостроения им. академика
А.Г. Шипунова"

Совершенствование и дальнейшее развитие машиностроения все настойчивее ставит перед технологами задачу строгой классификации различных видов технологических процессов, основанной на объективных критериях, позволяющих оценить возможности и перспективность каждого из них.

К перспективным направлениям, обеспечивающим повышение качества и снижение трудоемкости при производстве деталей, следует отнести проектирование технологических процессов их изготовления на основе принципов оптимизации. Наиболее полное определение рациональных условий обработки должно базироваться на выборе наивыгоднейшей совокупности управляющих параметров, в число которых входит вид механической обработки, конструкция инструмента, марка инструментального материала или характеристика инструмента, режим резания и т.д. [1].

Для изготовления деталей со сложными поверхностями в настоящее время широко применяются станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Отдельное место занимает сравнительно новый вид оборудования – прецизионные токарные многшпиндельные автоматы продольного точения с ЧПУ. Механическая обработка на данном виде оборудования имеет свою специфику, что обусловлено возможностью производить как фрезерные, так и токарные операции [2]. В связи с этим вопрос о разработке технологических процессов на описанные станки мало изучен и требует подробной проработки.

Исследования по снижению подготовительно-заключительного времени обработки проводились на токарном автомате продольного точения с ЧПУ типа Nexturn SA-32e (рис.1).



Рис. 1. Общий вид станка Nexturn SA-32e

Выбранный станок имеет шпиндель и противошпиндель. Обработка детали производится последовательно или одновременно. При этом, оборудование позволяет вращать как деталь, так и инструмент (к примеру, при сверлении).

Выбранный станок можно рассматривать как совокупность пяти инструментальных блоков (рис. 2).

«Блок 1» предназначен для установки резцов при обработке детали, зажатой в шпинделе. При обработке вращается заготовка.

«Блок 2» предназначен для установки вертикального приводного (вращающегося) инструмента при обработке детали, зажатой в шпинделе. При обработке заготовка не вращается.

«Блок 3» предназначен для установки неприводного инструмента при обработке детали, зажатой как в шпинделе, так и в противошпинделе. При обработке вращается заготовка.

«Блок 4» предназначен для установки приводного и неприводного инструмента при обработке детали, зажатой в шпинделе. При обработке заготовка может вращаться или не вращаться.

«Блок 5» предназначен для установки приводного и неприводного инструмента при обработке детали, зажатой в противошпинделе. При обработке заготовка может вращаться или не вращаться.

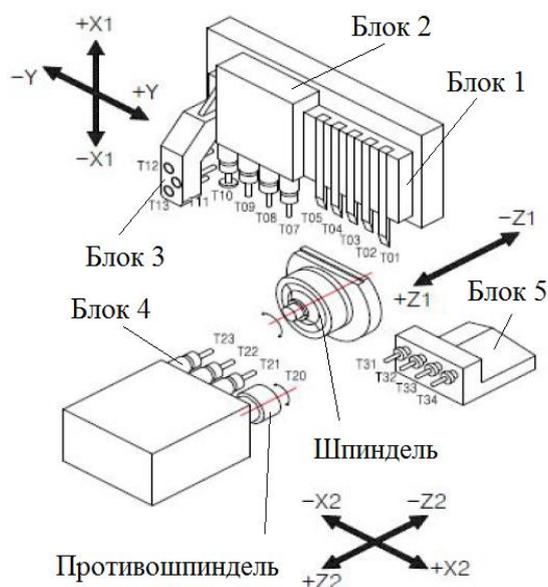


Рис. 2. Расположение инструмента в станке Nexturn SA-32e

Переналадка выбранного оборудования занимает значительную часть времени. Для сокращения количества переналадок или их частей предлагается использовать следующую систему.

Сначала детали разбиваются на группы с точки зрения использования инструментальных блоков (рис.3). Группы формируются следующим образом. В первую группу попадают детали, для обработки которых используются все пять инструментальных блоков, во вторую – детали, для изготовления которых необходимо использовать все блоки, кроме пятого, в тре-

тью группу – детали, для обработки которых используются все блоки кроме четвертого и т.д. Затем формируется группа деталей, для обработки которых необходимо использовать все блоки инструментов кроме пятого и четвертого; затем группа, для которой необходимо использовать все блоки, кроме пятого и третьего и т.д.; далее формируется группа деталей, для обработки которых необходимо использовать все блоки инструмента, кроме четвертого и третьего; затем группа, для которой необходимо использовать блоки, кроме четвертого и второго и т.д. По аналогичной схеме перебираются все варианты возможного группирования деталей.

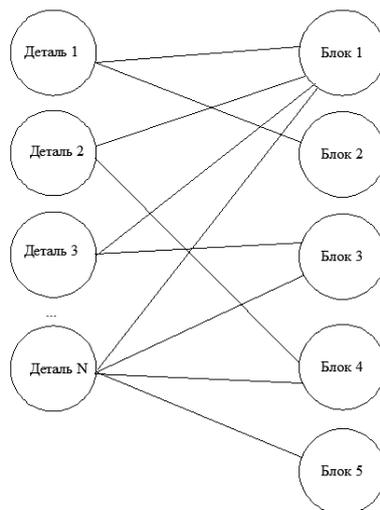


Рис. 3. Формирование групп деталей по критерию использования инструментальных блоков

Таким образом, выявляются группы, в которых детали подобраны по критерию использования инструментальных блоков. Далее каждую группу необходимо разбить на подгруппы по критерию использования конкретных инструментов.

Разработанная методика позволит существенно сократить подготовительно-заключительное время обработки и количество переналадок оборудования.

Список литературы

[1] *Волчкевич И.Л.* Исследование фактической работоспособности современного высокопроизводительного оборудования с ЧПУ // *Машиностроение и техносфера XXI века.*: Сборник докладов XVII международной научно-технической конференции. Донецк, 2011. - С. 144-145.

[2] *Писаренко В.В.* Повышение точности обработки на автоматах продольного точения с ЧПУ.: Сборник докладов XI международной научно-технической конференции. Прага, 2015. - С. 30-35.

Исаков Иван Николаевич - Ведущий инженер технолог АО "Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова".
E-mail: isakovin2016@yandex.ru

И.А. Филиппова, В.Е. Хайченко

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Литейное производство России является основной заготовительной базой машиностроительного комплекса и его развитие зависит от темпов развития машиностроения в целом. По сравнению с другими заготовительными производствами (сварка,ковка) литейное производство отличается высоким коэффициентом использования металла (от 75 до 98%). Наряду с этим литейное производство обеспечивает получение сложных по геометрии и конфигурации литых заготовок с внутренними полостями, что практически невозможно получить методами сварки иковки. Поэтому литейное производство и в дальнейшем сохранит свое лидирующее положение среди заготовительных производств.

Перспективы развития литейного производства определяются потребностью в литых заготовках. Объемы производства литых заготовок находятся в пропорциональной зависимости от объемов производства машиностроительной продукции, так как доля литых деталей в автомобилях, тракторах, комбайнах, танках, самолетах и других машинах составляет 40-50%, а в металлорежущих станках и кузнечнопрессовом оборудовании доходит до 80% массы и до 25% стоимости изделия.

Резкое снижение выпуска продукции энергетического, тяжелого машиностроения, судостроения, металлорежущих, деревообрабатывающих станков и кузнечнопрессового оборудования, тракторов, военной техники и др., начиная с 90-х гг., привело к тому, что выпуск отливок в России сократился с 18,5 млн. тонн в 1985 г. до 4,85 млн. тонн в 2000 г. И тенденция к снижению продолжает сохраняться, хотя сложная внешнеэкономическая ситуация дает предпосылки к оживлению экономической ситуации в стране в рамках импортозамещения по многим видам продукции.

Подъем литейного производства в значительной мере зависит от совершенствования проектных работ, использование передового мирового опыта и достижений. Повышение механических свойств и точности отливок, экологическая безопасность – вот конкурентные преимущества, которые обеспечат успех данных проектов. Замена части устаревшего оборудования в ходе модернизации предприятий не дает существенных результатов. Необходим комплекс технологических решений по реализации приоритетных направлений. Существенную роль в этом призваны играть информационные технологии (компьютерное проектирование и моделирование процессов, электронные расчеты, базы данных и архив), технологии быстрого прототипирования литейных форм и технологической оснастки.

Реализация стратегии энергосбережения и энергоэффективности – еще два «кита», на которые должна опираться успешная модернизация. Показатели производительности труда в России в 4 раза ниже, ресурсоемкость в основных отраслях в 3-7 раз выше, а энергоемкость – почти в 7 раз превышает аналогичные показатели стран Евросоюза и США. Сокращение расходов на потребляемые ресурсы и энергоносители – важнейшая задача в достижении конкурентоспособности, решение которой невозможно без внедрения новых технологий, автоматизации процессов. Технологии производства призваны обеспечить надежность и точность получаемой заготовки и экологичность ее производства.

Модернизацию литейного цеха следует начинать с концепт-проекта, содержащего решения по экологической безопасности на всех технологических процессах. В последние годы широкое распространение нашли литейные процессы с применением ХТС на синтетических связующих. По экспертным оценкам именно эти технологии дают до 70% загрязнений окружающей среды от литейных цехов в виде фенолов, формальдегидов, аммиака, канцерогенного бензопирена и др.

Ситуация может существенно улучшиться с применением связующих неорганического происхождения, разработка которых в настоящее время ведется (металлофосфатные смеси, связующие на основе сульфата магния и др.). Не заслуженно забытыми оказались жидкостекольные технологии, по применению которых наша страна всегда имела лидерские позиции.

Из существующих технологии только несколько могут претендовать на соответствие требуемым критериям (Вакуумно-пленочная формовка, «ФОСКОН-процесс» и некоторые др.).

Инновационное развитие литейного производства сдерживается острым дефицитом инженерных и рабочих кадров, к чему привели разрушение системы профессионального образования, и перевод ВУЗовской подготовки кадров на Болонскую систему. Вместо инженеров ВУЗы выпускают бакалавров, которые имеют лишь общее представление о специальности и станут специалистами лишь через 5-10 лет. Такие кадры не способны решить насущные вопросы промышленности, деградация кадрового потенциала угрожает национальной безопасности страны. Сегодня назрела необходимость в реформировании системы образования, т.к. возрождение национальной экономики невозможно без высококвалифицированных кадров.

Сегодня инженеров-литейщиков готовят 44 специализированные кафедры и 13 филиалов по двум специальностям: “Машины и технология литейного производства” и “Литейное производство черных и цветных металлов”. Разделение литейных кафедр России по двум специализациям дает больше отрицательных, нежели положительных результатов. В 2002 г. на литейные специальности были приняты 1047 выпускников школ, а выпущены 810 молодых специалистов. Конкурс по приему в вузы на нашу специальность растет. Однако более 70% молодых специалистов не полу-

чают направлений на предприятия и не работают по специальности. На заводах старое поколение уходит, а замены нет, молодые специалисты не хотят работать за низкую зарплату.

Безусловно, заслуживает внимание практика нашей учебной системы, когда после бесплатной формы обучения обязательной была отработка по полученной специальности. Хорошо в свое время зарекомендовало себя и «дуальное инженерное образование» - обучение во ВТУЗах, когда теоретические знания подкреплялись практикой конкретного производства с учетом его специфических особенностей.

В настоящее время развитие производства высококачественных отливок на базе современных технологических процессов в различных отраслях машиностроения осуществляется неравномерно. Наиболее высокие объемы производства отливок наблюдаются в транспортном (автомобильном, железнодорожном и коммунальном) машиностроении, тяжелом и энергетическом машиностроении и оборонной промышленности. Т.е. динамика развития прослеживается в отраслях, обеспеченных инвестициями, заказами, приоритетными программами развития. Остальные заготовительные производства не развиваются, теряют конкурентоспособность и закрываются. Проблема широкомасштабной модернизации остается не решенной.

Намечая программу развития литейного производства необходимо экспертное решение ведущих отечественных специалистов, опыт зарубежных коллег. Весь Запад работает по кооперации. Предприятия, специализирующиеся на литье - это отдельные предприятия, именуемые в промышленной статистике джоббинговыми (от - *случайный, нерегулярный*) имеют, как правило, мелкосерийную и относительно широкую номенклатуру различных по назначению, развесу, конструкции, габаритам, точности, типам и маркам сплава и даже способам изготовления отливок. Такие предприятия являются более гибкими с точки зрения возможности диверсификации производства, которая выражается в непрерывном расширении номенклатуры литых заготовок, выпускаемой каждой фирмой, в том числе и подетально-специализированной. Диверсификация играет все возрастающую роль как особая форма приспособляемости в условиях переменчивого и неустойчивого рынка. Она экономически выгодна как для мелких, так и особенно для крупных компаний, поскольку дает возможность перестраховаться от убытков при уменьшении спроса на какой-либо тип отливок за счет реализации литья другого назначения или вообще нелитейной продукции и услуг. необходимо выделение литейных цехов в отдельные структурные подразделения. Освобождаясь от огромных общезаводских накладных расходов, они смогут устанавливать на литье конкурентоспособные цены. Создание центров литья (стального, чугунного, цветного, точного и т.п.), работа в аутсорсинге и по кооперации.

В области технологий необходим переход на плавку металлов в индукционных печах промышленной и высокой частоты. Технология плавки

более экономична, имеет высокий КПД по сравнению с дуговыми печами, правда, предъявляет повышенные требования к шихтовым материалам. Все большее распространение получает транспортировка жидкого металла непосредственно в литейные цеха машиностроительных заводов из цехов металлургических заводов. В этом случае экономится до 50% потребления в цехе энергии. (*Транспортировка жидкого чугуна на расстоянии до 15 км используется во Франции, а в США до 550 км. Алюминий в жидком состоянии в Европе и США перевозится на расстоянии более 3 тыс. км.* Есть такие примеры и на Урале, в частности транспортировка жидкого алюминия с УАЗа на КУМЗ в Каменск-Уральском.

Инновации в литейном производстве призваны сделать литейный процесс более эффективным по затратам сырья, времени, ресурсов, снизить уровень связанных с литейным производством запыленности, шума, вибраций, теплового излучения, повысить качество готовой продукции.

Список литературы:

[1] Дибров И.А. Состояние и перспективные технологии развития литейного производства России. *Труды 11-го съезда литейщиков России.* - Екатеринбург, 2013, с. 3-19.

[2] Ткаченко С.С., Кривицкий В.С. Потенциал литейного производства Санкт-Петербурга и Ленинградской области. *Литейное производство сегодня и завтра. Труды 11-й международной конференции.* СПб: Культинформ-пресс, 2016, с.15-25.

Филиппова Инна Аркадьевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katran-ogmet-04@yandex.ru

Хайченко Виктор Ефимович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kniizst2012@yandex.ru

В.В. Калмыков, О.С. Федорова

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТОЧЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Обработка наружных поверхностей вращения. Наружные поверхности вращения обрабатываются различными методами: точением, шлифованием, суперфинишем, полированием, притиркой, отделочно-упрочняющей обработкой и т.д. Точение обычно подразделяется на черновое, получистовое, чистовое и тонкое (алмазное). При черновом точении снимают большую часть общего припуска и напуск с приданием заготовке формы, приближающейся к форме детали. Достигаемая при этом точность: 12-14 квалитет, шероховатость - $Rz = 60 \div 200$ мкм. Получистовое точение позволяет получить точность: 10-12 квалитет, шероховатость $Rz = 10 \div 80$ мкм. Чистовое точение проводят обычными резцами при больших скоростях резания и малых подачах или широкими резцами при малых скоростях резания ($V = 2 \div 10$ м/мин) и больших подачах S до 20 мм/об. Оно позволяет получить 8-10 квалитеты точности, шероховатость $Ra = 0.8 \div 2.5$ мкм. Тонкое (алмазное) точение проводится алмазными резцами или резцами, оснащенными твердым сплавом или керамикой, при высоких скоростях резания ($V = 800-1000$ м/мин) и малых подачах ($S = 0.03 \div 0.8$ мм/об). Оно позволяет обеспечить 6-7 квалитет точности и шероховатость $Ra = 0.1 \div 0.6$ мкм. Тонкое (алмазное) точение, как правило, применяется для отделочной обработки деталей из цветных металлов и сплавов (бронзы, латуни, алюминиевых сплавов и т.п.) и для деталей из высокопрочных чугунов и закаленных сталей. Для повышения производительности труда при точении наружных поверхностей вращения применяется многолезцовая обработка[2, с. 14].

Таблица 1. Качество поверхности детали при точении

Вид точения	Точность детали	
	квалитет	шероховатость
черновое	12-14	$Rz = 60 \div 200$ мкм
получистовое	10-12	$Rz = 10 \div 80$ мкм
чистовое	8-10	$Ra = 0.8 \div 2.5$ мкм
тонкое	6-7	$Ra = 0.1 \div 0.6$ мкм

Был проведен полный факторный эксперимент по известной методике [1], в котором факторы установлены на двух уровнях. В частности, частоту

вращения шпинделя (n) изменяли от 500об/мин ($X_1 = -1$) до 1000об/мин ($X_1 = +1$); подача (S) – от 0,075 мм/об ($X_2 = -1$) до 0,15 мм/об ($X_2 = +1$).

В качестве отклика (Y) фиксировалась шероховатость обработанной поверхности (R_a^6). Измерение шероховатости поверхностей выполнялось на профилометре-профилографе модели АБРИС — ПМ7.

В качестве объекта исследования был взят пруток марки ЛС-59. Диаметр заготовки 55 мм. Все опыты в эксперименте повторены по 3 раза и их последовательность рандомизирована.

Таблица 2. Матрица эксперимента ПФЭ 2^2

№	X_0	X_1	X_2	X_1X_2
1	+	+	+	+
2	+	-	+	-
3	+	+	-	-
4	+	-	-	+

План эксперимента с учетом равномерного дублирования опытов с результатами экспериментов представлен в таблице 3

Таблица 3. Результаты эксперимента

№	S	n	Параллельные опыты, R_a мкм			\bar{Y}_i	S_i^2
			Y_1	Y_2	Y_3		
1	0.15	1000	1,67	1,68	1,66	1,670	0,000100
2	0.075	1000	1,43	1,42	1,44	1,430	0,000100
3	0.15	500	1,78	1,77	1,75	1,767	0,000233
4	0.075	500	2,04	2,04	2,06	2,047	0,000133

Получено уравнение регрессионного анализа в нормализованном масштабе:

$$y(Ra) = 1.73 - 0.01 \cdot X_1(S) - 0.178 \cdot X_2(n) + 0.13 \cdot X_1 \cdot X_2(S \cdot n). \quad (1)$$

На основе полученной модели в виде уравнения (1) можно сделать следующие выводы:

1) Наиболее сильное влияние на отклик (шероховатость обточенной поверхности) оказывает скорость обработки (n). Влияние этого фактора в 1.4 раза сильнее эффекта взаимодействия факторов n и S , а так же почти в 18 раз сильнее влияния подачи.

2) Увеличивая скорость с 500 до 1000 об/мин уменьшается шероховатость. Увеличивая подачу от 0,075 до 0,15 шероховатость уменьшается.

Сильное влияние эффекта взаимодействия объясняется тем, что влияние подачи возрастает с увеличением скорости обработки.

Список литературы

[1] *Новик Ф.С., Арсов Я.Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.

[2] *Суслов А.Г.* Технология машиностроения. — М.: КНОРУС, 2013. — 336 с.

Калмыков Вадим Владимирович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru

Федорова Оксана Сергеевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: oksana.fedorova.92@gmail.com

А.Г. Вяткин, Д.И. Бычков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ УСТАНОВКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВОК НА ПЛОСКИЕ ОПОРЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Станочные приспособления являются необходимым звеном технологической системы. Назначение станочных приспособлений — базирование и закрепление (установка) заготовок.

Основными задачами приспособлений являются:

- Надежная установка и закрепление заготовки;
- Повышение производительности;
- Обеспечение заданной точности.

Обеспечение заданной точности зависит от упругих деформаций в стыке «заготовка – опоры приспособления».

Смещение измерительной базы заготовки происходит в результате упругой деформации звеньев цепи, через которую передается сила закрепления (заготовка – установочные элементы – корпус приспособления). Из всего баланса перемещений в этой цепи наибольшую величину имеют перемещения в стыке заготовка – установочные элементы. Контактные деформации в постоянных сопряжениях приспособления, деформации сжатия заготовки и деталей приспособления малы.

Зависимость контактных деформаций для стыков заготовка – опоры приспособления выражается нелинейным законом [1]:

$$y = CQ^n,$$

где Q – сила, приходящаяся на опору ($n < 1$) (Н); C – коэффициент, характеризующий вид контакта, материал, шероховатость базовой поверхности и верхний слой заготовки.

$$C = f(HB, R_a, F),$$

где HB – твердость материала заготовки по Бринеллю; R_a – параметр шероховатости базовой поверхности заготовки (мкм); F – площадь контакта опоры с заготовкой (см²).

Зависимость контактных деформаций при установке заготовок на плоские опоры приспособления выражается нелинейным законом [1]:

$$y = C \left(\frac{Q}{F} \right)^n$$

Для типовых случаев коэффициенты C и n находят экспериментально. Аналитическое решение контактной задачи затруднительно, так как на поверхностях заготовки имеются микро- и макронеровности, при соприкосновении которых с установочными элементами возникают неправильные и случайно расположенные места контакта [1].

В справочнике [2] приведены значения коэффициента C только для заготовок из стали и чугуна. Следовательно, необходимо провести исследования для других материалов.

Чтобы определить коэффициенты C и n для заготовок из алюминиевых сплавов, установленных на плоские опоры необходимо выполнить экспериментальные исследования.

Для эксперимента необходимо учесть такие факторы, как твердость заготовки, шероховатость базовой поверхности заготовки и площадь плоских установочных опор приспособления. В таблице 1 представлены уровни факторов, влияющих на экспериментальное значение коэффициента C .

Таблица 1

Факторы	Уровни факторов		
	1	0	-1
X_1 (HB)	76	73	70
X_2 (Ra), мкм	6,3	3,55	0,8
X_3 (F), см ²	6,032	3,77	1,51

Выполнив статистическую обработку результатов эксперимента было получено уравнение регрессионного анализа в натуральном и нормализованном масштабах.

Уравнение регрессионного анализа в нормализованном масштабе:

$$y = 67,25 - 4,17 \cdot X_1(HB) + 7,33 \cdot X_2(Ra) - 0,83 \cdot X_3(F) - \\ - 1,25 \cdot X_1 X_2 (HB \cdot Ra) - 0,58 \cdot X_1 X_3 (HB \cdot F) + 2,92 \cdot X_2 X_3 (Ra \cdot F) + \\ + 1 \cdot X_1 X_2 X_3 (HB \cdot Ra \cdot F)$$

где y – упругая деформация стыка "заготовка – установочные элементы приспособления" (Δu , мкм)

Уравнение регрессионного анализа в натуральном масштабе:

$$y = 51,56 + 0,19 \cdot HB + 26,71 \cdot Ra + 18,13 \cdot F - \\ - 0,35 \cdot HB \cdot Ra - 0,28 \cdot HB \cdot F - 3,44 \cdot Ra \cdot F + 0,054 \cdot HB \cdot Ra \cdot F$$

Таким образом полученное уравнение в натуральном масштабе является коэффициентом C .

При постоянных уровнях факторов, а именно: диаметр плоской опоры – 16 мм., шероховатость базовой поверхности заготовки – Ra 0,8 мкм., твердость заготовки – HB 76 и постепенном увеличении силы закрепления были получены экспериментальные значения упругой деформации стыка "заготовка – установочные элементы приспособления". Используя эти значения методом аппроксимации было найдено экспериментальное значение коэффициента n . На рисунке 1 показан график аппроксимации экспериментальных значений.

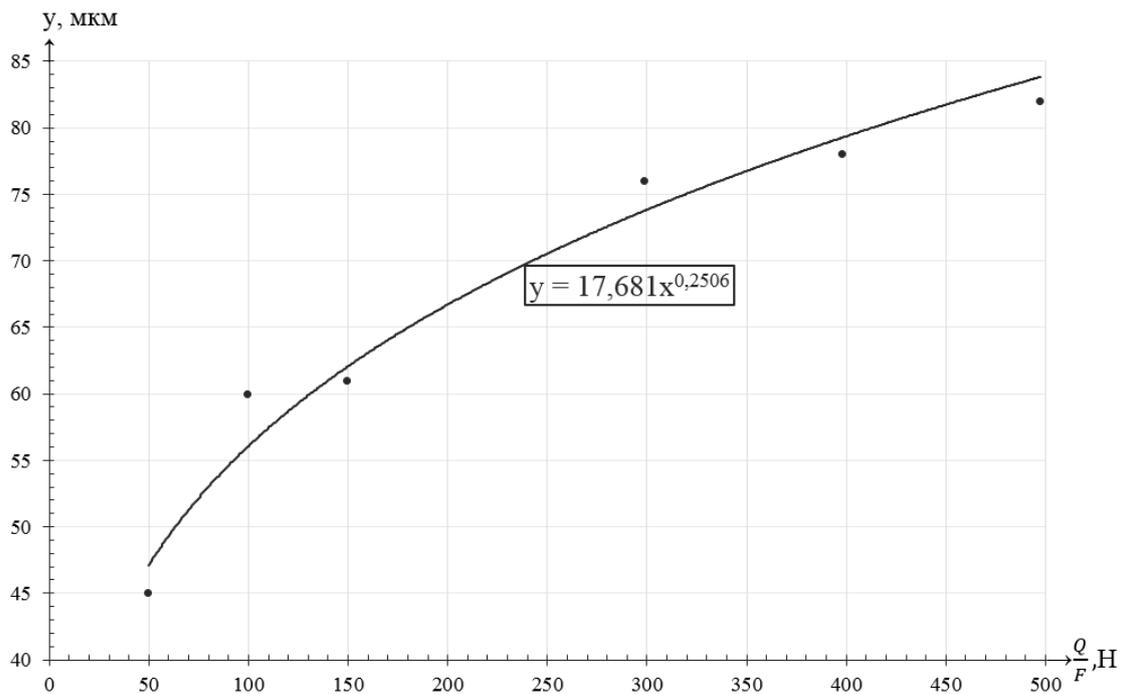


Рис. 1 График аппроксимации экспериментальных значений

Исходя из графика можно сделать вывод, что экспериментальный коэффициент n можно принять равным 0,25 при расчетах упругих деформаций в местах контакта алюминиевой заготовки и плоских опор.

Вывод: в результате проведенных экспериментальных исследований было получено экспериментальное уравнение для расчета коэффициента C и экспериментальное значение коэффициента n при установке заготовок из алюминиевого сплава Д16 на плоские опоры. Эти коэффициенты позволяют определить погрешность, вызванную силами закрепления алюминиевой заготовки в приспособлении.

Список литературы

[1] Корсаков В.С./ Основы конструирования приспособлений М.: Машиностроение, 1983. 277с.

[2] Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. С74 Т1/Под ред. А М Дальского. А Г Косиловой. Р К Мешерякова. Л Г. Сулова 5 с изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение-1,2001. 912 с., ил.

Вяткин Андрей Геннадьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

Бычков Дмитрий Игоревич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Swanky.Dmitry@yandex.ru

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Кухто, Т.Г. Чернова

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Преимущества стали 30ХГСА. Сталь 30ХГСА относится к категории «конструкционная легированная». Сталь данной марки предназначалась для авиастроения, но благодаря своим отличным характеристикам нашла более широкое применение.

Высокие прочностные свойства стали 30ХГСА достигаются за счет повышенных содержаний углерода и легирующих элементов, увеличивающих прокаливаемость стали и прочность феррита, а также применения термообработки - нормализации или закалки с последующим низким или высоким отпуском.

Среднелегированная конструкционная сталь 30ХГСА содержит повышенное количество углерода (до 0,35 - 0,5%) и легирована такими элементами, как кремний, марганец, хром в количестве до 1,2%.

Это сочетание свойств обуславливает ее применение в конструкциях особо ответственного назначения, работающих в тяжелых условиях в энергомашиностроении, тяжелом и химическом машиностроении, самолетостроении, судостроении и других отраслях промышленности.

Технологические свойства материала. Особенностью сварки стали 30ХГСА является повышенная склонность к холодным сварочным трещинам. Увеличение сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин достигается применением предварительного подогрева до 200-250 С⁰, а также высокого отпуска после сварки при температуре 650 С⁰ в течение 0,5-1,5 ч.

Данный вид стали перед проведением обработки давлением необходимо отжечь при температуре 680 С⁰ с остыванием или на воздухе (толщина металла более 3 мм), или в вакууме (толщина металла до 3 мм).

Для обработки резанием детали подаются в сыром состоянии, а для шлифовки необходима термическая обработка, вследствие чего обеспечивается достаточно высокая твердость 34-40 HRC, что обеспечивает точность при получении размеров.

Проблемы сварки тонкостенных конструкций сложной геометрии. Основной проблемой сварки тонкостенных конструкций является коробление отдельных деталей вследствие местного термического воздействия сваркой. Для устранения данной проблемы необходимо применять специальные фиксирующие приспособления, которые позволяют выдержать заданные чертежом размеры и упростить последующую механическую обработку.

Возможные дефекты и их предотвращение. Сварка тонколистового металла осложнена тем, что очень часто возникают дефекты типа прожог. Поэтому для сварки тонколистовой стали применяется импульсная дуга. Так же возможны дефекты: кратер и непровар. Первый вид дефектов возникает вследствие резкого обрыва дуги по окончании выполнения сварки, второй, наиболее часто, встречается при выполнении угловых и тавровых швов из-за недостаточной мощности сварочного тока, вследствие чего и возникает не полное проплавление свариваемых деталей.

Список литературы

[1] Колганов Л.А. Сварочные работы. Сварка, резка, пайка, наплавка: Учебное пособие. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2003. – 408 с.

[2] Рыбаков В.М. Дуговая и газовая сварка. – М.: Высш. шк., 1986. - 208 с., - ил.

[3] Чернышов Г.Г. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением. [Электронный ресурс]: Учебные пособия / Г.Г. Чернышов, Д.М. Шашин. — Электрон. дан. — СПб.: Лань, 2013. — 464 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/12938> — Загл. с экрана.

[4] Гладков Э.А. Управление технологическими параметрами сварочного оборудования для дуговой сварки. [Электронный ресурс]: Учебные пособия / Э.А. Гладков, А.В. Малолетков. — Электрон. дан. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 148 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/62060> — Загл. с экрана.

[5] Зорин Н.Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением. [Электронный ресурс]: Учебные пособия / Н.Е. Зорин, Е.Е. Зорин. — Электрон. дан. — СПб.: Лань, 2016. — 164 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/74676> — Загл. с экрана.

Кухто Алексей Владимирович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: codesastartes@gmail.com

Чернова Татьяна Георгиевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chernova-tg@yandex.ru

Г.В. Федоренко, И.Н. Зыбин

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛИ “СТАКАН” СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКИ ПРОВОЛОКОЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время в условиях рыночных отношений в экономике важной задачей является продление ресурса имеющихся деталей машин путем их восстановления.

Для восстановления наружных цилиндрических поверхностей деталей машин могут применяться различные технологии: дуговые способы наплавки, напыление с оплавлением и без оплавления, электроконтактные способы и др. Выбор той или иной технологии связан прежде всего с необходимостью обеспечения требуемого качества восстановления при наименьших экономических затратах (минимальной себестоимости) на восстановление [1].

Одной из ресурсосберегающих технологий восстановления различных деталей машин и механизмов является электроконтактная наварка проволокой (ЭКНП). К достоинствам технологии следует отнести минимальное тепловложение в основной металл, благодаря чему зона термического влияния (ЗТВ) имеет меньшие размеры, чем при дуговых способах восстановления. Зачастую это обеспечивает незначительные формоизменения деталей по сравнению с дуговой наплавкой. Наварка позволяет восстанавливать цилиндрические поверхности деталей различного диаметра (от 10 мм и более), обеспечивая необходимую твердость наваренного металла подбором присадочной проволоки соответствующего химического состава. ЭКНП в течение многих лет успешно применяется для восстановления наружных цилиндрических поверхностей деталей типа “вал” [2].

Кроме деталей типа “вал” часто возникает необходимость восстановления цилиндрических поверхностей деталей типа “втулка”. Одним из представителей таких деталей является стакан подшипникового узла. В качестве примера на рис. 1 показан стакан подшипникового узла. Восстанавливаемая поверхность имеет диаметр 82 мм. Материал стакана – сталь 40Х.

Опыт восстановления подобных деталей и результаты исследований показывают, что при наварке таких деталей возможны формоизменения внутренних радиальных и продольных размеров [3,4]. Изменения продольных размеров, как правило, после ЭКНП находятся в пределах допуска на размер. Изменения внутренних радиальных размеров может быть различным. После наварки внутренние радиальные размеры могут быть в пределах допуска на последующую механическую обработку. В этом случае применение технологии ЭКНП экономически целесообразно. В случае, если после наварки не обеспечивается требуемый допуск на последующую

механическую обработку внутренних размеров детали, то необходимо предусмотреть дополнительные технологические мероприятия, направленные на обеспечение требуемого допуска (например, изготовление и установка цанговых распоров) при использовании технологии ЭКНП. В этом случае следует рассмотреть экономические затраты на применение альтернативных вариантов восстановления детали и сравнить их с экономическими затратами на ЭКНП. Выбор технологии восстановления будет определяться минимальными экономическими расходами на восстановление при обеспечении требуемого качества.

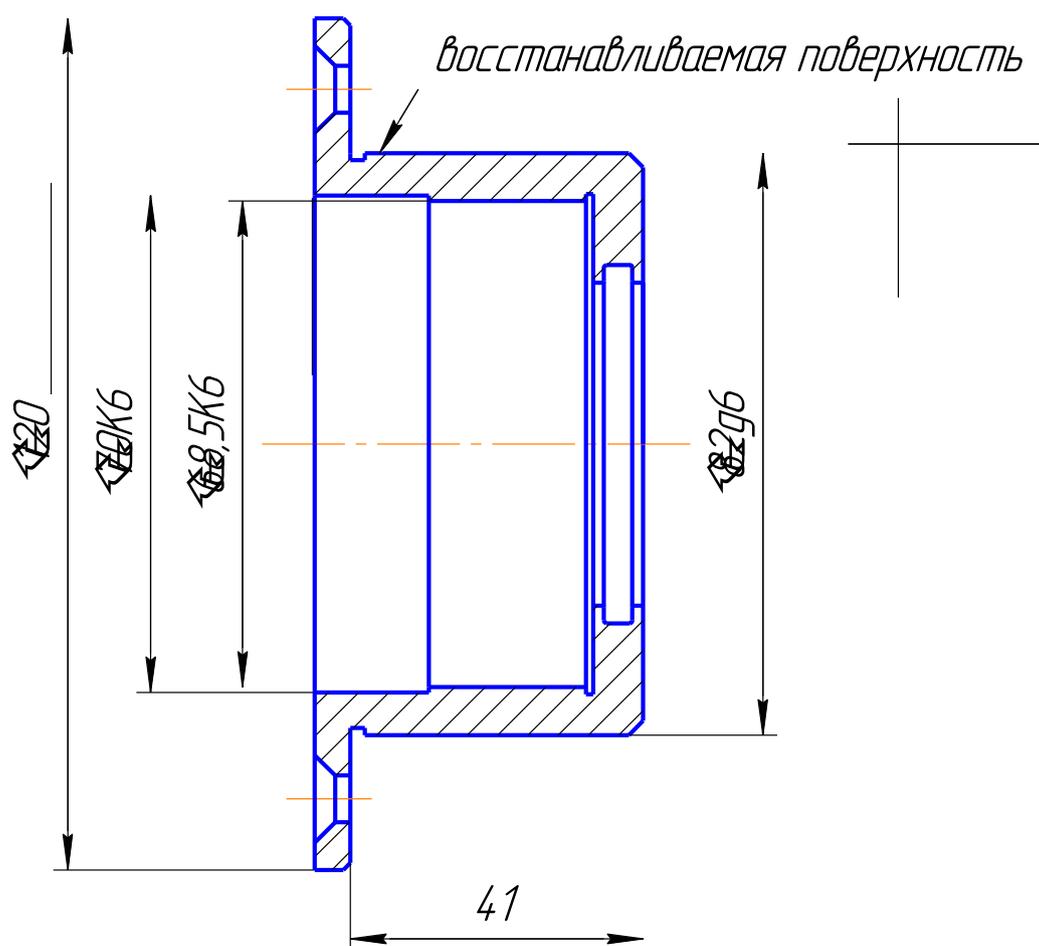


Рис. 1. Стакан подшипникового узла

Таким образом, при восстановлении деталей типа “втулка”, в частности стакана, необходим комплексный подход в выборе варианта восстановления ЭКНП, связанный с прогнозированием радиальных формоизменений в зависимости от количества требуемых слоев наварки, а также с экономической целесообразностью применения электроконтактной наварки.

Список литературы:

[1] Экономика организаций (предприятий) / под ред. И.В. Сергеева. 3-е изд., перераб. и доп. М.: «ТК Велби», изд-во «Перспект», 2005. 560 с.

[2] Дубровский В.А., Зезюля В.В. Применение технологий электроконтактной наварки проволокой при восстановлении различных деталей машин и механизмов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. № 8. с. 15-20

[3] Дубровский В.А., Зезюля В.В., Зыбин И.Н., Карчагин А.В. Формоизменения деталей типа «втулка» при электроконтактной наварке проволокой // Сварка и диагностика. 2014. № 6. с. 40-45

[4] Дубровский В.А., Зезюля В.В., Зыбин И.Н., Карчагин А.В. Разработка методики расчета остаточных формоизменений деталей типа «втулка» при электроконтактной наварке проволокой их наружных поверхностей [Электронный ресурс]. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_137_Dubrovskiy.pdf_b220745e3a.pdf (дата обращения 10.10.2016)

Федоренко Григорий Вячеславович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: g.v.fedorenko@yandex.ru

Зыбин Игорь Николаевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igor1zybin@yandex.ru

Г.В. Орлик, А.Г. Орлик, А.В. Нестеров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБКИХ ШНУРОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАПЛАВКЕ СЛОЕВ СТОЙКИХ К ИЗНОСУ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время для повышения ресурса работы деталей, работающих в условиях абразивного и гидроабразивного износа применяются композиционные материалы. Применяемые в промышленности способы наплавки позволяют получать покрытия с комбинированной структурой при этом в качестве присадочных материалов применяют порошкообразные материалы, порошковые проволоки, а также гибкие шнуровые материалы (ГШМ).

Гибкие шнуровые материалы – новый класс непрерывных присадочных материалов, предназначенных для создания поверхностных покрытий с широким комплексом эксплуатационно - технологических свойств. На рисунке 1 представлен внешний вид гибкого шнурового материала. [1]

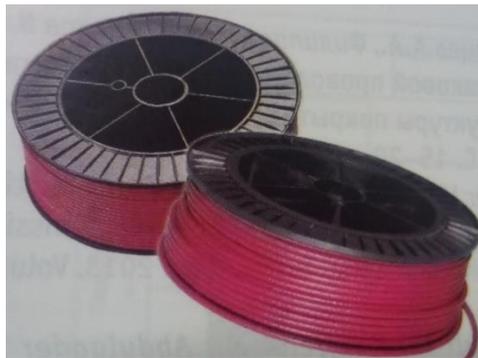


Рис. 1. Внешний вид ГШМ кассеты

В состав сердечника входят порошковые материалы металлические, керамические или композиционные связанные органическим связующим и помещенные в эластичную высокопрочную полимерную оболочку рисунок 2.



Рис 2. Поперечное сечение ГШМ

Связующие компоненты и оболочка сублимируются в процессе нагрева при температуре 400 градусов Цельсия без отложения на подложку. Гибкие шнуровые материалы специально разработаны для процессов газопламенного напыления и наплавки.

Применение таких материалов имеет все преимущества, характерные для порошкообразных материалов, при отсутствии сегрегации компонентов в процессах смешивания и транспортирования механической смеси, что особенно важно в случаях применения многокомпонентных механических смесей различного гранулометрического состава.

ГШМ могут быть использованы в качестве присадочных материалов для механизированной сварки в среде защитных газов, так и для газопламенной наплавки. Недостатком данного способа является низкая производительность. Преимуществом наплавки является, то, что она позволяет гибко и независимо регулировать нагрев основного и присадочного металла. Применяется газопламенная наплавка в основном для наплавки чугуна, твердых сплавов, латуни.

В процессе наплавки на марганцовистые, высокоуглеродистые и хромомолибденовые стали (включая и серые чугуны) необходимо обеспечивать требуемый предварительный нагрев и определенную скорость охлаждения после сварки. Если не будут соблюдаться данные условия, то возможно появление трещин. ГШМ всегда должен находиться в зоне пламени. На рисунке 3 представлен процесс нанесения покрытия газопламенным способом. В процессе нанесения покрытия нельзя допускать касания пламени ядром расплавленного металла, что может привести к появлению дефектов. Срез мундштука горелки должен быть на расстоянии 50 мм от наплавляемой поверхности. [2]



Рис. 3. Процесс наплавки газопламенным способом

Исходя из особенностей нанесения покрытий стойких к абразивному и гидроабразивному износу данный способ может, применяться, но ограничено.

Для обеспечения требуемого комплекса свойств наплавленной поверхности стойкой износу, более технологично применять механизированную наплавку неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитных газов с применением в качестве присадочного материала. С этой целью были проведены ряд исследований по влиянию угла наклона изделия при наплавке на стойкость к абразивному и гидроабразивному изнашиванию. Наплавка образцов производилась нескольких режимах наплавки.

Серия опытов при горизонтальном расположении наплавленной поверхности. Режим сварки $I=200\text{A}$, $U=20\text{В}$, Скорость подачи ГШМ $0,22\text{ м/мин}$, скорость наплавки 18 м/ч , расход защитного газа $Q=12\text{ л/мин}$ количество подходов 3.

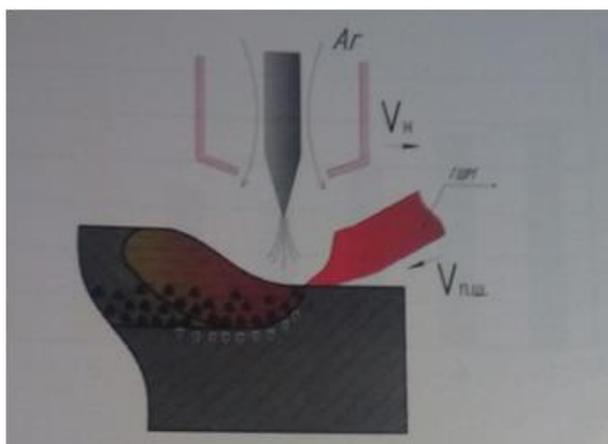


Рис. 4. Графическая модель поведения частиц карбида вольфрама при наплавке в нижнем положении



Рис. 5. Макроструктура валика при сварке в нижнем положении

Серия опытов была проведена в наклонном положении при угле наклона 60° наплавленной поверхности от горизонтали. Режим сварки $I=150\text{A}$, $U=24\text{В}$, Скорость подачи ГШМ $0,22\text{ м/мин}$, скорость наплавки 9 м/ч , расход защитного газа $Q=12\text{ л/мин}$, количество подходов 1.

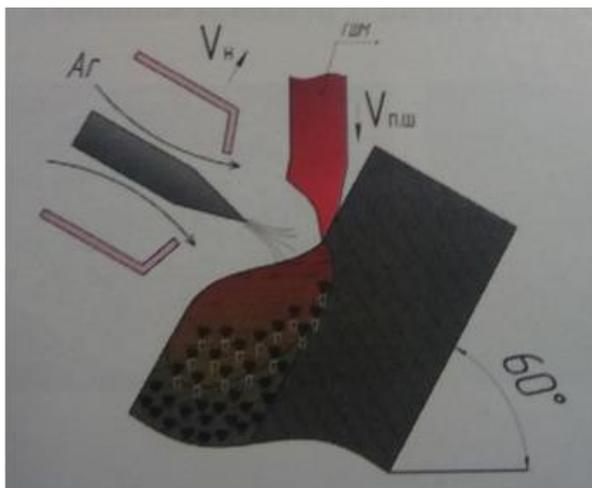


Рис. 6. Графическая модель поведения частиц карбида вольфрама в сварочной ванне при наплавке «на подъем»



Рис. 7. Макроструктура валика при сварке на подъем

Вывод:

Наибольшая равномерность распределения армирующих частиц в наплавленном металле наблюдается при применении техники на подъем, что делает предпочтительным ее использование.

Список литературы

[1] Орлик Г.В., Орлик А.Г., Коберник Н.В., Ковалев В.В. Формирование композиционных покрытий при дуговой наплавке с использованием гибкого шнурового материала // Сварка и диагностика — 2014. — №5. — С.23–27.

[2] Затока А.Е., Борисов В.Н. Газотермическое напыление и наплавка с использованием гибких шнуровых материалов // Труды 6-й международной конференции под ред. Клубника В.С. — 2001. — С.23–32.

Орлик Геннадий Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru

Орлик Антон Геннадьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru

Нестеров Андрей Вадимович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: polyshinnel@gmail.ru

В.В. Савосто, И.Н. Зыбин

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕТРИИ ЕДИНИЧНОЙ ПЛОЩАДКИ МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКЕ ПРОВОЛОКИ С РАЗВОРОТОМ ЭЛЕКТРОДА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электроконтактная наварка проволоки (ЭКНП) является одним из перспективных методов восстановления поверхностей качения. Одним из показателей качества восстановленной ЭКНП детали является прочность соединения основного и присадочного металлов [1], которая в наибольшей степени зависит от правильного выбора параметров режима наварки. Возможные случайные отклонения этих параметров от заданных значений приводят к неравномерной прочности соединения основного и наваренного металлов. В связи с этим повышение стабильности процесса приварки является актуальной задачей при разработке технологии и оборудования ЭКНП.

Одним из направлений повышения стабильности процесса ЭКНП является уменьшение роли тепловой энергии в образовании сварного соединения. Уменьшение роли тепловой энергии в образовании соединения возможно за счет интенсификации скольжения проволоки по поверхности детали и поперечной пластической деформации [1]. Одним из способов интенсификации скольжения проволоки по поверхности детали является разворот электрода на некоторый угол относительно оси детали [1, 2] (рис. 1).

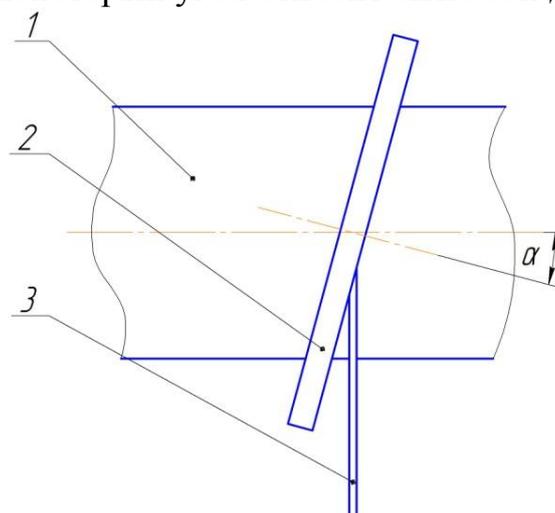


Рис. 1. Разворот оси электрода относительно оси детали: 1- деталь, 2 - роликовый электрод, 3 – навариваемая проволока

Для исследования процесса формирования соединения при реализации данного способа интенсификации скольжения проволоки по поверхности детали необходимо исследовать влияние угла разворота электрода на

геометрию зоны формирования соединения между присадочной проволокой и основным металлом. Геометрия единичной контактной площадки зоны контакта присадочная проволока – основной металл при ЭКНП без разворота электродов как правило описывается эллипсом[3], осями которого являются длина зоны деформации проволоки и ширина единичного валика наваренного металла.

Для исследования геометрии единичных контактных площадок при ЭКНП с разворотом оси электрода относительно оси навариваемой детали проведены предварительные эксперименты по наварке единичных валиков металла на цилиндрические поверхности образцов диаметром 50 мм. Наварка производилась пружинной проволокой 2 класса диаметром 2 мм при углах разворота электрода до 15° и величинах осадки от 40 до 80%.

Проведенные исследования показали, что форма зоны контакта электрод – присадочная проволока при ЭКНП с разворотом электрода несколько отличается от эллипса. В качестве примера на рис. 2 представлена форма единичной площадки наваренного металла при развороте электрода на угол 10° и величине осадки 55%.

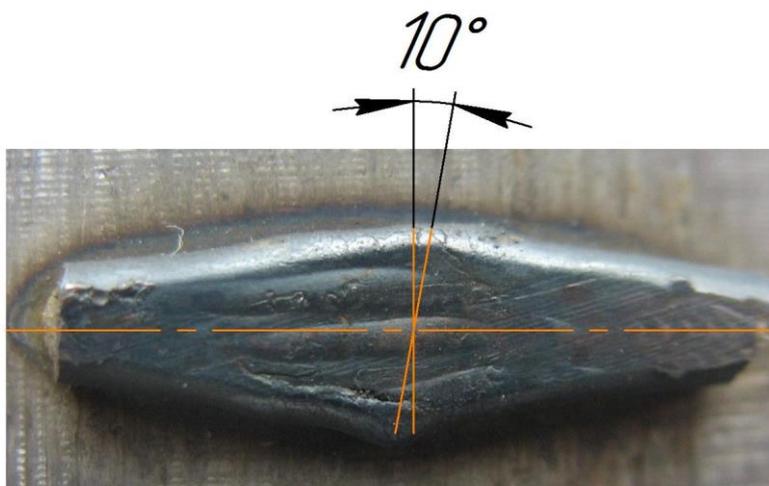


Рис. 2. Форма единичной площадки наваренного металла при развороте электрода

Это позволяет предположить, что форма зоны контакта присадочная проволока – металл основы также будет отличаться от эллиптической. Из этого следует, что для исследования процесса формирования соединения при ЭКНП с разворотом оси электрода относительно оси детали необходимо провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования с целью выявления геометрической формы зоны контакта привариваемой проволоки и основного металла.

Список литературы:

[1] Латыпов Р.А., Булычев В.В., Коротков В.В. Повышение стабильности процесса электроконтактной приварки проволоки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13387> (дата обращения: 10.09.2016).

[2] Булычев В.В. Технологические пути повышения стабильности электроконтактной приварки проволоки // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: материалы ВНТК, Т.1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – с. 275-276.

[3] Нафиков М. З. Способ определения зоны образования соединения металлопокрытия с основой при электроконтактной наплавке. Пат. № 2278009, Российская федерация, опубл. 20.06.2006.

Савосто Владимир Витальевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга. E-mail: vovanpostbag@mail.ru

Зыбин Игорь Николаевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igor1zybin@yandex.ru

П.С. Сорокин, Н.И. Соловьев, П.М. Иванова

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Сварка - один из самых распространенных способов изготовления металлических изделий и конструкций. Впрочем, существенным недостатком сварочных процессов является возникновение остаточных напряжений и деформаций. В данной работе был произведен анализ результатов исследований остаточных напряжений и деформации в результате сварки. Кратко сформулированы главные причины их проявления и способы предупреждения.

Проблема сварочных напряжений и деформаций появилась вместе с началом промышленного использования сварки. Еще в 1892 г. Н. Г. Славянов в своих трудах отмечал опасность «вредных напряжений» [1].

Концентрация напряжений является важнейшим фактором, влияющим на конструкционную прочность изделий. Это в полной мере относится к сварным соединениям, для которых характерна неравномерность распределения рабочих напряжений [2].

Сварочные напряжения относят к собственным, действующим в сварной конструкции без приложения внешних сил. Бурмистров Е.Г. предложил группировать напряжения следующим образом [3]:

- по длительности воздействия: временные и остаточные;
- по направлению воздействия: осевые и поперечные;
- по причине возникновения: температурные, структурные и деформационные;
- по характеру воздействия: активные, уравнивающие, реактивные.

Давиденков Н.Н. ввел классификацию остаточных напряжений по протяженности силового поля и его физической сущности [4]:

- напряжения I класса - макронапряжения, возникающие в пределах области, соразмерной с изделием;
- напряжения II класса - микронапряжения (в границах зерен вещества);
- напряжения III класса - субмикроскопические (в границах межатомных расстояний).

К напряжениям II и III класса подвержены легированные стали.

Главные причины образования остаточных сварочных напряжений сформулированы в работе [5]:

1. Локальный неравномерный нагрев.

Если нагрев и охлаждение происходят неравномерно, то выделяют несколько зон: активную, где происходит быстрое изменение температур, и пассивную, сопротивляющуюся перемещению активной зоны. Процесс взаимодействия двух зон сопровождается ростом напряжений. Когда их значение превышает предел текучести, появляются пластические деформации. Характер деформаций меняется в конструкциях с приложенной внешней нагрузкой, так как поле исходных напряжений подвергается воздействию напряжений от нагрева [6].

2. Неравномерные структурные изменения.

Для легированных и высокоуглеродистых сталей присущи процессы образования и распада аустенита. В сталях, подверженных закалке, аустенит, переохлаждаясь до температуры 200-350 °С, превращается в мартенсит с значительным изменением объема. Появляются структурные напряжения, которые приводят к увеличению общего напряженного состояния, что может привести к образованию трещин в хрупких сплавах.

3. Литейная усадка расплавленного металла.

Процесс охлаждения расплавленного металла шва сопровождается усадкой. Внутри изделия появляются напряжения, являющиеся источником деформаций.

Значение и характер деформаций зачастую зависит от толщины и характеристик металла, режима сварки и конструктивных особенностей шва. Чем толще металл, тем жестче конструкция, что уменьшает величину деформаций. Существенным является коэффициент линейного роста. Чем он выше, тем значительнее возникающие деформации [5].

Одной из частых причин разрушения конструкции является рост трещин в области перехода шва к основному металлу. Поэтому при проектировании изделия к геометрии шва устанавливаются жесткие требования [7]. Необходимо учитывать: первоначальную форму разделки шва; различие физико-механические характеристики свариваемых и сварочных материалов; неоднородность температурного поля, зависящая от скорости сварки; количество слоев шва [8].

Присутствие напряжений и деформаций приводит к отклонениям действительных размеров, что повышает трудоемкость производства сварного изделия, понижает эксплуатационные качества, способствует снижению несущей способности, усложняет сборку некоторых узлов. Остаточные напряжения создают в металле запас энергии, способствующий его разрушению и ускорению коррозионных процессов [9].

Так как коробление изделия происходит вследствие неуравновешенности напряжений, то геометрия деформации будет совпадать с направлением внутренних напряжений [10].

При использовании роботизированной сварки применяют запрограммированные траектории. Однако, из-за некачественно разработанных при-

жимов и неправильно назначенных допусков на сборку под сварку, часто необходима корректировка траектории. В свою очередь, сложность конструкции, толщина металла и габариты изделия, также являются причиной возникновения деформаций, изменяющих фактическую траекторию шва. Это может привести к отклонению остальных линий траектории от фактических еще перед началом сварки [11].

Изношенные стержневые конструкции по типу ферм часто требуют усиления. Добавление усилений при помощи сварки значительно влияет на состояние ферм: появляются тепловые ослабления сечений, сварочные напряжения и деформации [12].

В целях снижения напряжений и деформаций применяются конструктивные и технологические методы [5].

Конструктивные основаны на рациональном проектировании сварных изделий:

1. Назначение минимального сечения шва для снижения объемов металла, где происходят пластические деформации.
2. Снижение мест скопления и перекрещивания швов.
3. Размещение швов равноудаленно от оси тяжести изделия с целью компенсации изгибающих моментов.
4. Использование преимущественно стыковых швов, характеризующихся более низкими напряжениями.
5. Применение дополнительных конструктивных элементов в виде ребер жесткости с целью повышения устойчивости элементов.
6. Добавление припусков на усадку.

Технологические методы основаны на рациональном выборе теплового режима, способа сборки и технологии сварки:

1. Применение оптимального теплового режима. Для сталей, подверженных закалке, следует использовать повышенный тепловой с целью повышения объема разогретого металла и снижения скорости охлаждения. В процессе сварке встык жестко зафиксированных узлов, наоборот, необходимо использовать сниженные тепловые режимы.
2. Повышение плотности тока для равномерного нагрева металла.
3. Использование прихваток, не создающих жесткое закрепление.
4. Обеспечение подвижности зафиксированных узлов. Необходимо обеспечить свободное перемещение, вызванное поперечной усадкой, и не допускать угловой деформации. Применение приспособлений позволяет достигнуть точности положения кромок, снижает длительность процесса сборки и сварки, облегчает работу сварщика [11].
5. Предварительное взаимное расположение деталей с учетом их будущей деформации (создание предварительных прогибов и напряжений) [13].

Так, создание двухосных равноосных начальных напряжений $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ уменьшает перемещения к центру пластины от нагрева по

сравнению с нагревом ненапряженной пластины. При $\sigma \approx 0,75\sigma_T$ остаточные перемещения уменьшаются до 0, далее они изменяют знак [6].

6. Последовательное наложение швов уравнивает величину внутренних напряжений. Деформирование от наложения предыдущего шва должно компенсироваться деформацией от следующего шва.

7. Обеспечение свободы перемещения свариваемых элементов.

8. Использование проковки с целью уменьшения деформации. Проковка повышает плотность шва, уменьшая действие усадки [5].

9. Использование сварочных материалов с повышенными характеристиками пластичности. Так, для обеспечения высокой трещиностойкости ротора, первый слой корневого шва выполняют с использованием проволоки с повышенной пластичностью (Св-08Г2С) [14].

10. Термообработка сварного шва. Термообработку проводят как правило по режиму высокого отпуска с целью уменьшения объема диффузионного водорода и снижения значения напряжений [15].

11. Формирование плавных переходов в опасных сечениях шва. Возможны различные технологические приемы, направленные на увеличения радиуса сопряжения шва с основным металлом: механическая обработка, оплавление границ шва теплом дуги и др. [2].

12. Обработка импульсами электрического тока, основанная на иницировании в материале электродинамических сил, возникающих при прохождении в материале разряда тока [16].

При создании ответственных сварочных конструкций необходимо рационально назначать рассмотренные мероприятия снижающие остаточные напряжения, в том числе и для компенсации деформаций.

Список литературы

[1] Слепцова Е.А. Математическое моделирование развития напряженно-деформированного состояния тонких пластин при их стыковой сварке: Дис. канд. физ.- мат. наук: 05.13.18 / Слепцова Екатерина Анатольевна; ЯГУ им. М. К. Аммосова. – 2009. – 112 с.

[2] Цумарев Ю. А. Влияние асимметрии односторонних стыковых швов на распределение напряжений в сварном соединении [Текст] // Сварка и диагностика. -2010. - №5. - С. 24 - 26.

[3] Бурмистров Е.Г., Зяблов О.К. Сварочные и газотермические процессы: лабораторный практикум. – Н. Новгород, Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2009. – 126 с.

[4] Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности: Учебник для вузов. – Металлургия, 1987. – 352 с.

[5] Сальманов И.Д., Барановской М.Ю., Тарасов В.А. Остаточные напряжения и деформации при сварке [Текст] // Строительство уникальных зданий и сооружений. -2014. - ISSN 2304-6295. 12 (27). – С. 65-74.

[6] Тихонов С.В. Применение локального нагрева для определения механических напряжений [Текст] // Сварка и диагностика. – 2012. - №6. - С. 26 - 29.

[7] Лукьянов В.Ф., Соболев Б.В., Пархоменко А.А. Экспериментальное, численное и аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния в сварных соединениях типа штуцер-лист [Текст] // Сварка и диагностика. – 2011. - №5. - С. 12 - 16.

[8] Кректулева Р.А., Черепанов О.И., Черепанов Р.О. Численное решение двумерной квазистатической задачи термопластичности: расчет остаточных термических напряжений при многопроходной сварке разнородных сталей [Текст] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. - № 2. - С. 345–356.

[9] Тюрева А.А. Остаточные напряжения и микротвердость при восстановлении сваркой чугунных деталей [Текст] // - С. 219 – 223.

[10] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Дебеляк А.А. Определение возможности расчета остаточных деформаций по тепловым полям при сварке тонких пластин встык [Текст] // Ученые записки. – 2010. - № IV-1 (4). – С. 68 – 80.

[11] Дорохов В.С. Влияние точности сборки изделия и его коробления на процесс роботизированной сварки [Текст] // Сварщик в России. – 2014. - № 6 (52). – С. 19 – 21.

[12] Родионов И.К., Родионов И.И. Сварочные деформации, метод «фиктивных температур» и усиление сжатых стержней стальных ферм покрытия [Текст] // Вектор науки ТГУ. – 2015. - №2 (32-2). – С. 166-170.

[13] Моторин А.Н., Цыган Б.Г., Дорошенко В.А. Комплексно – автоматизированная линия по изготовлению хребтовых балок грузовых вагонов [Текст] // Сварщик в России. – 2013. -№ 6 (46). – С. 20 – 29.

[14] Воличенко Н.П. Производство сварно-кованых роторов на ОАО «Турбоатом» [Текст] // Мир сварки. – 2011. - № 1 (16). - С. 20 - 23.

[15] Современные методы термообработки сварных соединений магистральных газопроводов [Текст] // Мир сварки. – 2011. - № 2 (17). – С. 22 – 26.

[16] Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Черкашин А.В., Ткачук Г.И. Ремонтная сварка промежуточных корпусов авиадвигателей из жаропрочного магниевых сплава МЛ10 с применением электродинамической обработки //Автоматическая сварка. – 2012. – №. 11. – С. 31-36.

Сорокин Павел Сергеевич - заведующий лабораториями КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru

Соловьев Николай Игоревич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nick.solov@yandex.ru

Иванова Полина Михайловна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivapol5@yandex.ru

Ю.М. Осипова, Т.Г. Чернова

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОРШНЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Во время работы деталей, под действием трения, возникает разрушение поверхностей, изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности. Этот процесс, называемый износом, приводит к снижению функциональных качеств изделий и к потере их потребительской ценности. Поэтому необходимо упрочнять поверхности детали с целью повышения их износостойкости, уменьшения износа сопряженных пар.

Для борьбы с повышенным износом деталей применяются различные износостойкие материалы и покрытия. Износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Износостойкость зависит от состава и структуры обрабатываемого материала, исходной твердости, шероховатости и технологии обработки, состояния ответной детали. При этом износостойкость детали без покрытия может быть намного ниже, чем у детали с износостойким покрытием.

Существуют различные методы повышения износостойкости: напыление, наплавка, запрессовка, обработка давлением и другие.

Рассматривается деталь — цилиндрический поршень. Характер изнашивания зависит от типа поршня, его конструктивных особенностей. Возможные дефекты поршня — уменьшение наружного диаметра, увеличение ширины канавок под поршневые кольца, увеличение диаметра отверстия под поршневой палец.

В данной работе рассматривается поршень, изготовленный из Стали 3. Общая длина поршня (длина изнашиваемой части) 115 мм, диаметр наружный 224 мм, толщина стенки 12 мм, износ 4 мм на сторону.

Для восстановления поверхности поршня целесообразно применять способы с возможностью изменения геометрии изношенной детали. С точки зрения прочности сцепления покрытия с основой и получения плотного беспористого слоя на поверхности детали перспективными вариантами представляются наплавка и запрессовка.

Целью работы является изучение двух различных технологий, наплавки и запрессовки, применяемых для повышения износостойкости поршня с дальнейшим выбором наиболее оптимального и финансового выгодного варианта.

Рассмотрим первый вариант – наплавка. Существуют различные виды наплавки: электроконтактная, вибродуговая, под слоем флюса, порошковыми проволоками, в среде защитных газов, и т.д. Указанные технологии наплавки имеют свои достоинства и недостатки.

В рассматриваемой работе будет использоваться плазменная наплавка, так как она имеет ряд преимуществ:

1. Высокая концентрация тепловой мощности и минимальная ширина зоны термического влияния;
2. Возможность получения толщины наплавляемого слоя от 0,1 мм до нескольких миллиметров;
3. Возможность наплавления различных износостойких материалов (медь, латунь, пластмасса) на стальную деталь;
4. Возможность выполнения плазменной закалки поверхности детали;
5. Относительно высокий КПД дуги (0.2 ... 0.45);
6. Малое (по сравнению с другими видами наплавки) перемешивание наплавляемого материала с основой, что позволяет достичь необходимых характеристик покрытий.

Наплавка металла на деталь позволяет не только восстановить первоначальные свойства изделия, но и придать ему совершенно новые качества. В большинстве случаев, при восстановлении деталей, более рационально наплавлять на изношенные поверхности твердые порошковые сплавы, обладающие высокой износостойкостью.

Наплавка будет производиться бронзовым порошком, так как бронза обладает значительно большей, твердостью, достаточной прочностью и более легкоплавка. Для наплавки необходимо произвести следующие операции: токарная обработка, обезжиривание, наплавка, токарная обработка, контрольная операция.

В качестве второй технологии рассматривается запрессовка кольца из бронзы. Запрессовка — соединение составных частей механизма прессовым давлением, гарантирующим надежную работу узла деталей.

В данной технологии полностью изготавливается кольцо из бронзы с использованием следующих операций: токарная обработка, контроль, запрессовка, обкатка, контроль.

Для того, чтобы выбрать наиболее подходящий способ, необходимо произвести сравнение двух технологий. Для этого рассмотрим операции, которые используются в двух технологиях:

- цена за материал (у наплавки цена меньше) (см. таб.1);
- трудоемкость (у наплавки трудоемкость выше) (см. таб.1);
- токарная обработка (у наплавки время токарной обработки больше) (см. таб.2);
- общее время изготовления (у наплавки общее время изготовления меньше) (см. таб.2).

Таблица №1. Финансовые затраты

Наименование	Порошковая наплавка, руб	Запрессовка кольца, руб
Токарная обработка	77,4	69,23
Запрессовка	-	250
Обкатка	-	470
Наплавка	158	-
Цена материала (за 1кг)	840	980
Трудоемкость	800	310
Цена материала за все изделие	1990,44	15090
Итоговая стоимость	3028,84	16192,23

Таблица №2. Технические параметры

Наименование	Порошковая наплавка	Запрессовка кольца
Время токарной обработки	7,5 мин	6,7 мин
Время изготовления	2 часа	3,5 часа
Скорость наплавки	130 мм/мин	-
Высота наплавки	4 мм	-
Расход порошка	37г/мин	-
Расход газа	2-3 л-мин	-
Слесарная обработка	18 мин	-

Результат расчетов показал, что технология наплавки будет экономически выгоднее, в отличие от запрессовки. Использование данной технологии упрочнения поверхности поршня позволит повысить сопротивляемость, а также обеспечить их надежность и ремонтпригодность.

Список используемой литературы

[1] *Гусенков А.П.* Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин. Москва, Наука — 2012. — 190 с.

[2] *Логинов П.К., Ретюнский О.Ю.* Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей. Москва, Наука — 2010. — 214 с.

[3] *Николаенко М.Р., Кузнецов М.Д.* Наплавка деталей машин. Москва, ООО «ГК ИТЛ» — 2010. — 260 с.

[4] *Сидоров А.И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. Москва, Машиностроение — 2013. — 317 с.

Осипова Юлия Михайловна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: belikovajuly@mail.com

Чернова Татьяна Георгиевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chernova-tg@yandex.ru

В.К. Шаталов, Л.В. Лысенко, Ю.Г. Головочева

ПОЛУЧЕНИЕ НАПЛАВОК ПРИСАДОЧНЫМИ ПРУТКАМИ, ОБРАБОТАННЫМИ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение

Расширяющееся применение титановых сплавов для изготовления запорной арматуры, обуславливает разработку новых технологий улучшения антифрикционных свойств, способов упрочнения путем нанесения наплавкой специальных покрытий. На практике часто сталкиваются с интенсивным разрушением титановых сплавов в результате фреттинг-коррозии, схватывания с образования задиров. Низкие антифрикционные свойства титановых сплавов трудно устранить подбором контактирующего материала, смазочного материала, оптимизацией конструкции [1].

Механические свойства титана и его сплавов в значительной степени зависят от содержания в них кислорода, азота и углерода, которые еще не так давно считали вредными примесями [2,3]. Однако, результаты работ [4,5,6] показывают, что в небольших концентрациях примеси могут оказывать и положительное влияние на механические свойства титановых сплавов. Особенно это касается кислорода, управляя содержанием которого в титановых сплавах, можно в определенной степени управлять прочностью и пластичностью сплава. Кислород повышает временное сопротивление разрыву и твердость титана. В области малых концентраций (до 0,2 %_{вес}) каждая сотая доля процента кислорода увеличивает временное сопротивление разрыву примерно на 12,5 МПа.

Контактные поверхности пар трения запорной арматуры, из титановых сплавов наплавляются ручным аргонодуговым способом неплавящимся электродом с применением присадочных материалов на основе титана. Легирование титана кислородом осуществляется непосредственно при наплавке на деталь прутков. Поскольку в качестве конструкционного материала применяют наплавленный сплав, важным вопросом является разработка технологии, обеспечивающей контролируемое содержание кислорода в наплавочных прутках.

Перспективными методами повышения антифрикционных свойств и износостойкости деталей из титановых сплавов при контактных нагрузках являются методы химико-термической обработки, направленные на физико-химическое модифицирование поверхностного слоя, и анодирование. Распространенным способом насыщения титановых сплавов кислородом является нанесение устойчивых оксидных покрытий на поверхность наплавочной проволоки ПТ-7Мсв с термически окисленной поверхностью.

Термическое оксидирование проволоки осуществляется при нагреве в воздушной среде в пределах 950°С и выдержке в течение 3÷4 часов. При этом поверхность проволоки покрывается окалиной. Образовавшаяся окалина подлежит удалению для предотвращения попадания в расплавленный металл. Несмотря на кажущуюся простоту, метод термического оксидирования имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего, метод энергозатратен, длителен и трудоемок, включает более 10 технологических операций. Очищенную от окалины проволоку подвергают вакуумному отжигу для удаления водорода.

Материал и методика исследования

Таким образом, получение наплавов с заданным содержанием кислорода, требует разработки принципиально новых технологий, подходов, направленных на получение необходимых характеристик сплава [7]. Такая технология может быть создана на базе процессов электрохимического формирования оксидных покрытий на поверхности титановых сплавов микродуговым оксидированием (МДО). В качестве кислородсодержащего материала предложено использовать тонкий поверхностный оксидный слой наплавочных прутков. Сформированный МДО на поверхности наплавочных прутков оксидный слой, наряду с хорошо управляемыми энергетическими и временными характеристиками процесса, позволяет обеспечить химическую и структурную однородность сплава вследствие равномерного плавления наплавочного прутка с покрытием и одновременной кристаллизацией шва в контролируемой атмосфере аргона.

Большой комплекс работ в направлении получения наплавов, легированных кислородом, выполнен в КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сотрудниками кафедры «Технологии обработки материалов» проведена работа по применению наплавочных прутков с оксидированной МДО-способом поверхностью. Установлено, что данный метод позволяет вводить необходимые концентрации кислорода в сплав (от 0,1 до 0,4%вес) и обеспечивать химическую однородность наплавленного слоя сплава.

В настоящей работе рассматриваются присадочные материалы из титановой сварочной проволоки композиций Ti–Al–V, подвергнутых вместо термического оксидирования на воздухе микродуговому оксидированию в электролите специального состава [8].

Перед наплавкой прутки были подвергнуты МДО в потенциостатическом режиме при напряжении 280 В. Электролит Na₃PO₄, концентрация 14 г/л, рН 10,8. Наплавки высотой 10 – 12 мм на пластину из сплава ПТ-3В толщиной 10 мм выполняли ручным аргонодуговым способом с неплавящимся вольфрамовым электродом присадочными прутками диаметром 4 и длиной 400 мм. Каждый слой наплавлялся при силе тока 190 – 200А, с расходом аргона через горелку ГСН-1 и приставку – 18 л/мин. Прутки изготавливали из проволоки марки ВТ6св в состоянии поставки по ГОСТ 27265-87.

Толщина оксидного покрытия на титановых сплавах, в основном, определяется плотностью тока и временем протекания процесса, составляла около 10 мкм.

Результаты и обсуждение

Режимы микродугового оксидирования прутков и результаты химического анализа кислорода, замеров твердости металла опытных наплавов приведены в сводной таблице 1. Наблюдается зависимость твердости наплавов из сплава ВТ6св от толщины полученного оксидного слоя на прутках (рис.1)

Таблица 1. Результаты экспериментов

Образец №	Режим МДО			Толщина-слоя, мкм.	Твердость, HV ₁₀	Кислород в наплавке O ₂
	Электролит	Напряжение, В	Время, мин.			
1	исходный				279	0,12
2	Na ₃ PO ₄	280	15	8	369	0,42
3	NaAlO ₂ Na ₃ PO ₄	280	15 + 15	10	372	0,43
4	Na ₃ PO ₄	280	15	7	351	0,25
5	Na ₃ PO ₄	300	30	10	412	0,46
6	NaAlO ₂ 10 г/л + Na ₃ PO ₄ 14 г/л	280	15+15	10	421	0,74

В процессе выполнения экспериментов получены покрытия, достаточно прочно удерживающиеся на сварочных проволоках и обеспечивающие получение наплавленного металла с твердостью до 446 HV.

Первые же наши эксперименты подтвердили перспективность метода [9]. В результате выполнения работ установлено, что в наплавке отсутствуют видимые дефекты в виде несплошностей и пор. Наплавленный металл аргонодуговым способом неплавящимся электродом с присадочной проволокой, обработанной МДО по структуре, качеству и твердости соответствовал предъявляемым техническим требованиям.

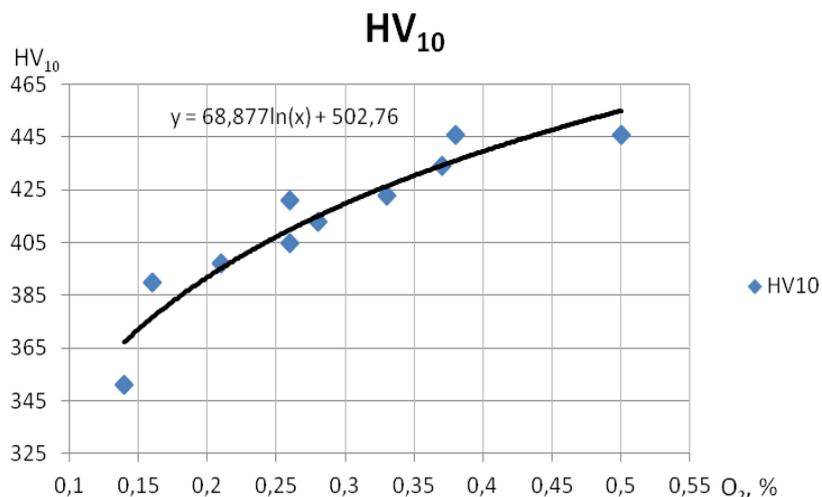


Рис. 1. Зависимость твердости наплавки от содержания кислорода

При этом выявлено важное преимущество перед применяющимся много лет способом термического оксидирования сварочной проволоки ПТ-7Мсв – получение наплавкой оксидированной проволокой металла не сопровождается образованием трещин даже при наплавке без подогрева заготовки и последующего отжига.

Установлено, что твердость наплавки исследуемых образцов повышается с увеличением содержания в них кислорода. Применение наплавочных прутков с МДО-пленкой изменяет структуру и фазовый состав наплавки. На рисунке 2 представлена микроструктура наплавки на образце № 2, 369 HV₁₀.

Представленная на рисунке 2 структура позволяет во всех наплавках классифицировать ее как α-фазу. Формирование этой структуры сопровождается резким увеличением твердости. При низкой массовой доле содержания кислорода в титане, формируется микроструктура, близкая к типичной для наплавки из сплава ВТ6св.

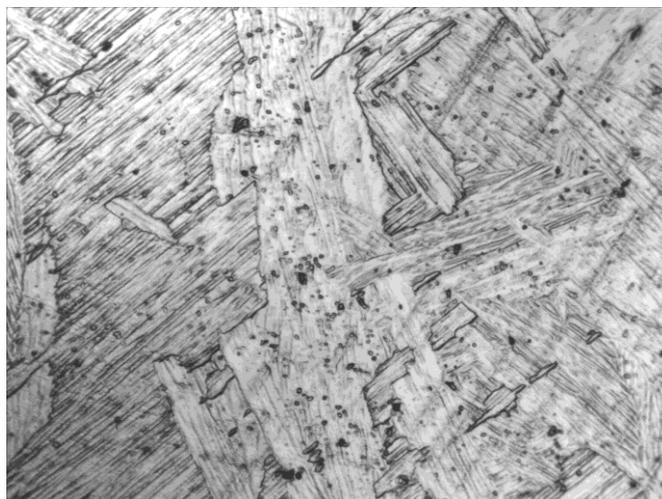


Рис. 2. Микроструктура наплавки ВТ6св, 369 HV₁₀ x240

В работах [8,10,11] отмечается положительное влияние микродугового оксидирования при получении присадочных прутков на износостойкость наплавов, а также более высокая производительность их получения и низкая себестоимость процесса микродугового оксидирования по сравнению с термическим оксидированием.

Выводы:

1. Подтверждено, что кислород можно использовать как экономнолегирующий элемент, позволяющий увеличивать твердость наплавленного сплава.

2. Показано, что полученный микродуговым оксидированием на поверхности наплавочных прутков оксидный слой, дает возможность, при наплавке такими прутками путем долегиrowания, вводить необходимое количество кислорода в сплав и, в результате, обеспечивать повышение твердости.

3. Увеличение толщины оксидного слоя на поверхности наплавочных прутков микродуговым оксидированием способствует получению более твердых наплавов.

Литература:

[1] Горынин И.В., Ушков С.С., Хатунцев А.Н., Лошакова Н.И. Титановые сплавы для морской техники // ПОЛИТЕХНИКА издательство, Санкт-Петербург 2007. 274 с.

[2] Корнилов И.И. Титан. Источники, составы, свойства, металлохимия и применение / М.: Наука, 1975. – 307 с.

[3] Шаталов В.К., Лысенко Л.В. Формирование оксидных покрытий на крупногабаритных изделиях из титановых сплавов. Судостроение. 2005. № 1. С. 58-60.

[4] Boyer R., Weisch G., Collings E. Materials properties handbook: titanium alloys // Metals Park. – Ohio: ASM Int, 1994. – 1176 p.

[5] Давыдов С.И., Шевченко В.Г., Овчинников А.В. и др.// Теория и практика металлургии. 2010. № 5-6. С. 6–10

[6] Леоха Ф.Л., Ратиев С.Н.. Современные способы получения сплавов титана легированных кислородом. Сборник научных трудов ДонНТУ – 2012. Серия: металлургия.

[7] Ушков С.С., Шаталов В.К., Фатиев И.С., Михайлов В.И., Козлов И.В., Щербинин В.Ф., Грошев А.Л. Способ оксидирования титанового сплава для антифрикционной наплавки. Патент №2367728, 06. 03. 2008 г.

[8] Козлов И.В., Михайлов В.И., Семенов В.А., Хромушкин К.Д., Фатиев И.С. Исследование качества оксидированного титанового сплава ПТ-7М, наплавленного с применением высокотемпературной прокатки. Санкт-Петербург. Научно-технический журнал Вопросы материаловедения. 2007 – № 3 (51) С.214–217.

[9] Фатиев И.С., Шаталов В.К., Михайлов В.И., Васин С.А., Грошев А.Л. Свойства антифрикционных наплавов на титановые сплавы окисированными присадочными прутками. Научное издание, № 7, 2013, с. 35-42

[10] Шаталов В.К., И.С. Фатиев И.С., Михайлов В.И., Грошев А.Л. Антифрикционные наплавки на титановые сплавы. Электронное научно-техническое издание Наука и образование. <http://technomag.bmstu.ru/issue/351140.html> DOI: 10.7463/0512.0383721 05, 2012. 4с.

[11] Шаталов В.К., Лысенко Л.В. Теория диффузионно-кинетической модели при микродуговым окисировании. Коррозия: материалы, защита. 2006. № 10. С. 40-43.

Шаталов Валерий Константинович – д-р физ.-мат. наук, зав. каф. "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkshatalov@yandex.ru

Лысенко Леонид Васильевич - д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: baldprice@mail.ru

Головачева Юлия Геннадиевна - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ulia230670@rambler.ru

А.Г. Орлик, Г.В. Орлик, А.Ю. Сапожников

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современном машиностроении наблюдается стремительный рост автоматизации процессов. Прежде всего это связано с переходом многих отраслей на многосерийное и массовое производство. Изготовление теплообменных аппаратов не исключение. Производство данной номенклатуры, как и любой другой, началось с применения ручной аргодуговой сварки, и постепенно переросло в полуавтоматическую.

Сейчас встает вопрос полной автоматизации данного процесса, в частности таких трудоемких операций, как вальцовка, подрезка и обварка трубок в трубных досках. Для решения этой задачи предлагается применить роботизированный комплекс с использованием сварки лазерным лучом вместо традиционного способа сварки вольфрамовым электродом в среде защитных газов. Применение данного комплекса устраняет проблемы, связанные с качественным формированием сварного соединения, его линейных размеров, и воспроизводимости результатов в процессе сварки. [4]

В состав роботизированного комплекса входят два блока: вальцовочно-подрезной и сварочный.

Первый блок предназначен для развальцовки трубок, используя аналоговый инструмент для вальцовки. После вальцовки кромки трубок необходимо подрезать, и здесь по аналогии с вальцовкой эту операцию выполняет робот специальным инструментом. Инструменты меняются автоматически. Программа вальцовки и подрезки задается также, как и для сварки. Все операции выполняются одним сервоприводом. [1]

В состав сварочного блока входят: лазерная головка, манипулятор, система слежения, сварочная оптика. Лазерная головка ориентируется по центру отверстия трубки, и исходя из заданных параметров свариваемого изделия (диаметра отверстия и толщины трубки) находит место начала сварки. На рисунке 1 представлена схема лазерной установки, позволяющая эффективно определять местоположение свариваемого изделия при помощи сканера. Возможна ручная регулировка контура хода луча путем поворота клиновидных линз.



Рис. 1. Схема установки для лазерной сварки

Перемещение лазерного луча может осуществляться в зависимости от следующих вариантов позиционирования лазерной головки (возможно два варианта): трех осевой позиционер на базе станков с ЧПУ, Руки-манипулятора; В данном случае наиболее предпочтительного является применение руки-манипулятора. Контроль траектории движения лазера сравнивается с эталонным значением, полученным при сканировании и, если возникает отклонение, то данная система корректирует траекторию движения головки. На рисунке 2 представлены образцы сварного шва, сваренные аргодуговой сваркой неплавящимся электродом и сваркой лазерным лучем.

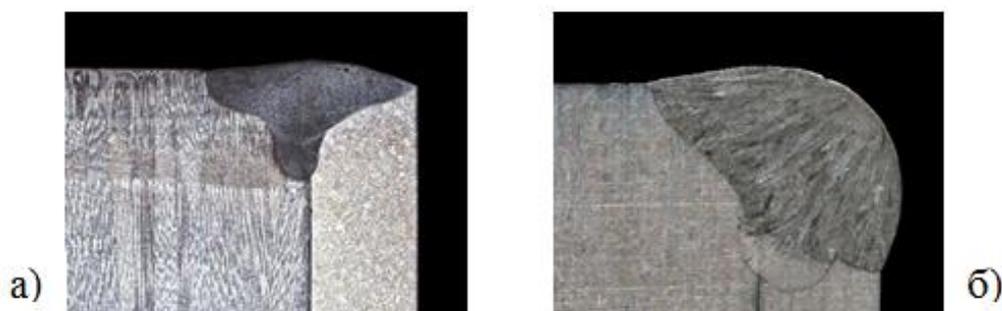


Рис. 2. Формирование сварного шва. а) – при лазерной сварке, б) – при аргодуговой сварке

Полученные данные показывают, что изменяется структура металла шва, глубина проплавления и ряд других параметров. Кромка не оплавляется, что хорошо сказывается на эксплуатационных свойствах теплообменного аппарата. Кинжальное проплавление при лазерной сварке глубже, что повышает надежность соединения. [2]

Для проверки воспроизводимости результатов сварочного процесса производилась сварка образцов на следующих параметрах режима лазерной сварки: мощность лазера $W=1,5$ кВт, размер пятна $d=300$ мкм, скорость сварки $V_{св}=2$ м/мин, $t=6,5$ сек на заварку одной трубки, выходная мощность $W_1=0,7$ кВт, $Q_{ар}=7-8$ л/мин.[3]

Из каждого образца вырезались темплеты и изготавливались макрошлифы, которые сравнивались с эталонным шлифом, рисунок 3.



Рис. 3. Макрошлифы полученных соединений. а) – эталонный образец, б) – образец из выборки

Из анализа полученных данных следует, что результаты по геометрии шва являются стабильными и повторяющимися многократно в соответствии с заданным результатом.

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод, что лазерная сварка имеет ряд преимуществ перед аргонодуговой при вварке труб с трубные доски трубчатых теплообменных аппаратов. По сравнению с аргонодуговой сваркой лазер заваривает одну трубку в 10 раз быстрее. Снижается вспомогательное время, уменьшения влияния человеческого фактора и исключения такой операции, как перезаточка электрода. С металлографической точки зрения важным преимуществом является уменьшение зоны термического влияния до 300 мкм, что снижает остаточные напряжения и деформации, получение мелкозернистой структуры, отсутствие оплавления кромки и получения оптимальной формы шва. Автоматизация процесса и все вышеперечисленные преимущества делают лазерную сварку экономически более эффективной при серийном и мелкосерийном производстве.

Список литературы

[1] Васильев Б. А., Каманин Ю. Л. Совершенствование оборудования реакторных установок на быстрых нейтронах // Атомная энергия. 2010 г. Т. 108. № 4. С. 242-243.

[2] Москвитин Г.В., Поляков А. Н. Применение методов лазерной сварки в современном промышленном производстве // Сварочное производство. 2012. №6 С 38-46.

[3] Лопота В.А., Туричин Г.А. Новые технологии термообработки, сварки и наплавки материалов с использованием волоконных лазеров большой мощности // Заготовительные производства в машиностроении 2012 г. № 10. С. 7-9.

[4] Технология сварки плавлением. Часть 1: учебное пособие / Е.А.Трущенко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 145с

Орлик Антон Геннадьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru

Орлик Геннадий Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru

Сапожников Андрей Юрьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sapozhnikov.andrei2016@yandex.ru

Д.И. Егоров, К.Ю. Труханов

РЕМОНТ СВАРКОЙ (НАПЛАВКОЙ) ДЕФЕКТОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для продления срока эксплуатации магистрального газопровода применяется ремонт сваркой (наплавкой). Чаще всего ремонт осуществляется путем полной замены дефектного участка трубы на новый. Однако в условиях Крайнего Севера, сложных погодных условий и ограниченности возможности транспортировки длительное время года, возникает необходимость во временном ремонте, путем заварки выбранного механическим способом дефектного участка.

Дефектный участок и его состояние выявляются с помощью внутритрубной или наружной дефектоскопии, визуального, измерительного контроля. Вид ремонта выбирается в зависимости от выявленных дефектов основного металла труб и сварных соединений газопроводов (поверхностные и внутренние дефекты), параметров (длина, ширина, глубина), их количества (отдельно расположенные единичные дефекты, групповые дефекты) и типоразмеров, а также технических характеристик газопроводов (диаметр, толщина стенки, класс прочности трубной стали), условий их прокладки (подземная, наземная, надземная) и эксплуатации (категории).

Лупинг. Ремонт не протяженных участков методом измены с временным выводом ремонтируемых участков из эксплуатации или прокладкой лупингов. Лупинг представляет собой нить газопровода, первоначально монтируемую для разгрузки основной магистрали, увеличивая не только пропускную способность, но и снижая давление во всей системе.

Ремонт сварными муфтами. Ремонт стальными сварными муфтами осуществляется под давлением с транспортировкой или без транспортировки газа или с временным выводом ремонтируемых участков из эксплуатации (рисунок 1а). Данный вид ремонта рекомендуется выполнять в случаях невозможности или нецелесообразности применения других видов ремонта, в том числе по причинам невозможности временного вывода газопровода из эксплуатации.

Ремонт вваркой заплат или приваркой патрубков. Заплата для варки изготавливается овальной формой из труб с толщиной стенок, равной толщине стенок ремонтируемого газопровода, из стали той же марки или с таким же физико-механическими характеристиками (рисунок 1б). Патрубок применяется для соединения ответвлений газопроводов, в частности соединениям ответвлений к стенкам газопровода без прекращения подачи по нему газа и может найти применение при присоединении вновь построенных газопроводов к действующим.

Ремонт заменой участка. После вырезки дефектного участка газопровода на его место вваривается катушка из стали той же марки и такой же толщиной стенки (рисунок 1в). При отсутствии переходных колец промежуточной толщины, труб, катушек с толщинами стенок ремонтируемого газопровода допускается выполнять сварку труб, катушек с большей или меньшей толщиной стенки.

Ремонт сваркой (наплавкой). Несквозные поверхностные отдельно расположенные единичные или групповые дефекты коррозионного (местная коррозия), механического происхождения (риски, задиры, царапины) допускается ремонтировать методом сварки (наплавки) (рисунок 1г).

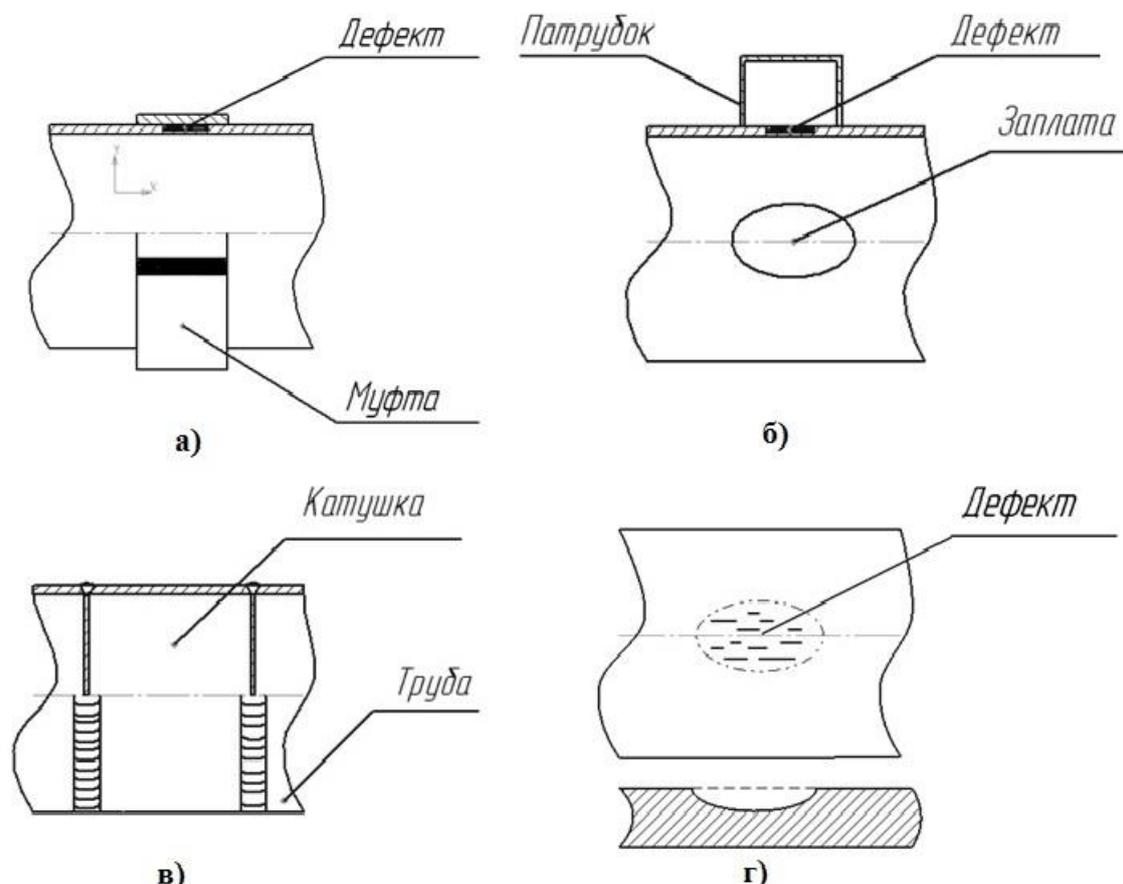


Рис. 1. Схемы ремонта магистрального газопровода

Согласно нормативной документации, сварочные работы при ремонте газопровода сопровождаются применением подогрева. Для предварительного, сопутствующего (межслойного) подогрева применяются установки индукционного нагрева, установки нагрева с применением электронагревателей сопротивления или комбинированного действия, а также газопламенные нагревательные устройства (кольцевые газовые подогреватели, однопламенные горелки и др.).

Как правило, ремонтные работы выполняются ручной дуговой сваркой. Достоинством данного способа относят: простота оборудования, возможность сварки во всех пространственных положениях, возможность сварки в труднодоступных местах. К недостаткам относится: большие материальные и временные затраты на подготовку сварщика, качество сварного соединения и его свойства во многом определяются субъективным фактором, низкая производительность, вредные и тяжелые условия труда.

Применение механизированной сварки позволяет повысить производительность работ. Применяется сварка садозащитными порошковыми проволоками и сварка проволоками сплошного сечения в среде защитных газов. Автоматизация процессов сварки (наплавки) позволяет повысить качество ремонта, улучшить условия работы персонала.

Список литературы

[1] *СТО 2-2.3-137-2007* Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Часть II.

[2] *СТО Газпром 2-2.3-116-2007* Инструкция по технологии производства работ на газопроводах врезкой под давлением.

[3] *Царьков А.В., Труханов К.Ю., Подхалюзин П.С., Севастьянов С.П.* Технология автоматизированной заварки дефектных участков магистральных газопроводов // *Сварка и Диагностика*. — 2015. — №4. — С. 62-64.

Егоров Дмитрий Иванович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: dima4150@yandex.ru

Труханов Константин Юрьевич - ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru

С.С. Керимов, К.Ю. Труханов, И.В. Филиппов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СВАРКИ (НАПЛАВКИ)

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Установка представляет собой механизм с четырьмя степенями свободы. Газовая горелка закреплена на каретке, которая способна осуществлять поступательные движения вдоль осей x и y . Горелка – рабочий орган, она способна осуществлять поворот относительно осей x и y . Регулировка угла наклона осуществляется механически. Условная схема конструкции сварочной консоли представлена на рис. 1.

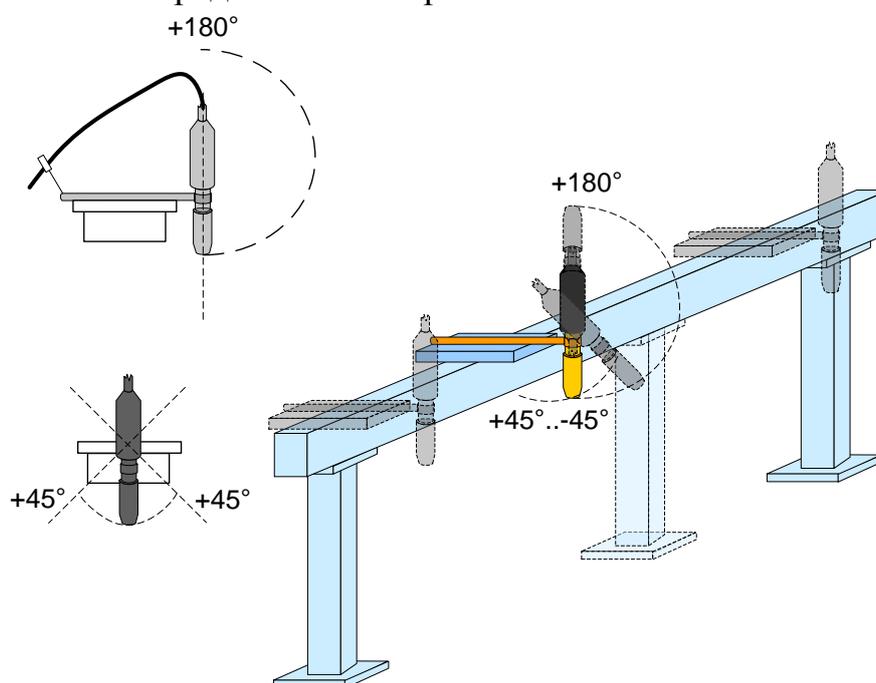


Рис. 1. Условная схема конструкции сварочной консоли

Типы приводов. В промышленных станках и манипулятора, как правило, используются сервоприводы на основе вентильных двигателей и приводы на основе шаговых двигателей. В случае использования шагового двигателя схема управления отсчитывает необходимое количество импульсов (шагов) от положения датчика. При этом точное позиционирование обеспечивается параметрическими системами с отрицательной обратной связью, которые образуются взаимодействующими между собой соответствующими полюсами статора и ротора шагового двигателя. Сигнал задания для соответствующей параметрической системы формирует система управления шаговым двигателем, активизирующая соответствующий полюс статора. Однако электрический сервопривод гарантирует максимальную точность, автоматически компенсируя механические (люфты в приво-

де) или электронные сбои привода. Он обладает большей возможной скоростью перемещения элемента (у шагового двигателя наименьшая максимальная скорость по сравнению с другими типами электродвигателей). Но у сервопривода сложнее блок управления и логика его работы (требуется обработка результатов датчика и выбор управляющего воздействия, а в основе контроллера шагового двигателя — просто счетчик). Существует также проблема фиксирования: обычно решается постоянным притормаживанием перемещаемого элемента либо вала электродвигателя (что ведет к потерям энергии) либо применение червячных/винтовых передач (усложнение конструкции) (в шаговом двигателе каждый шаг фиксируется самим двигателем). Сервоприводы, как правило, дороже шаговых. В рамках данной работы было принято использовать шаговые приводы, так как это сильно упрощает систему управления сварочной консолью. Чтобы избежать пропуски шагов, необходимо использовать приводы с запасом по мощности. Вычислить положение каретки можно по количеству пройденных шагов.

Моделирование работы шагового привода. Пакет Simulink позволяет смоделировать различные процессы и устройства. В нашем случае принято решение смоделировать работу шагового привода. На рис. 2 показана модель шагового двигателя в пакете Simulink

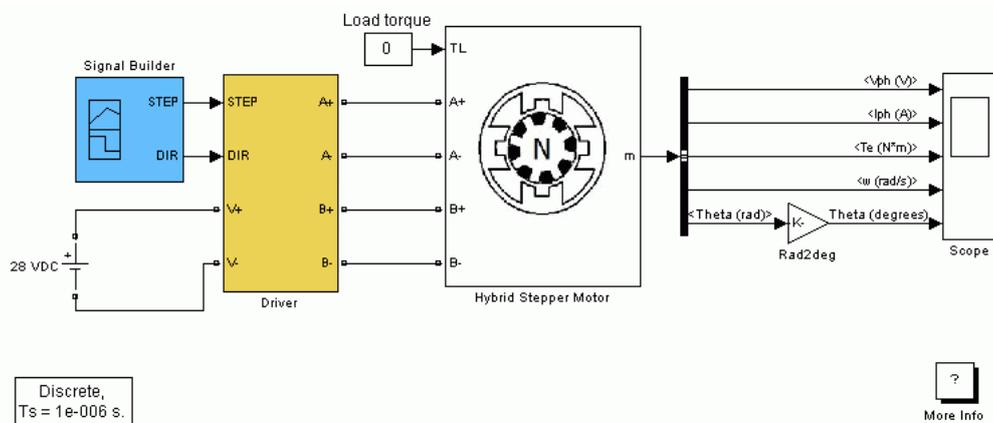


Рис. 2. Модель шагового двигателя

Управляющее воздействие – STEP/DIR сигналы, которые в свою очередь оказывают воздействие на сам драйвер ШД. Фазы двигателя управляются двумя H-мостами на MOSFET транзисторах, подключенных к источнику напряжения постоянного тока. Следующие сигналы получены в результате моделирования в течение 0,25 сек шагового привода двигателя. При этом ШД вращается течение 0,1 сек в положительном направлении, останавливается на 0,05 сек, и вращается в обратном направлении за 0,05 сек. Сигналы, полученные на выходе, показаны на рис. 3.

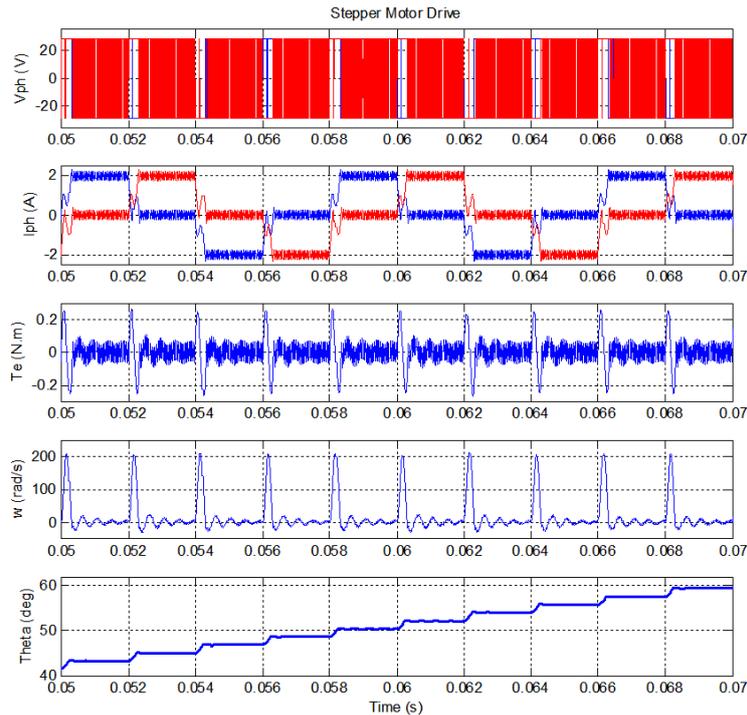


Рис. 3. Результат моделирования

Как видно из графиков, угловое перемещение шагового двигателя имеет дискретный характер на низких оборотах. Это обусловлено конструкцией привода. Данное явление вызывает вибрации и дискретное перемещение каретки, что может негативно отразиться на процессе сварки. Чтобы этого избежать необходимо либо увеличить частоту вращения двигателя, либо использовать редуктор, либо использовать такие драйвера шагового двигателя, которые способны обеспечить работу привода в режиме микрошага.

В дальнейшем планируется произвести моделирование в пакете Simulink механической части совместно с приводами, оценить способность привода перемещать каретку с заданной точностью и скоростью. По результатам моделирования собрать стенд.

Список литературы

- [1] *А.С.Касаткин*. Электротехника: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 440 с., ил.
- [2] *Герман-Галкин С.Г.* Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург, КОРОНА-Век, 2008, 368 с.

Керимов Святослав Сергеевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга. E-mail: ic-kaluga@mail.ru

Труханов Константин Юрьевич - ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru

Филиппов Иван Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fiv61@yandex.ru

Д.Е. Бохан, Н.Н. Максимов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В судостроительной, авиационной, химической и других отраслях промышленности все более широкое применение находят конструкции из титановых сплавов. При соединении таких изделий наиболее широкое применение получил способ электронно-лучевой сварки.

Однако при малой программе выпуска и больших габаритных размерах изделий применение электронно-лучевой сварки в вакуумных камерах не всегда целесообразно. Это связано со значительными затратами материальных средств на создание самих камер и увеличение времени на откачку атмосферных газов для создания вакуума или контролируемой атмосферы инертных газов. Так, например, на Калужском Турбинном заводе сваривают пластины гибкой муфты и корпуса турбин для некоторых изделий судостроительной промышленности аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом в защитной среде аргона. Для защиты жидкой сварочной ванны и металла, нагретого выше 400-450°C необходимо обеспечивать защиту от взаимодействия с атмосферой. Защиту обеспечивают с помощью дополнительной насадки на сопло горелки и поддува с обратной стороны шва. Применяют ручную дуговую и автоматическую сварку неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки. Такой способ сварки достаточно трудоемкий с невысокой производительностью и отличается большим количеством вводимой тепловой энергии. Данное обстоятельство способствует появлению остаточных напряжений в шве и околошовной зоне, зачастую приводит к короблению деталей.

Внедрение более производительного способа полуавтоматической и автоматической сварки плавящимся электродом, широко применяющегося при сварке низкоуглеродистых сталей, сдерживается нерешенностью проблемы стабильности переноса жидкого электродного материала в сварочную ванну без разбрызгивания и недостаточной устойчивостью горения дуги.

В КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана проводили исследования по разработке и внедрению технологии сварки плавящимся электродом. Установлено, что процесс переноса жидкого металла плавящегося электрода в сварочную ванну осуществляется по схеме крупнокапельного. Частые короткие замыкания дугового зазора жидкой каплей расплавленного электродного металла приводят к резкому возрастанию тока и разогреву жидкой фазы до температуры кипения, выбросу паров металла за пределы дугового зазора

разрушением жидкой перемычки и выбросу не только самой капли, но и жидкого металла сварочной ванны.

Переход на мелкокапельный или струйный перенос за счет увеличения плотности тока, не дает положительных результатов. Это обусловлено высоким удельным сопротивлением титановых сплавов и значительным изменением его величины в процессе нагрева и плавления. Любые колебания параметров режима горения дуги практически мгновенно дестабилизируют процесс нагрева электродного металла и жидкой сварочной ванны, что приводит к разбрызгиванию.

Для стабилизации параметров процесса сваривали образцы из сплавов ВТЗ-1 и ВТ8 толщиной 20мм с Y образной разделкой кромок. В качестве электродной применяли проволоку $\varnothing 3$ мм идентичную по химическому составу основному металлу. Для поддержания постоянного вылета электрода и длины дуги применяли опорные ролики, закрепленные на сварочной горелке.

Подбор оптимального значения сварочного тока в пределах $I_{св}=150-170$ А и скорости подачи проволоки $v_{под}=3-3,5$ м/мин. Однако достичь положительных результатов с отсутствием разбрызгивания при высоком качестве швов и производительности процесса удалось лишь с применением источника питания с крутопадающей характеристикой, имеющей практически вертикальную составляющую в рабочей точке и предназначенного для плазменной сварки.

Список литературы

[1] Рыжков И.Б. Основы научных исследований и изобретательства [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.Б. Рыжков. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2013. – 224 с. – Режим доступа:

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2775.

[2] Смирнов И.В. Сварка специальных сталей и сплавов [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.В. Смирнов, – СПб.: Изд-во "Лань", 2012. – 272 с. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/2771>.

[3] Чернышев Г.Г. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением [Электронный ресурс]: учебное пособие / Г.Г. Чернышев, Д.М. Шашина, – СПб.: Изд-во "Лань", 2013. – 464 с. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/12938/>

Бохан Дмитрий Евгеньевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: bohan2020@yandex.ru

Максимов Николай Николаевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru

С.С. Пармонов, Н.Н. Максимов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Жаровая труба является ответственным элементом газотурбинного двигателя. Она представляет собой конструктивный узел, в котором происходит процесс горения топлива. Работает в тяжелых условиях высокотемпературной среды химически активных газов. Испытывает воздействие высокого пульсирующего давления, а материал конструкции подвергается эрозии в результате взаимодействия с газовым потоком.

Для обеспечения достаточного ресурса жаровых труб в двигателе они не находятся под силовой нагрузкой, т. к. не включены в силовую схему двигателя. Изготавливаются из материалов с высокими характеристиками жаростойкости и жаропрочности, стойкими к газовой коррозии и вибрациям.

Обычно это специализированные хромоникелевые сплавы. Данный тип сплавов с трудом подвергается горячему деформированию и резанию, имеет низкую теплопроводность и значительное тепловое расширение [1].

В рассматриваемом примере жаровая труба изготовлена из сплава ХН78Т, который позволяет изделию работать при температурах, превышающих 1000°C.

Сами жаровые трубы собираются при помощи сварки из отдельных секций точечной контактной сваркой. Данный способ обеспечивает высокую производительность, стабильное качество сварных соединений, малую себестоимость за счет низкого расхода вспомогательных материалов и высокую экологичность процесса, легко механизуется и автоматизируется. Машины контактной сварки или их рабочие узлы могут сравнительно легко встраиваться в поточные сборочно-сварочные линии.

Сварка жаровой трубы осложняется конструкцией изделия. На рис. 1 показана зона сварки трех элементов: Стенки наружной, Экрана наружного и Головки, толщины которых составляют 0,6мм, 1мм и 1мм соответственно.

Никелевые сплавы обладают сравнительно низкой электропроводностью (значительно ниже, чем у малоуглеродистых сталей). Поэтому их точечная сварка осуществляется при умеренной силе тока.

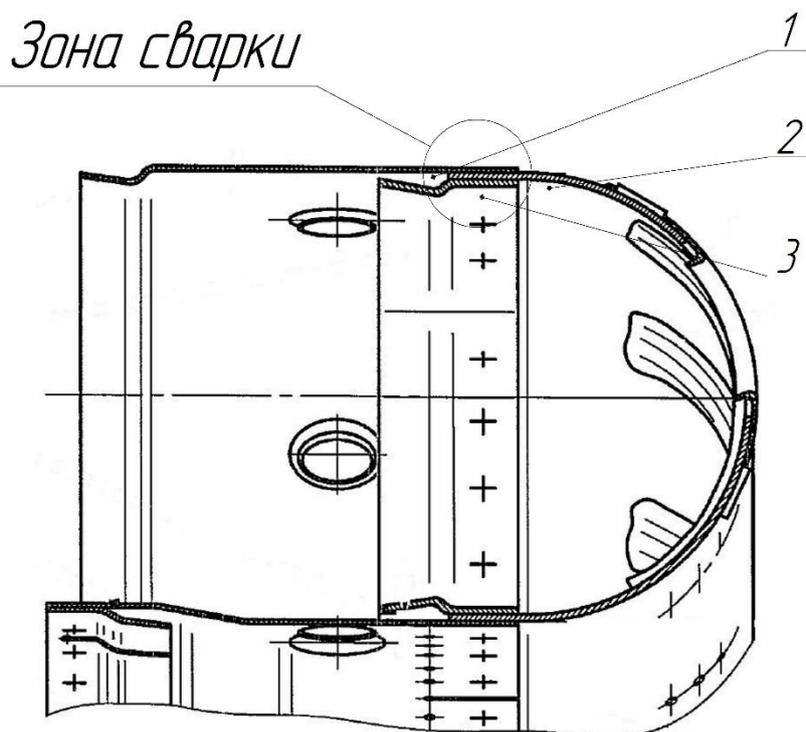


Рис. 1. Жаровая труба. 1 – Стенка наружная; 2 – Головка; 3 – Экран наружный

Сплав ХН78Т является весьма прочным в широком диапазоне температур, что обуславливает применение высоких удельных давлений на электроды при сварке. Сварку необходимо выполнять с усиленным охлаждением свариваемого металла. С этой целью электроды и изделие погружают в воду или омывают струей воды.

В связи с применением высоких удельных давлений на электроды необходимо изготавливать их из сплавов высокой твердости. Диаметр рабочей поверхности электродов для сварки элементов жаровой трубы газотурбинного двигателя должен составлять 5 – 7 мм [2].

Однако установлено, что в процессе длительных испытаний газотурбинного двигателя может наблюдаться разрушение сварных точек по периметру литого ядра. Причиной этому служат высокая концентрация напряжений в пояске уплотненного металла вокруг литого ядра (рис. 2). Дополнительным фактором, провоцирующим процесс разрушения сварного соединения, является многолистовая конструкция изделия.

При точечной сварке происходит местный нагрев весьма ограниченного объема металла, который при этом стремится расшириться. Вследствие тепловых и физических особенностей жаропрочных материалов и малой длительности сварочного процесса образуется высокий температурный градиент у границ ядра и зоны пояска уплотненного металла. При последующем охлаждении возникают остаточные напряжения. Остывание ядра точки сопровождается усадкой металла, часто вызывающей образование усадочных раковин и трещин.

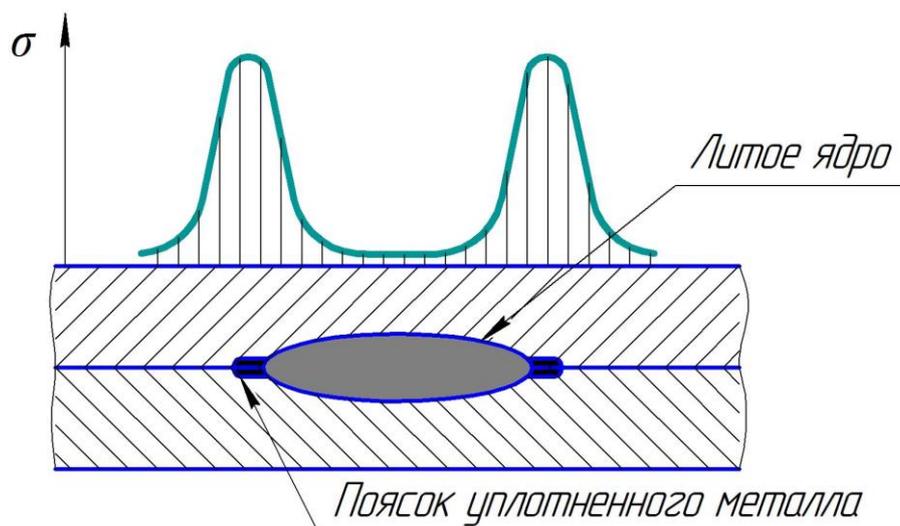


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений после остывания сварной точки

Усадочные деформации и коробление можно значительно снизить искусственным охлаждением зоны сварки, а также путем уменьшения размера отдельной точки. Для уменьшения усадки можно применять большее количество точек с меньшим диаметром (для равнопрочности соединения), чем меньшее количество точек, но большего диаметра [3].

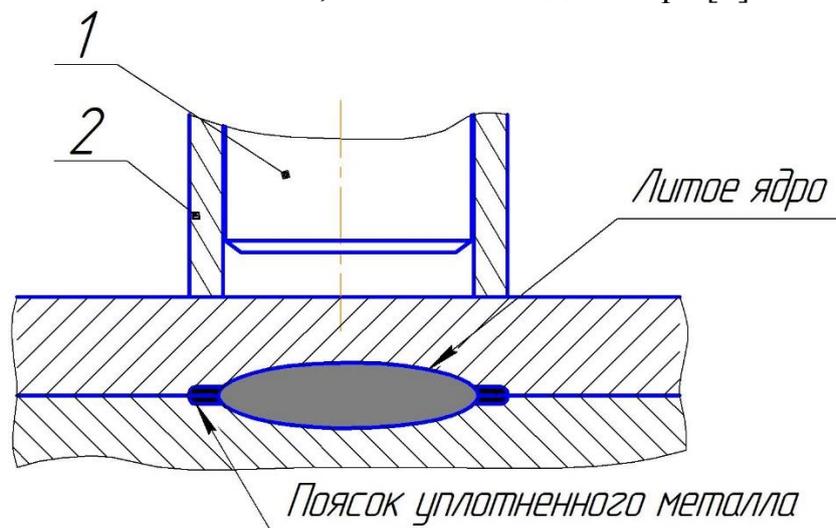


Рис. 3. Устройство для снижения остаточных деформация после точечной сварки 1 – электрод контактной машины; 2 – прижим

Снижение остаточных деформаций также возможно с использованием дополнительных устройств, оказывающих давление на зону вокруг литого ядра. Если по мере охлаждения зоны сварки за счет увеличения внешнего давления вызвать дополнительную пластическую деформацию металла и тем самым обеспечить компенсацию усадочных процессов, можно снизить и даже преобразовать усадочные напряжения. На рис. 3 изображена схема устройства, позволяющего обеспечить пластическую деформацию зоны по-

яска уплотняющего металла вокруг литого ядра. Так как образование остаточных напряжений за счет усадки продолжается до полного охлаждения, необходимо сохранять ковочное усилие максимально долго, либо применять вибрационное нагружение. Снижению деформационных и усадочных процессов способствует уменьшение тепловложения посредством применения униполярного импульса выпрямленного сварочного тока с плавным нарастанием переднего фронта для исключения вероятности выплесков.

Жаровая труба газотурбинного двигателя является ответственной конструкцией, требующей стабильного высокого качества сварных соединений, входящих в нее элементов. Предлагаемые технологические решения для повышения качества сварных соединений позволят изготавливать конструкции, отвечающие требованиям надежности и обладающими необходимым ресурсом.

Список литературы

[1] Арзамасов Б. Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др.; Материаловедение: Учебник для вузов /– 8-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.

[2] Багрянский К.В., Кузьмин Г.С. Сварка никеля и его сплавов. — М.: МАШГИЗ, 1963. — 164 с.

[3] Кислюк Ф. И. Электрическая контактная сварка. — М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1950. — 396 с.

Парамонов Сергей Сергеевич - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: paramonov231992@gmail.com

Максимов Николай Николаевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

И.В. Максимов, В.В. Андреев, А.А. Столяров

ЗАЩИТА МИКРОСХЕМ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО КМОП-ТЕХНОЛОГИИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В связи с развитием современной микроэлектроники, усиливается чувствительность электронного оборудования и его компонентов к воздействию внешних дестабилизирующих факторов. Одним из основных факторов, является воздействие разряда статического электричества. Наиболее уязвимыми компонентами электронной аппаратуры являются интегральные микросхемы, среди которых наибольшей чувствительностью, к такого рода воздействию обладают микросхемы, выполненные по КМОП-технологии. Повреждение микросхем статическим зарядом приводит к большим затратам на ремонт оборудования и замену микросхемы, а в ряде случаев и к выходу из строя радиоэлектронных устройств, что может быть причиной катастрофических последствий. Большинство современных интегральных микросхем изготавливаются по КМОП-технологии и, вследствие этого, они подвержены воздействию статического электричества.

Для повышения стойкости микросхем к воздействию статического разряда применяются цепи защиты, которые располагают в непосредственной близости к контактным окнам выводов микросхемы. Элементы защиты обычно изготавливаются вместе с другими элементами микросхемы. В наше время наибольшей популярностью пользуются два типа защиты: диодно-резистивная и с использованием МОП-транзисторов.

Целью данной работы является анализ видов защиты от воздействия статического электричества КМОП-микросхем. Для проведения исследований использовались микросхемы аналогового однополюсного двухпозиционного ключа.

Уязвимым местом этой микросхемы, с точки зрения воздействия статическим напряжением, является цифровой блок управления. При воздействии на него статического электричества происходит пробой подзатворного диэлектрика входных транзисторов цифрового блока управления. Вследствие этого пробоя весь цифровой блок выходит из строя, и микросхема перестает функционировать. Для уменьшения влияния этого воздействия на аналоговый однополюсный двухпозиционный ключ была установлена защита от воздействия статического электричества.

При воздействии, на выводы микросхемы, большой величины статического заряда срабатывают защитные транзисторы, одновременно с этим может начаться протекание процесса пробоя подзатворного диэлектрика рабочих транзисторов цифрового блока управления. При малом времени стекания заряда в цепи защиты, этот процесс не успевает произойти, даже если он уже начался. Поэтому необходимо обеспечить максимальную скорость стекания статического заряда через защитные транзисторы, при этом их зарядная емкость должна быть как можно меньше.

Чтобы исключить возможность срабатывания защиты от статического электричества, при напряжениях меньше напряжения питания цифрового блока управления, в качестве защитных транзисторов, при конструировании защиты, взяты рабочие транзисторы цифровой части микросхемы.

Сравним цепь защиты от статического электричества, построенную с использованием диодно-резистивных компонентов (рис. 1, а) и с использованием нормально закрытых МОП-транзисторах (рис. 1, б).

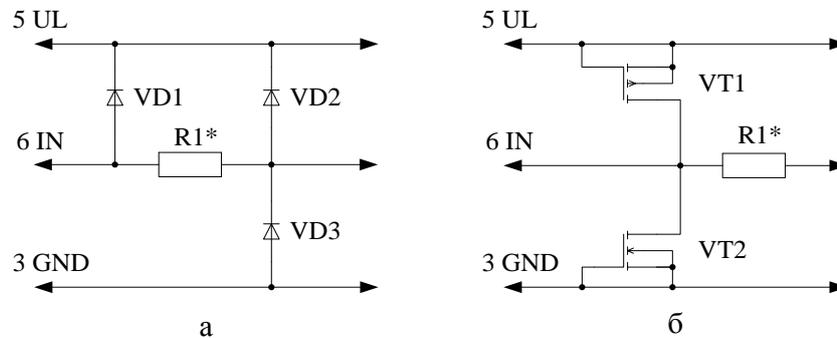


Рис. 1. Схемы защиты на: а) диодно-резистивных элементах, б) нормально закрытых полевых транзисторах

Пробивное напряжение сток-исток полевых транзисторов составляет порядка 18 В, а распределенного диода 30-35 В. Малое значение пробивного напряжения транзистора позволяет быстрее реагировать на воздействие статического разряда. Следовательно, эффективность схемы защиты на нормально закрытых МОП-транзисторах выше, чем у схемы-аналога.

Для ограничения тока при воздействии статического заряда в цепи защиты используется резистор R1. Сопротивление управляющего входа влияет на быстродействие ключа, поэтому рекомендуется применять резисторы номиналом от 100 до 500 Ом. Так как диффузионные резисторы занимают много места, сложны в изготовлении и оказывают влияние на подложку микросхемы, в качестве сопротивления в схеме защиты обычно используют пленочный поликремневый резистор.

Оценка влияния сопротивления управляющего входа на скорость переключения ключа полученная в результате компьютерного моделирования представлена на графике (рис.2).

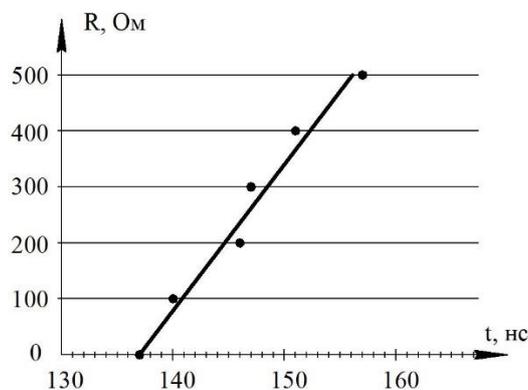


Рис. 2. Зависимость времени переключения от сопротивления управляющего входа

Из рис. 2 видно, что с увеличением сопротивления возрастает время переключения. Следовательно, необходимо выбирать номинал резистора защитной цепи, удовлетворяющий производственным требованиям на скорость переключения.

Оценка защиты микросхем от статического электричества была проведена, на предприятии АО «Восход-КРЛЗ» (г. Калуга). Для проведения исследований была сделана выборка из 10 партий микросхем, с защитой, изготовленной на полевых транзисторах и 10 партий микросхем с диодно-резистивной защитой. Объем выборки, по 4 микросхемы из партии. Эксперимент проводился с применением стенда испытаний на воздействие статического электричества «Молния», путем подачи на соответствующие выводы микросхемы статического разряда. Стенд имеет следующие технические характеристики: емкость разрядного конденсатора 100 пФ, сопротивление разрядного резистора 1,5 кОм. В качестве начальной величины статического напряжения было установлено 1000 В, испытания проводились с шагом дискретизации 100 В. Результаты эксперимента представлены в таблицах 1-2.

Результаты испытания защиты на полевых транзисторах.

П – пробой микросхемы.

«-» – отсутствие пробоя.

Таблица 1. Результаты испытания защиты на полевых транзисторах

№ Партии	Величина статического потенциала U, В											
	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	П
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	П
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Пробой образцов в партиях №1 и №4 произошел при напряжении 2100 В, дальнейшие испытания не проводились. Микросхемы соответствуют 2 классу стойкости по ОСТ 11 073.013-2008.

Результаты испытания диодной защиты.

П – пробой микросхемы.

«-» – отсутствие пробоя.

Таблица 2. Результаты испытания диодной защиты

№ Партии	Величина статического потенциала U, В											
	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
1	-	-	-	-	-							
2	-	-	-	-	П							
3	-	-	-	-	П							
4	-	-	-	-	-							
5	-	-	-	-	П							
6	-	-	-	-	П							
7	-	-	-	-	П							
8	-	-	-	-	-							
9	-	-	-	-	-							
10	-	-	-	-	-							

Пробой образцов в партиях №2, №3, №5, №6, №7 произошел при напряжении 1400 В, дальнейшие испытания не проводились. Микросхемы соответствуют 1 классу 1 В подклассу стойкости по ОСТ 11 073.013-2008.

В результате проведения эксперимента выявлено, что использование защиты от статического электричества на нормально закрытых МОП-транзисторах повышает класс защиты микросхемы. Использование данной защиты рекомендовано для кристаллов микросхем аналогового однополюсного двухпозиционного ключа, выпускаемых на АО «Восход-КРЛЗ» (г. Калуга).

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117), а также при финансовой поддержке администрации Калужской области (грант № 16-42-400791).

Список литературы

[1] ОСТ 11 073.013-2008 «Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Методы электрических испытаний».

[2] Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник — М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2004. — Г.2, п.2.2 — 42 с.

[3] Горлов М.И., Андреев А.В., Воронцов И.В. Воздействие электростатических зарядов на изделия полупроводниковой электроники и радиоэлектронную аппаратуру — Воронеж: Научная книга. — 2014. — Г.1, п.1.2.3 — 32 с.

[4] *Горлов М.И., Строганов А.А.* Воздействие электростатических разрядов на интегральные схемы // Компоненты и технологии. — 2008. — №3 — С. 188–192.

[5] *Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д.* Защита электронных средств от воздействия статического электричества. — М.: Издательский Дом "Технологии", 2005. — Г.2, п.2.2 — 79 с.

[6] *Пискун Г.А., Алексеев В.Ф., Ланин В.Л., Левин В.Г.* Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов // Доклады БГУИР. — 2014. — №4 — С. 16–21.

Максимов Игорь Владимирович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igormaksimow@yandex.ru

Андреев Владимир Викторович - д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Столяров Александр Алексеевич - д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru

А.А. Блатов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗЛОМА СПЛАВА AL - 1,65 % CU

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Алюминий широко распространен в природе, отличается от других металлов малой плотностью, высокими пластическими и коррозионностойкими свойствами, высокими тепло- и электропроводностью, а также отражательной способностью. Благодаря своим замечательным свойствам и широкой доступности алюминий находит применение во многих отраслях промышленности. Алюминий используется как в чистом виде, так и в виде сплавов. Легирующие элементы для алюминиевых сплавов подбирают исходя из их функционального назначения. Одним из основных упрочняющих элементов в этих сплавах является медь, которая образуя интерметаллид Al_2Cu (θ -фаза), резко повышает прочность и твердость сплавов. Согласно литературным данным плавление алюминия с медью приводит к значительному улучшению сопротивления электромиграционному разрушению, что связано с процессами образования сегрегаций в сплавах этой системы [1 - 3]. Сегрегация на границах зерен вызывает постоянный и возрастающий интерес, поскольку существенно влияет на термодинамические, кинетические, механические свойства поликристаллических материалов, изменяя энергию границ зерен и оказывая сильное влияние на зернограничную диффузию и контролируемые ею процессы [4]. Многие свойства поликристаллических материалов определяются наличием растворенных веществ в границах зерен, доля которых в границе в результате сегрегации может на несколько порядков превышать их концентрацию в зерне, вызывая различные формы охрупчивания. Система Al - Cu представляет интерес, как пример системы, в которой возможно комплексобразование, так как эти элементы склонны к образованию интерметаллидов, существование которых и определяет ограниченную растворимость элементов друг в друге. В работах [5, 6] было показано, что в сплавах Al - 0,5 % Cu и Al - 2 % Cu часть границ зерен имела состав близкий состав к Al_2Cu , при этом авторами было отмечено, что в некоторых границах зерен адсорбция была равна нулю.

Экспериментальная часть. В данной работе использовали сплавы Al - Cu (1,65 % Cu). Чистые металлы сплавляли в керамических тиглях при температуре 850 °C в течение 2 часов, после чего жидкий расплав выливали на металлическую пластину, покрытую пудрой Al_2O_3 . Для гомогенизации проводили отжиг в течение 66 часов при температуре 550°C.

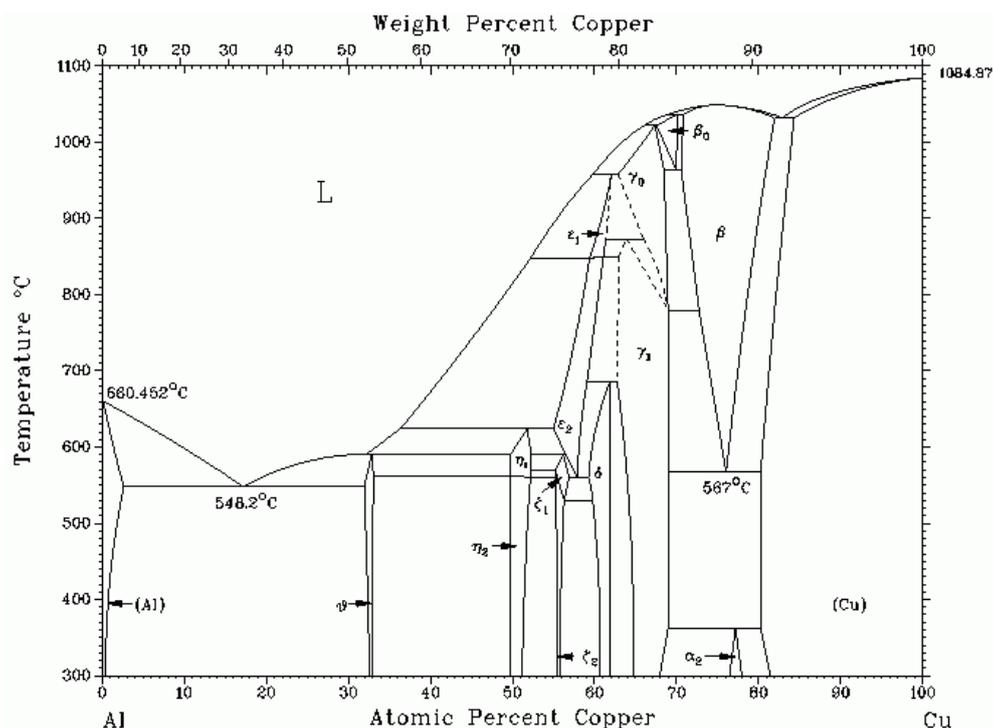
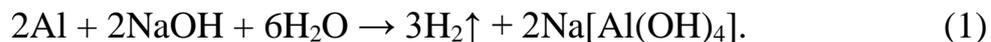


Рис. 1. Диаграмма фазового равновесия системы Al – Cu

После приготовления образцы выдерживались в галлий - содержащих водных растворах. Для исследования взаимодействия галлий - содержащих растворов со сплавами алюминия в первой серии образцов использовали 10 % водный раствор NaOH с галлием. На поверхности образцов образовывались пузырьки газа, что соответствует выделению водорода согласно реакции:



В ходе предварительных экспериментов было показано, что при взаимодействии сплава алюминия и меди с галлий-содержащим водным раствором не происходит разрушение сплавов, как в аналогичных экспериментах с чистым алюминием.

Исследование поверхности излома. Изучение поверхности хрупкого излома образца Al - 1,65 % Cu были проведены исследования с использованием электронной Оже-спектроскопии. Для анализа были подготовлены образцы, предварительно выдержанные в 10 % - растворе NaOH с содержанием галлия в количестве 1 мг на 10 мл раствора. Образцы разрушали непосредственно перед помещением образца в камеру установки для сохранения чистоты поверхности излома. Характерная микрофотография излома представлена на рисунке 2.

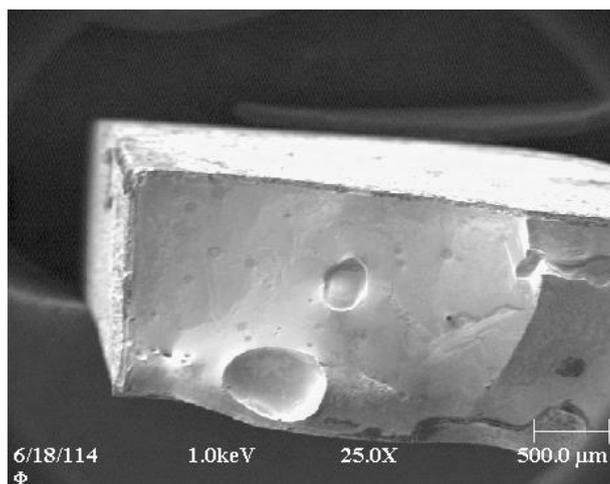


Рис. 2. Микрофотография хрупкого излома образца сплава Al – 1,65 % Cu

Исследования проводили по следующей схеме. Выбирали удобную для анализа и травления область, ее фотографировали в режиме вторичных электронов, после чего снимали исходный электронный Оже-спектр (ЭОС). Далее проводили травление в течение заданного времени с помощью ионной пушки. По окончании травления снимали спектр с итоговой поверхности и образец снова фотографировали. Такая процедура позволяла определить изменение концентрации элементов по глубине, а кроме того, увидеть возможный сдвиг области анализа. Сравнение фотографий до и после травления позволяет сделать вывод, что во всех случаях сдвиг практически отсутствовал. Во всех первичных спектрах присутствуют кислород и углерод, что связано с загрязненностью поверхности находившейся в контакте с воздухом. На рисунках 3, 4 и 5, 6 представлены результаты исследований в области хрупкого излома.

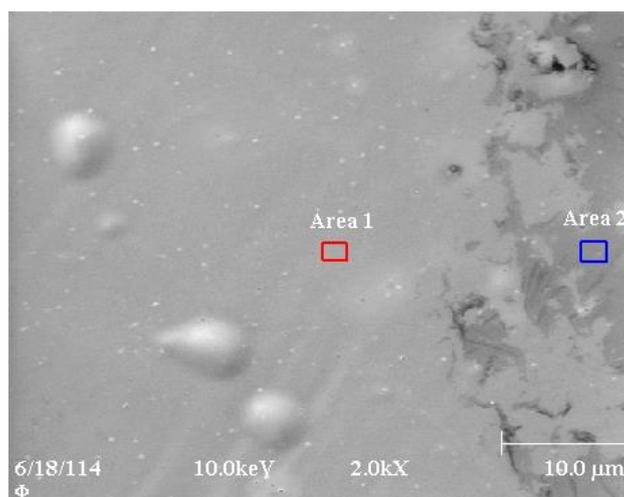


Рис. 3. Изображение поверхности излома до травления, полученное с помощью СЭМ

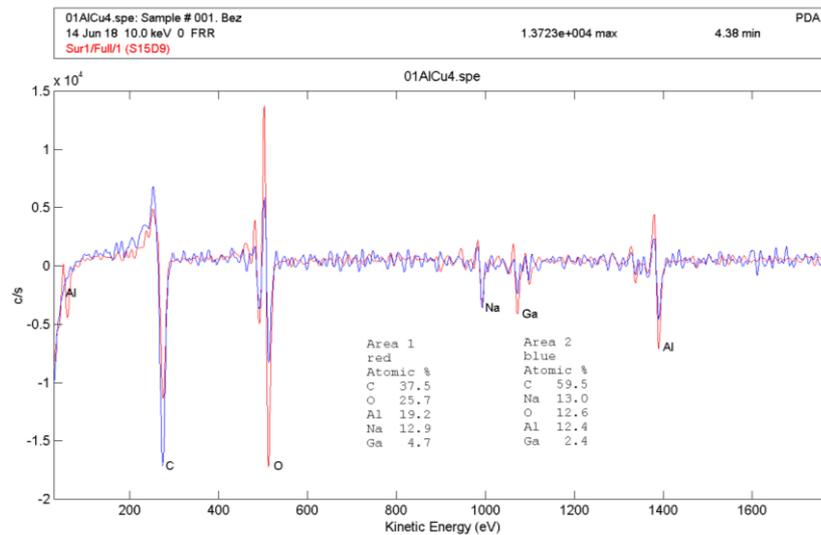


Рис. 4. Оже – спектры поверхности излома до травления

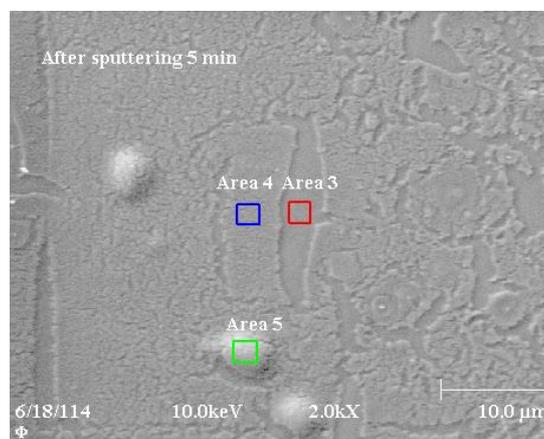


Рис. 5. Изображение поверхности излома после травления, полученное с помощью СЭМ

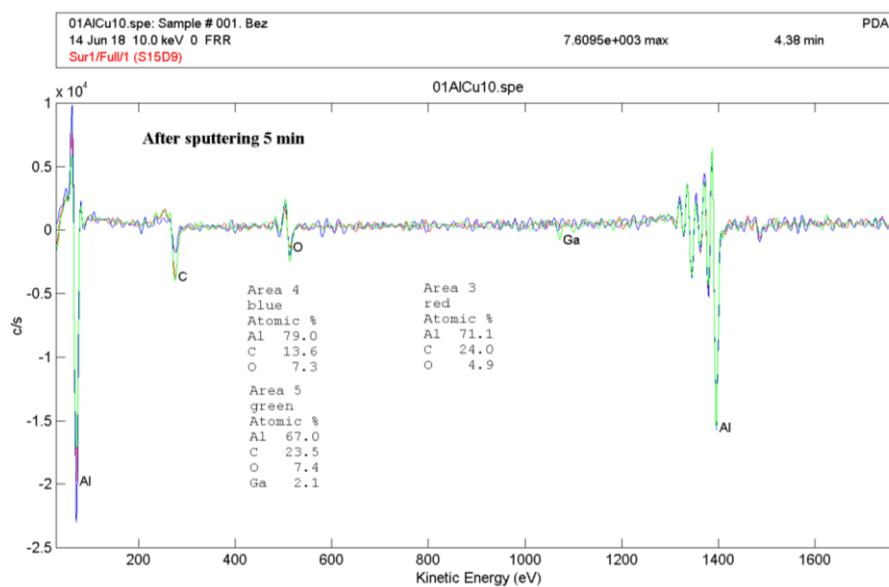


Рис. 6. Оже – спектры поверхности излома после травления

На рисунке 4, представляющем изображение поверхности излома до травления, видно присутствие однотонных областей светлого и темного оттенков. Также на поверхности присутствуют полусферические образования неизвестного происхождения с повышенным содержанием галлия. Анализ с использованием Оже – электронной спектроскопии показал, что по химическому составу данные области отличаются только содержанием кислорода и углерода. На спектре снятом с поверхности излома наблюдали пики Al, Ga и Na. Как видно из рисунков 5 и 6, травление поверхности хрупкого излома в течении 5 минут, что соответствует толщине слоя (5 – 7)нм, позволило избавиться поверхность от углерода, кислорода и галлия. Однако как на исходной поверхности, так и на поверхности после ионного травления не удалось обнаружить области с повышенным содержанием меди. Отсутствие пиков меди на представленных характеристических оже – спектрах связано с тем, что объемная концентрация меди в 1,65 % находится на пределе разрешающей способности метода оже – электронной спектроскопии, и линия меди находится на уровне фона. Кроме того, в результате травления на поверхности хрупкого излома, как показано на рисунке 5, появился микрорельеф.

Результаты. Проведенные эксперименты выявили наличие следующих закономерностей:

1. В отличие от чистого алюминия, при контакте сплавов Al - Cu с галлий содержащим водным раствором охрупчивание материала происходит только в случае малого (1,65 %) содержания меди в сплаве.

2. Исследования с помощью метода Оже – электронной спектроскопии показали наличие на поверхности хрупкого излома образца сплава Al - Cu натрия, а также отсутствие изменений концентрации меди. Исследования с помощью ЭОС показали, что область хрупкого излома соответствует области проникновения галлия. В отличие от результатов применения данного метода получения хрупкого излома чистого алюминия были обнаружены свидетельства растравления поверхности излома проникающей щелочью. Предположительно этот факт является причиной отсутствия локальных неоднородностей состава, и не позволяет сделать однозначный вывод об отсутствии зернограничной сегрегации в сплавах Al - Cu.

3. Травление поверхности хрупкого излома образца сплава Al - Cu приводит к появлению рельефа.

Список литературы

[1] *Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н.* Промышленные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1984.

[2] *Мондольфо Л.Ф.* Структура и свойства алюминиевых сплавов, М: Металлургия, 1979.

[3] *Белов Н.А.* Фазовый состав алюминиевых сплавов. М: Изд-во МИ-СиС, 2009.

[4] *Бокштейн Б.С., Конецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С.* Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. М: Metallurgiya, 1986.

[5] *M. B. Small, D. A. Smith and A. J. Garratt-Reed*, «Segregation of copper in dilute aluminum-copper alloys», *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 30, no. 12, pp. 1531-1534, 1994.

[6] *G. H. Campbell, J. M. Plitzko and W. E. King*, «Copper Segregation to the $\Sigma 5$ (310)/001 Symmetric Tilt Grain Boundary in Aluminum», *Interface Science*, vol. 12, p. 165–174, 2004.

Блатов Алексей Александрович - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: al-blatov@yandex.ru

А.П. Коржавый, Г.В. Прасицкий, В.В. Прасицкий

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНФИЛЬТРАЦИИ ПОРИСТЫХ КАРКАСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛЬФРАМОВО-МЕДНЫХ И МОЛИБДЕНОВО-МЕДНЫХ ПСЕВДОСПЛАВОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Общие закономерности впитывания идеальной жидкости в капилляр идеальной формы с идеальными свойствами достаточно полно описаны в литературе, например, [1].

В соответствии с формулой Жюрена

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r\rho g}, \quad (1)$$

высота поднятия жидкости по капилляру h определяется поверхностным натяжением σ , радиусом капилляра r , плотностью жидкости ρ и краевым углом смачивания θ .

Процесс динамической пропитки капилляров в общем виде может быть описан уравнением А.П. Порхаева [2]:

$$\frac{d^2 l}{dt^2} + \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 + \frac{8\eta}{r^2 \rho} \frac{dl}{dt} - \frac{2\sigma \cos \theta}{r\rho l} = 0, \quad (2)$$

где: l - длина столбика жидкости в капилляре в момент времени t ;

r - внутренний радиус капилляра; η - коэффициент динамической вязкости жидкости; σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ρ - плотность жидкости; θ - краевой угол смачивания.

Рассмотрим подход к решению задачи, предложенный в [1], предполагающий нахождение параметров инфильтрации путем применения второго закона Ньютона:

$$m \cdot \vec{a} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i, \quad (3)$$

где:

$V = \frac{dh}{d\tau}$ - скорость подъема фронта пропитки;

$\vec{a} = \frac{dV}{d\tau} = \frac{d^2 h}{d\tau^2}$, - ускорение подъема фронта пропитки;

$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i$, - сумма сил, действующих на пропитываемую жидкость.

В сумму сил входят:

- сила капиллярного подъема:

$$\vec{F}_h = \vec{F}_{\text{ну}} = \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot \cos \theta; \quad (4)$$

- сила давления жидкости в капилляре:

$$\vec{F}_d = -(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}}) \cdot g \cdot h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}; \quad (5)$$

- сила трения:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = - \left[\varepsilon \cdot \left(\frac{h}{d} \right) + \sum_{i=1}^N K_{\text{м.с.и}} \right] \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot V^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (6)$$

где: $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, площадь капилляра;

$\varepsilon = \frac{64}{Re}$ - коэффициент гидравлического сопротивления;

$Re = \frac{|V| \cdot d}{\nu}$ - число Рейнольдса

В свою очередь сила трения состоит из силы гидравлического сопротивления и суммы местных сопротивлений, обусловленных геометрическим строением капилляров.

Подставив (4) – (6) в (3), получим

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{1}{m} \left[\sigma \cdot \pi d \cdot \cos \theta - \left\{ (\rho_{ж} - \rho_{в}) \cdot gh + \left[\varepsilon \cdot \left(\frac{h}{d} \right) + \sum_{i=1}^N K_{м.с.i} \right] \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot V^2}{2} \right\} \cdot S \right], \quad (7)$$

Для приведенного в работе случая капиллярного впитывания воды в стеклянный капилляр диаметром 1 мм, сумма местных сопротивлений составляет в общей силе трения около 10%.

Авторами исследовалась возможность применения существующих в литературе подходов для описания физических явлений пропитки реальных капиллярно-пористых тел, представляющих собой спеченные порошковые каркасы из молибдена или вольфрама. Пропитанные жидкой медью, такие каркасы впоследствии становятся так называемым псевдосплавом, обладающим рядом характеристик, которые не могут быть обеспечены другим способом.

Были изготовлены спеченные каркасы из молибденового порошка марки МЧ с пористостью 47% и 18%. В качестве пропитывающей жидкости использовался ацетон марки ОСЧ. Пропитка проводилась в закрытом объеме в условиях постоянного давления насыщающих паров ацетона.

Важнейшая характеристика пропитываемого каркаса – структура поровых каналов. На рисунке рис. 1 приведены фотографии шлифов спеченных молибденовых каркасов с различной пористостью. При сечении параллелепипеда плоскостью, параллельной любой из его поверхностей, вид сечения не изменяется. Это позволяет предположить, что схема расположения капилляров может быть изображена, как показано на рис. 2.

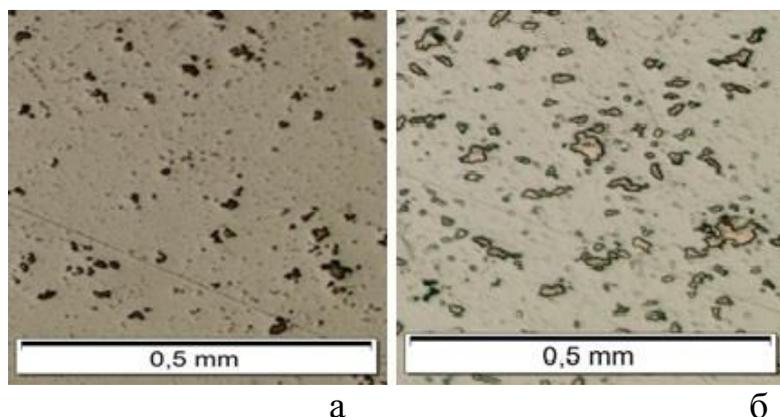


Рис. 1. Фотографии шлифов спеченных каркасов:
а - каркаса с пористостью 18%, б - каркаса с пористостью 47%

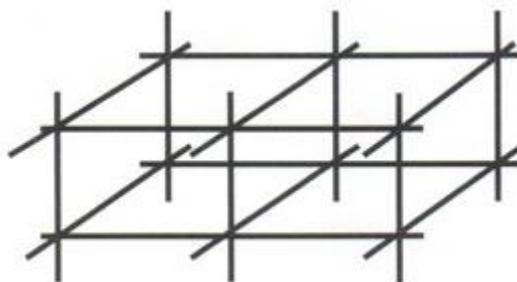


Рис. 2. Схематическое расположение капилляров в спеченном каркасе

Для проверки этого предположения производилась пропитка призматического каркаса через один из его углов. Как видно на рис. 3, распространение пропитывающей жидкости происходит с одинаковой скоростью по всем направлениям (пропитанная область имеет более темный оттенок), что подтверждает справедливость предложенной схемы.



Рис. 3. Фотография элемента пропитываемого каркаса

Перед проведением исследований, по высоте поднятия мениска ацетона между двумя полированными молибденовыми пластинами рассчитывался краевой угол смачивания. Его значение составило с приемлемой точностью 45° .

Процесс пропитки снимался видеокамерой, после чего определялись его параметры. Графические зависимости высоты подъема пропитывающей жидкости и скорости распространения фронта пропитывающей жидкости от времени пропитки приведены на рис. 4 и рис. 5.

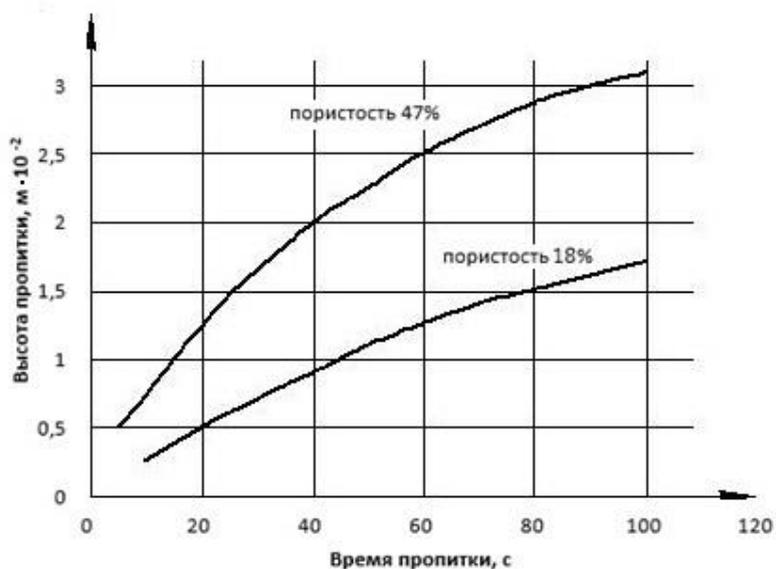


Рис. 4. Зависимость высоты пропитки от времени протекания процесса

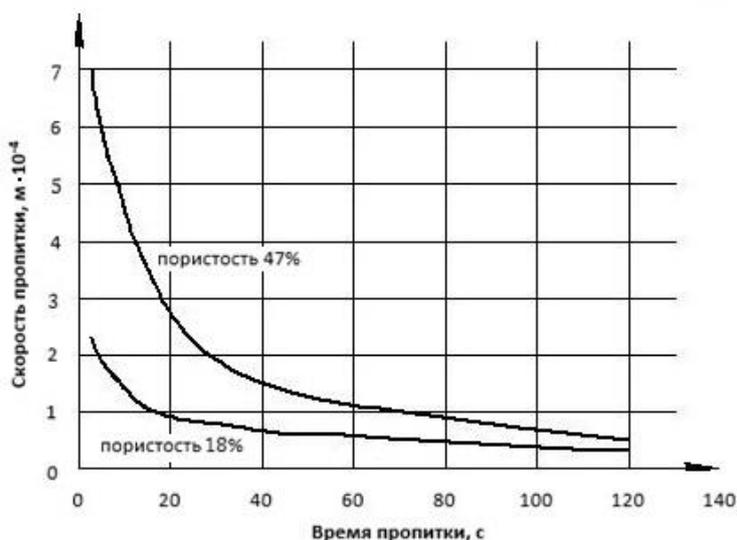


Рис. 5. Зависимость скорости пропитки от времени протекания процесса

В соответствии с имеющимися литературными данными и рис. 1, средний характерный диаметр капилляра для каркаса с пористостью 47% составляет порядка $2 \cdot 10^{-6}$ м, а для каркаса с пористостью 18% - $1 \cdot 10^{-6}$ м. Параметры пропитываемых жидкостей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры пропитываемых жидкостей

	σ , Н/м (Дж/м ²)	ρ , кг/м ³	η , мПа·с	ν , м ² /с
Вода	$72,69 \cdot 10^{-3}$	998,3	1,004	$1,006 \cdot 10^{-6}$
Ацетон	$23,3 \cdot 10^{-3}$	800	0,322	$0,4 \cdot 10^{-6}$
Жидкая медь	1,130	8400	2,5	$0,3 \cdot 10^{-6}$

Рассчитанные на основе выражения (7) значения сил, действующих на пропитываемую жидкость в процессе инфильтрации, сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Значения сил (Н), действующих на жидкость, и коэффициентов сопротивления, входящих в выражение (7), при высоте поднятия жидкости 10^{-2} м

	Вода	Ацетон		Жидкая медь
	$d_k = 10^{-3}$ м	$d_k = 10^{-6}$ м	$d_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м	$d_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м
$\sigma \cdot \pi d \cdot \cos \theta \cdot S$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$51,726 \cdot 10^{-9}$	$103,45 \cdot 10^{-9}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$
$(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}}) \cdot g h \cdot S$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$0,093 \cdot 10^{-9}$	$0,246 \cdot 10^{-9}$	$0,259 \cdot 10^{-8}$
$\vec{F}_{\text{тр}}$	$0,067 \cdot 10^{-4}$	$51,633 \cdot 10^{-9}$	$103,2 \cdot 10^{-9}$	$7,098 \cdot 10^{-6}$
$\varepsilon \cdot \left(\frac{h}{d}\right)$	9,84	$7,6 \cdot 10^8$	$1,896 \cdot 10^8$	$4,8 \cdot 10^6$
$\sum_{i=1}^N K_{\text{м.с.}i}$	0,6	$15,6 \cdot 10^8$	$9,4 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^6$

Как следует из таблицы 2, в случае стеклянного капилляра диаметром 1 мм идеальной геометрии, основным фактором, лимитирующим скорость пропитки, является возрастание массы жидкости.

В случае реальных пористых тел на первое место выходят гидравлическое сопротивление и местные коэффициенты сопротивления. Естественно, что с увеличением диаметра капиллярных пор оба вида сопротивлений уменьшаются.

Значение суммы местных сопротивлений определяется как переменным сечением капилляров по длине, так и наличием пересекающихся капилляров. Простые расчеты показывают, что при диаметре капилляров в 1 мкм и общей пористости каркаса 47%, количество областей пересечения может достигать 10^4 . Даже принимая во внимание, что коэффициенты местных сопротивлений могут достигать значения 2, их общая сумма меньше, чем расчетные значения, полученные на основании экспериментальных данных. Это свидетельствует, по-видимому, о том, что капиллярная структура, изображенная на рис. 2, отображает реальную картину весьма приближенно и между узлами условной решетки существуют промежуточные пересекающиеся области.

Список литературы

[1] Боев Ю.А. Численное исследование динамики капиллярного подъема жидкости / Ю. А. Боев, С. М. Сафьянц, А. Д. Качковский // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте ‘2012» – Одесса, 2012. – Т.1. – №2. – С. 53-61.

[2] Порхаев А.П. Кинетика впитывания жидкостей элементарными капиллярами // Коллоидный журнал. – 1949. – Т. 11. – №5. – С. 346-353.

Коржавый Алексей Панетелеви – д-р техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru

Прасицкий Григорий Васильевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: APKorzhaveyi@yandex.ru

Прасицкий Василий Витальевич - д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sintel40@yandex.ru

Йе Еинт Ко Ко, С.М. Твердова

КАТОДНО-ПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫЙ УЗЕЛ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АПАРАТУРЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Развитие современной электронной техники естественным образом связано с созданием новых и усовершенствованием свойств распространенных использованных материалов. Технологические возможности создания новых материалов и покрытий далеко не исчерпаны, и они, в первую очередь, открывают новые перспективы совершенствования физико-технических характеристик современных технических систем.

Как известно, важнейшими компонентами радиоэлектронной техники являются генераторные лампы, лампы бегущей волны (ЛБВ), клистроны непрерывного и импульсного действия, и т.п. Качество данных приборов в основном определяется долговечностью и надежностью катодных систем, в совокупность которых входят: подогревательные узлы, эмиттеры, сеточные электроды.

Отметим, что основными факторами отказов электровакуумных устройств являются перегорание и разрушение подогревательных узлов, рисунок. 1.

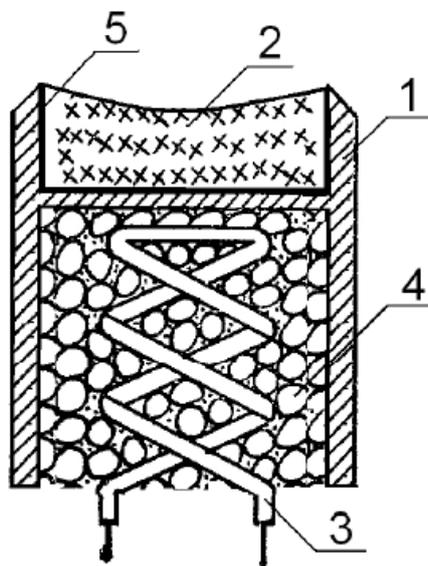


Рис. 1. Катодно-подогревательный узел: 1- корпус; 2- катод; 3- подогреватель; 4- изолирующий слой; 5-припой

Вопросы создания конструкции подогревательных узлов достаточно подробно освещены в отчетах компаний Токе Сибатура, Philips, Дэнки К.К., трудах российских изыскателей Овечкина В.И., Королева К.С., немецких ученых Lorehz A.G., Weiss E. и др. Проводились многочисленные исследо-

вания, направленные на увеличение механической прочности катодно-подогревательных узлов с помощью включения в изолирующий слой, которых состоит из металлических компонентов, оксида алюминия других оксидов и создания для уменьшения усадки изолирующей массы из смеси алундовых порошков при спекании. Чтобы гарантировать прочное спекание каркаса крупногранулированный порошок (частицы диаметром от $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ до $100 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) использовался для формирования каркаса материала заливки, а меркозернистый (частицы не более $50 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) располагался между крупными частицами. Тем не менее, исследования, направленные на увеличение механической прочности узлов, не решили проблему локальных перегревов. Проблема увеличения долговечности подогревательных узлов является актуальной и значимой.

Подогреватели, используемые для нагрева катодов косвенного накала, должны удовлетворять в течение установленного срока службы последующим основным потребностям: обладать высокой механической прочностью керна и изолирующего покрытия; иметь малое время разогрева, определяющее время готовности устройства; обладать минимальный разброс по току накала при данном напряжении накала; выдерживать превышение рабочей температуры при активировке катода; их долговечность должна превышать долговечность эмиттера катода.

Основными параметрами подогревателей являются: рабочая температура, теплопроводность покрытия и мощность накала. Рабочая температура подогревателя задается исходя из необходимой температуры катода и типично превосходит ее на $300 - 450^\circ \text{C}$ [1].

Подогреватель при высоких температурах в случае перегорания значительно ограничивает срок службы катодно-подогревательного узла (КПУ), по этой причине обеспечению его надежности необходимо уделять большое внимание. Свойства КПУ определяются не только внутренними механизмами эмиттера катода, а многими факторами, поэтому важно его рассматривать не как дискретный элемент, а как один из важнейших узлов ЭВП [2].

Традиционным материалом для изготовления изолирующих покрытий подогревателей и заливок пространства эмиттер-подогреватель является окись алюминия Al_2O_3 . При этом зачастую происходит значительная усадка, что приводит к нарушению термического контакта между катодом и подогревателем и, соответственно, уменьшению надежности и прочности катодных узлов. Для увеличения вибропрочности изоляционного состава предложено вводить в смесь из крупно- и мелкогранулированных частиц порошка окиси алюминия сферической формы частицы из окиси иттрия [4].

Таким образом, для устранения усадочных дефектов, повышения качества сцепления изоляции с подогревателем и катодом, улучшения теплопередачи от подогревателя к катоду во все заливки и покрытия из порошка

окиси алюминия вводят различные добавки. Другие подходы к решению проблемы улучшения контакта катода с подогревателем и повышения прочности и долговечности изоляции ранее не использовались.

Из сказанного можно сделать вывод: критическим элементом КПУ остается вольфрамовая спираль, конструкция которой остается в неизменном виде, при этом низкая теплопроводность изолирующего слоя, выполненного на основе алюмооксидной керамики, требует повышенной температуры нагрева спирали, что приводит к ее ускоренному разрушению.

Нами предлагается другой подход к конструированию подогревателя, основанный на использовании керметов с объемным распределением омического сопротивления.

В работе [5] показано теоретически, что сплошное заполнение объема катода материалом тела накала должно привести к снижению температурных перепадов подогреватель – катод и более эффективному использованию тепла в катодном узле; причина этого лежит в том, что теплообмен осуществляется исключительно путем теплопроводности, а теплотери являются минимальными. Осуществление этой идеи в реальных катодных узлах электровакуумных приборов (ЭВП) может выразиться в применении композиционных материалов (керметов), имеющих такой состав, который обеспечивает электрическую проводимость и в холодном состоянии и при высоких температурах. Преимущество использования керметов в подобных случаях заключается также в том, что должна резко повыситься механическая прочность катодного узла.

Некоторые авторы сделали попытки использовать керметы для изготовления подогревателей катодов ЭВП. Основой всех изученных ими составов керметов были композиции из тугоплавких материалов – проводящего и непроводящего электрический ток. Использование таких материалов позволяет, как выяснилось, получить весьма полезные свойства материала (в первую очередь – электрические), а изменение их достигается путем регулирования состава.

Авторы [6-11] исследовали керметы на основе металлического и керамического компонентов и пытались использовать их в качестве катодных подогревателей. В патенте [6] предложен катодный узел, где трубчатый подогреватель из кермета отделен от катодного керна вакуумным промежутком. Токоподводы вставлены в противоположные концы подогревателя.

В работе [12], направленной на разработку технологии получения токопроводящих керметовых изделий на основе Al_2O_3 с целью применения их в качестве высокотемпературных нагревателей для работы в вакууме. Корундовый микролит (т.е. технический глинозем с добавкой MgO для предотвращения интенсивного роста зерен Al_2O_3) подвергается шаровому

помолу с вольфрамом, что приводит к получению исходной массы, из которой затем формируются керметовые тела накала.

Список литературы

[1] *Гуртовник А.Г.* Электровакуумные приборы и основы их конструирования. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 424 с.

[2] *Еремка В.Д.* Эмиттеры электронов для электровакуумных приборов сверхвысоких частот // *В.Д. Еремка, Е.В. Седых*: Материалы 8-й международной Крымской микроволновой конференции, 14-17 сентября 1998 г., Севастополь, Крым, Украина: Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, 1998. – С. 193-198.

[3] Пат. 47-25739 Япония, НОІ j 1/20/ Токе Сibaура Дэнки К.К.; заявл.13.11.69; опубл.13.07.72.

[4] А.с. № 286087 СССР, НОІ j I/24. Изоляционный состав / *Г. С. Королева, В.И. Овечкина, З.С. Строкова, Л.К. Тайцель*; заявл.07.02.69; опубл.10.11.70.

[5] *Гондельсман И.Л., Френкель В.Я.* Научно-технический бюллетень ОКБ и завода “Светлана”, 9 (1959).

[6] Пат. США № 2.459.086 (11.01.1949), кл.250-27.5. Электронная лампа и тип катодного подогревателя для нее.

[7] Пат. США № 2.932.759 (12.04.1960), кл.313-337. Вакуумная лампа.

[8] Пат. США № 2.845.515 (1958), кл.201-63. Полуметаллические, обладающие сопротивлением нити накала.

[9] Брит. пат. № 895.238 (23.01.1959), кл.39 (1). Катодные материалы и их производство.

[10] Япон. Пат. № 12.152 (15.07.1963), кл.10А61. Спеченные материалы, применяемые в электронных лампах.

[11] Япон. Пат. № 14.5156 (09.07.1965), кл.93Д03. Термоэлектронный катод для электронного прибора.

[12] *Калитин П.П., Павлушкин Н.М.* Труды МХТИ им. Менделеева, 5 (1967), 193.

Йе Еинт Ко Ко - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ueyintkoko49@gmail.com

Твердова Светлана Михайловна - преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivalug@rambler.ru

В.В. Шагаев, Тун Тун Лин

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНКАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Спектр собственных колебаний намагниченности монокристаллической ферритовой пленки зависит от намагниченности насыщения феррита ($4\pi M_0$) и поля кристаллографической магнитной анизотропии (H_c). При малом отклонении этих параметров от исходных значений изменение частоты колебания можно выразить формулой:

$$\delta f = a \cdot \delta(4\pi M_0) + b \cdot \delta H_c, \quad (1)$$

где $a = df/d(4\pi M_0)$ и $b = df/dH_c$. Условие стабильности частоты имеет вид: $\delta f = 0$. Можно рассмотреть два варианта выполнения условия. В одном слагаемые в правой части формулы (1) компенсируют друг друга, и тогда условие постоянства частоты примет вид:

$$a \cdot \delta(4\pi M_0) + b \cdot \delta H_c = 0. \quad (2)$$

Во втором варианте выполняются оба равенства: $a = 0$ и $b = 0$.

Первый вариант был подробно исследован в работах [1 – 3]. В этих работах рассчитаны температурные коэффициенты частот магнитостатических волн и рассмотрены условия термостабилизации частот. Вторым вариантом прежде не рассматривался. Именно ему посвящена данная статья.

С практической точки зрения вариант с равенствами $a = 0$ и $b = 0$ интересен тем, что стабилизация частоты возможна независимо от природы изменения магнитных параметров феррита. Такие изменения могут быть связаны с температурой, с химическим составом, с упругими напряжениями. В результате появляется возможность повысить стабильность характеристик приборов на ферритовых пленках при одновременном влиянии нескольких факторов. Например, можно ослабить влияние на характеристики изменения концентрации легирующей примеси при производстве замещенных ферритов, и вместе с тем создать ферритовую пленку с повышенной термостабильностью.

Предлагаемый способ был опробован при решении задачи по стабилизации частоты однородного ферромагнитного резонанса (ФМР) в пленке кубического феррита. Модель пленки изображена на рис. 1. Используемые обозначения: M_0 – вектор намагниченности феррита; H_e – вектор напряженности внешнего намагничивающего поля; n – нормаль к пленке; x, y, z – координатные оси, причем $z \parallel M_0$ и $y \perp n$; θ, θ_H, δ – углы наклона к пленке векторов M_0, H_e и кристаллографической оси [001] соответствен-

но. Предполагалось, что векторы \mathbf{H}_e и \mathbf{M}_0 расположены в плоскости кристаллографической симметрии, проходящей через ось [001]. Данное предположение позволяет сократить количество угловых переменных, используемых в модели.

Плотность энергии кристаллографической магнитной анизотропии в большинстве ферритов с кубической симметрией кристаллической решетки описывается выражением [4]:

$$W_a^c = -\frac{K_{c1}}{2M_0^4} \sum_p M_p^4,$$

где K_{c1} – первая константа кубической магнитной анизотропии, а суммирование производится по проекциям вектора намагниченности на оси системы координат, образованной осями симметрии кристалла четвертого порядка. Данное выражение было использовано при выводе формулы для частоты ФМР, а также при выводе уравнения связи между углами θ и θ_H .

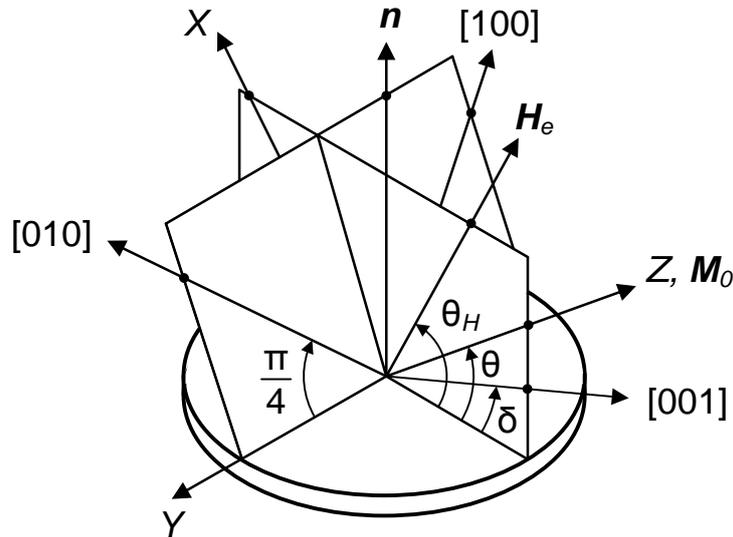


Рис. 1. Модель пленки с плоскостью симметрии типа {110}, расположенной перпендикулярно к пленке и намагниченной в этой плоскости

Частота ФМР в рассматриваемой модели задается формулой [5]:

$$(f_0/g)^2 = (H_{ez} + H_c n_x + 4\pi M_0 \cos 2\theta)(H_{ez} + H_c n_y - 4\pi M_0 \sin^2 \theta), \quad (3)$$

где g – гиромагнитное отношение; H_{ez} – проекция вектора \mathbf{H}_e на вектор \mathbf{M}_0 ; n_x и n_y учитывают влияние на частоту магнитной анизотропии и определены формулами:

$$n_x = \frac{1}{2} [\cos 2(\theta - \delta) + 3\cos 4(\theta - \delta)], \quad (4)$$

$$n_y = \frac{1}{8} [-3 + 16\cos 2(\theta - \delta) + 3\cos 4(\theta - \delta)]. \quad (5)$$

Из формулы (3) можно вывести соотношение:

$$\delta\left(\frac{f_0}{g}\right)^2 = 4\pi M_0 [A \cdot \delta(4\pi M_0) + B \cdot \delta H_c], \quad (6)$$

где A и B – безразмерные величины. При выводе соотношения нужно учитывать связанные с $\delta(4\pi M_0)$ и δH_c вариации δH_{ez} , δn_x , δn_y , $\delta\theta$. Выражения для $\delta\theta$ и δH_{ez} следуют из уравнений, определяющих проекции намагничивающего поля \mathbf{H}_e на координатные оси z и x :

$$H_{ez} = H_e \cos(\theta_H - \theta), \quad (7)$$

$$H_{ex} = H_e \sin(\theta_H - \theta) = M_0 N_{xz}^c + \left(\frac{\sin 2\theta}{2}\right) 4\pi M_0. \quad (8)$$

Здесь N_{xz}^c компонента эффективного размагничивающего фактора анизотропии, определяемая формулой [5]:

$$M_0 N_{xz}^c = \frac{1}{8} H_c [2\sin 2(\theta - \delta) + 3\sin 4(\theta - \delta)]. \quad (9)$$

Из (7) – (9) можно получить соотношения $\delta\theta = C \cdot \delta(4\pi M_0) + D \cdot \delta H_c$ и $\delta H_{ez} = K \cdot \delta\theta$, где

$$C = -\frac{\sin 2\theta}{2H_{ez} + H_c [\cos 2(\theta - \delta) + 3\cos 4(\theta - \delta)] + 2 \cdot 4\pi M_0 \cos 2\theta},$$

$$D = -\frac{2\sin 2(\theta - \delta) + 3\sin 4(\theta - \delta)}{4\{2H_{ez} + H_c [\cos 2(\theta - \delta) + 3\cos 4(\theta - \delta)] + 2 \cdot 4\pi M_0 \cos 2\theta\}},$$

$$K = \frac{H_c}{8} [2\sin 2(\theta - \delta) + 3\sin 4(\theta - \delta)] + \frac{\sin 2\theta}{2} 4\pi M_0.$$

δn_x , δn_y также можно выразить через $\delta\theta$. Из (4), (5) следует: $\delta n_x = (\partial n_x / \partial \theta) \delta\theta$ и $\delta n_y = (\partial n_y / \partial \theta) \delta\theta$.

Таким образом, расчетные формулы для A и B будут иметь вид:

$$4\pi M_0 A = \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial(4\pi M_0)} +$$

$$+ \left[\frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial H_{ez}} K + \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial \theta} + \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial n_x} \frac{\partial n_x}{\partial \theta} + \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial n_y} \frac{\partial n_y}{\partial \theta} \right] C,$$

$$4\pi M_0 B = \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial H_c} +$$

$$+ \left[\frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial H_{ez}} K + \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial \theta} + \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial n_x} \frac{\partial n_x}{\partial \theta} + \frac{\partial(f_0/g)^2}{\partial n_y} \frac{\partial n_y}{\partial \theta} \right] D.$$

Цель расчетов заключалась в том, чтобы из системы уравнений $A = 0$, $B = 0$ и (3) определить значения δ , θ и H_{ez} . Исходные значения параметров $4\pi M_0$, H_c и f_0/g в уравнениях заданы. Далее уравнения (7) – (8) позволяют перейти от параметров θ и H_{ez} к экспериментально контролируемым параметрам θ_H и H_e .

Таким образом, итогом решения задачи будет оптимальный выбор параметров намагничивающего поля (H_e и θ_H) и выбор кристаллографической ориентации пленки (δ). Критерием оптимальности является условие сохранения значения частоты ФМР при отклонении магнитных параметров феррита от исходных значений.

В качестве примера, на рис. 2 приведены результаты расчетов, выполненных для значения $f_0/g = 4\pi M_0$.

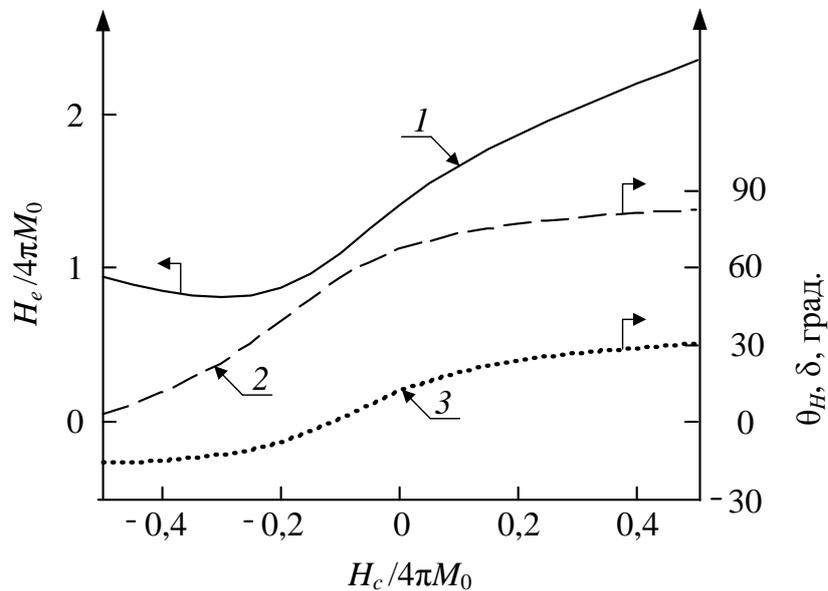


Рис. 2. Расчетные зависимости оптимальных значений $H_e/4\pi M_0$ – (1), θ_H – (2) и δ – (3) от $H_c/4\pi M_0$

Обращение в ноль выражения для δf_0 , полученного в линейном по вариациям $\delta(4\pi M_0)$ и δH_c приближении предполагает, что в пленке с оптимальными параметрами δf_0 будет задано квадратичной формой:

$$\frac{\delta f_0}{f_0} = \frac{1}{4(f_0/g)^2} \left\{ \frac{d^2(f_0/g)^2}{d(4\pi M_0)^2} [\delta(4\pi M_0)]^2 + 2 \frac{d^2(f_0/g)^2}{dH_c d(4\pi M_0)} \delta(4\pi M_0) \delta H_c + \frac{d^2(f_0/g)^2}{dH_c^2} (\delta H_c)^2 \right\}.$$

На рис. 3 приведены примеры зависимостей, задаваемых квадратичной формой. Рассчитанные значения $\delta f_0/f_0$ расположены на поверхностях гиперболических параболоидов, имеющих форму седла.

Результаты работы могут быть использованы при разработке устройств спин-волновой электроники. Следует отметить, что построенная модель не вводит ограничений на величину и знак H_c . Поэтому выведенные соотношения применимы не только к ферритам, у которых $|H_c/4\pi M_0| \ll 1$ и которые в настоящее время широко используются в спин-волновой электронике, но и к перспективным материалам с большой анизотропией. Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать и минимизировать изменения характеристик устройств, обусловленные изменениями магнитных параметров феррита. Предложенный подход особенно важен для разработки частотно-селективных устройств с повышенной стабильностью рабочих частот.

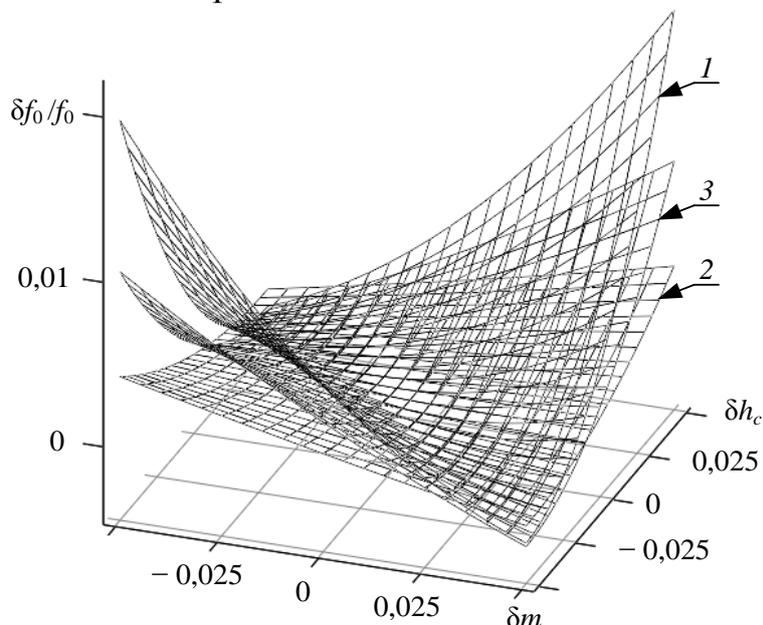


Рис. 3. Смещение частоты ФМР в оптимизированных пленках с исходными значениями: 1 – $H_c/(4\pi M_0)=0,5$; 2 – $H_c/(4\pi M_0)=-0,5$; 3 – $H_c = 0$; $f_0 = 4\pi M_0 g$ для всех трех пленок; обозначения осей: $\delta m \equiv \delta(4\pi M_0)/(4\pi M_0)$ и $\delta h_c \equiv \delta H_c/(4\pi M_0)$

Список литературы

[1] Шагаев В.В. Влияние кубической анизотропии на температурные характеристики магнитоэлектрических волн в ферритовых пленках, намагниченных в плоскости // ЖТФ. – 1998. – Т.68, № 10. – С. 99-103.

[2] *Шагаев В.В.* О влиянии магнитной кристаллографической анизотропии на температурные характеристики магнитостатических волн в ферромагнитных пленках // ФТТ. – 2003. – Т.45, № 12. – С. 2215-2221.

[3] *Шагаев В.В.* Феррит-гранатовые пленки с двумя термостабильными частотами ферромагнитного резонанса // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т.32, № 18. – С. 1-6.

[4] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. – М.: Наука, 1994, 464 с.

[5] *Бондаренко Г.Г., Шагаев В.В.* Магнитостатические волны в планарных ферритах: температурные характеристики и их структурно-обусловленные особенности // Изв. ВУЗов. Сер. Физика. – 2013. – Т.56, № 1/2 – С.13-22.

Шагаев Владимир Васильевич - д-р физ.-мат. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: shagaev-vv@yandex.ru

Тун Тун Лин - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tuntunlinn50@gmail.com

Д.В. Андреев, А.А. Столяров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ МДП-СЕНСОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Важным направлением исследований радиационных воздействий на структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) является возможность использования МДП-структур и приборов на их основе в качестве активных элементов сенсоров радиационных излучений, основанных на анализе ионизационных процессов, протекающих как в области пространственного заряда полупроводника, так и в диэлектрической пленке [1].

В данной работе разработана модель изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик постоянным током, учитывающая действие ионизирующих излучений на образец. Проведено моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими пленками при воздействии радиационных излучений.

Моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO₂ при сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов в режиме поддержания постоянного тока проводилось на основе следующей системы уравнений [2]:

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO₂ на вновь созданных ловушках

$$n_t = \frac{g}{q} \cdot Q_{inj} - \frac{g}{\sigma_g} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_g \cdot Q_{inj}}{q}\right) \right]; \quad (1)$$

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO₂ на исходных ловушках

$$n_{t0} = N_{t0} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{t0} \cdot Q_{inj}}{q}\right) \right]; \quad (2)$$

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния

$$\Delta V_1(+) = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \left[n_{t0} (d_{ox} - x_{n0}) + n_t (d_{ox} - x_n) - p (d_{ox} - x_p) \right]; \quad (3)$$

- уравнение для плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO₂

$$q \frac{dp}{dt} = J_{inj} \cdot [(m-1)] \cdot \sigma_p \cdot (N_p - p) - J_{inj} \cdot \sigma_n \cdot p; \quad (4)$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма

$$J_{inj} = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right); \quad (5)$$

– уравнение нейтральности зарядов

$$Q_0 = Q_C + Q_{inj} + Q_{ion}, \quad (6)$$

где q – заряд электрона; n_{i0} и n_t – плотности электронов, накапливаемых в SiO_2 на исходных и вновь созданных ловушках соответственно; p – плотность дырок, накапливаемых в SiO_2 ; d_{ox} – толщина подзатворного диэлектрика; x_{n0} , x_n , и x_p – положения центроидов (относительно границы Si- SiO_2) отрицательного заряда в SiO_2 на исходных ловушках, отрицательного заряда в SiO_2 на вновь созданных ловушках и положительного заряда в SiO_2 соответственно; σ_g – сечения захвата вновь созданных электронных ловушек; N_{t0} и σ_{t0} – плотности и сечения захвата электронных ловушек в пленке SiO_2 ; t – время; Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик ($Q_{inj} = J_{inj} \cdot t$); $(m-1)$ – коэффициент генерации дырок (m – коэффициент умножения электронов); g – коэффициент генерации дырок из анода; N_p и σ_p – плотности и сечения захвата дырочных ловушек; σ_n – сечение захвата заполненными дырочными ловушками инжектированных электронов; $A=1,54 \cdot 10^{-6} \cdot m_0/m^* \cdot \varphi_B^{-1}$ [A/V²] и $B=6,83 \cdot 10^7 \cdot m_0/m^* \cdot \varphi_B^{3/2}$ [В/см] – постоянные туннельной инжекции по Фаулеру-Нордгейму; m_0 и m^* – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике; φ_B – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела; E – напряженность катодного электрического поля; Q_0 – заряд, подводимый к образцу ($Q_0 = J_0 \cdot t$) импульсом постоянного тока плотностью J_0 ; Q_C – заряд, накапливаемый емкостью МДП-структуры ($Q_C = C_{mos} \cdot V_I(t)$), C_{mos} – емкость структуры, $V_I(t)$ – временная зависимость падающего на образце напряжения; Q_{ion} – заряд, созданный в диэлектрике ионизацией ($Q_{ion} = J_{ion} \cdot t$), J_{ion} – плотность тока ионизации. Импульс ионизационного тока от воздействия радиационного излучения моделировался генератором тока.

Система (1–6) решалась при следующих начальных условиях: $n_{i0}(0) = n_t(0) = p(0) = 0$. Плотность захваченных дырок находилась путем численного решения методом Рунге-Кутты четвертого-пятого порядка дифференциального уравнения (4), в котором сечение захвата электронов σ_n имеет полевою зависимость $\sigma_n = b_0 \cdot E^{-3}$, где b_0 – параметр модели, E – напряженность электрического поля в диэлектрике (МВ/см). Коэффициент генерации дырок рассчитывался с использованием выражений, предложенных в [2]. Параметры модели, входящие в выражения (1–6), полагались следующими [2]: $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-14}$ см²; $b_0 = 3 \cdot 10^{-13}$ МВ³/см; $N_p = 1 \cdot 10^{13}$ см⁻²; $\sigma_t = 1 \cdot 10^{-18}$ см²; $N_t = 1,5 \cdot 10^{13}$ см⁻²; $g = 3 \cdot 10^{-7}$; $\sigma_g = 1,4 \cdot 10^{-15}$ см².

Результаты моделирования радиационных воздействий на МДП-структуры, экспериментально исследованные в [3] и находящиеся в режиме инжекции электронов из кремния импульсом постоянного тока, приведены на рис. 1.

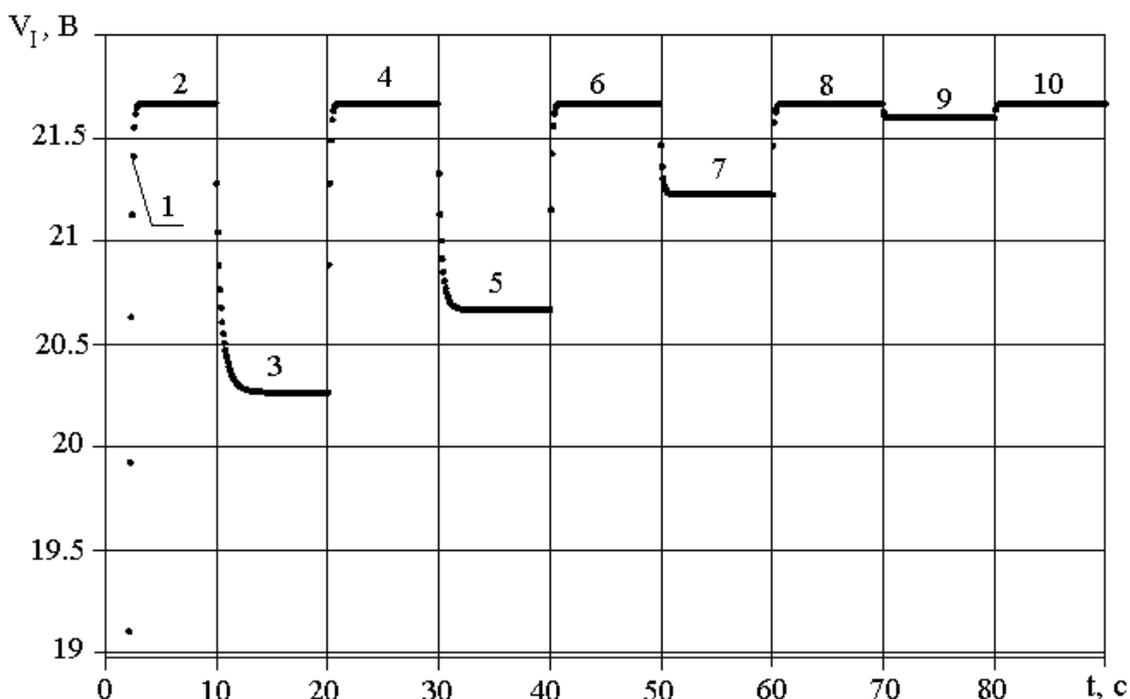


Рис. 1. Высоковольтный участок временной зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния, при протекании через диэлектрическую пленку постоянного тока плотностью $J_0 = 10^{-6}$ А/см². На участках 1,2,4,6,8,10 облучение отсутствует. На участках 3,5,7,9 действует излучение, при этом на участках: 3 – $J_{\text{ion}} = 0,9 \cdot J_0$; 5 – $J_{\text{ion}} = 0,8 \cdot J_0$; 7 – $J_{\text{ion}} = 0,5 \cdot J_0$; 9 – $J_{\text{ion}} = 0,1 \cdot J_0$.

На рис. 1 показан высоковольтный участок временной зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции, при протекании через диэлектрическую пленку постоянного тока плотностью 10^{-6} А/см². Для зависимостей, показанных на рис. 1, плотность тока ионизации была меньше плотности импульса постоянного тока, подводимого к структуре. Как видно из рис. 1, с увеличением амплитуды ионизационного тока уменьшается напряжение, падающее на структуре.

Таким образом, результаты моделирования показали, что ионизационные процессы, протекающие в диэлектрических пленках МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов импульсом постоянного тока, можно использовать для регистрации радиационных излучений. При этом для повышения точности регистрации измерение ионизационного тока желательно проводить при нескольких амплитудах импульса постоянного тока, как меньших, так и больших амплитуды ионизационного тока.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117), а также при финансовой поддержке администрации Калужской области (грант № 16-42-400791).

Литература

[1] Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. М.: Энергоатомиздат. 1988. 256 с.

[2] Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Зарядовая нестабильность МДП-структур с диэлектрическими слоями двуокись кремния - фосфорно-силикатное стекло в условиях высокополевой туннельной инжекции // Известия вузов. Физика. 1999. № 10. С. 59–63.

[3] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Лычагин А.А., Столяров А.А., Ульяненко С.Е. Радиационная ионизация в структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов// Физика и химия обработки материалов. 2006. № 5. С. 19–23.

Андреев Дмитрий Владимирович - канд. техн. наук, ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dmitrii_andreev@bmstu.ru

Столяров Александр Алексеевич - д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru

Йе Еинт Ко Ко, С.М. Твердова

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ КАТОДНО-ПОДОГРЕВАТЕЛЬНОГО УЗЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМОНИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Катодно-подогревательный узел (КПУ) является одним из основных элементов вакуумных приборов, в которых используются электронные потоки, создаваемые термоэлектронными эмиттерами. Как правило, он представляет собой сборку, в которой разогрев катода происходит тепловым излучением накаливаемого подогревателя. Электрическая изоляция между катодом и подогревателем реализуется слоем керамики, обычно оксида алюминия, нанесенного на подогреватель.

У этой традиционной конструкции присутствуют, по крайней мере, два существенных недостатка. Низкая теплопроводность алюмооксидной керамики, имеющая значение порядка 26 Вт/мК, экранирует тепловой поток от подогревателя, что приводит к необходимости повышения его температуры. Нить или лента накала при повышенных температурах ускоренно разрушается, сокращая срок службы КПУ.

Для устранения перечисленных недостатков может быть применен керметовый нагреватель с распределенным омическим сопротивлением, изготовленный на базе алюмонитридной керамики. В связи с уникальным сочетанием физических свойств, например, высокой теплопроводности, высокого электрического сопротивления и коэффициента теплового расширения (КТР), близкого к КТР кремния, нитрид алюминия (AlN) становится ключевым материалом, используемым в качестве теплопроводящих элементов для электронных приборов, особенно при высокой мощности. Хотя теоретическая теплопроводность кристаллического AlN при комнатной температуре, как полагают, достигает 319 Вт/мК, измеренные значения для поликристаллической керамики AlN не превышают 285 Вт/мК. Этот диапазон является типичным для многих видов керамики с поликристаллической структурой. Как и у монокристаллов, дефекты кристаллической решетки отдельных кристаллов у поликристаллической керамики играют доминирующую роль в механизме теплопроводности.

Поскольку в электронике основная область применения алюмонитридной керамики – теплопроводящие подложки полупроводниковых приборов, то подавляющее количество работ посвящено проблемам металлизации подложек. Изготовление подогревателя с объемным распределением токопроводящей фазы, в сущности, предполагает использование тех же явлений соединения керамики и металла.

Попытки металлизировать AlN керамику известными пастами, применяемыми для металлизации алюмооксидной керамики, оказались неудачными. В литературе [1] описан способ металлизации алюмонитридной керамики, согласно которому с помощью эвтектики оксид алюминия-медь непосредственно на поверхность AlN керамики наносят слой меди. Однако изделия, получаемые таким способом, не допускают высокотемпературную пайку в среде водорода из-за восстановления адгезионного эвтектического слоя.

В [2] предлагается паста для металлизации алюмонитридной керамики, включающая молибден, марганец, оксид кремния и оксид магния при следующих соотношениях компонентов (массовая доля, %): $Mo-78-80$; $Mn-5$; $SiO_2-10-15$; $MgO-5$. Перед нанесением пасты на AlN керамику, керамику предварительно термообработывают на воздухе при температуре $800-1200^\circ C$, а вжигание металлизации проводят при температуре $1340-1380^\circ C$ в среде, содержащей водород с точкой росы $+10-+20^\circ C$.

Основой для разработки способа получения кермета для подогревателей может послужить процесс, описанный в [3]: электропроводные элементы выполняют в виде слоев из порошкообразных смесей тугоплавких металлов вольфрама, и/или молибдена, и/или никеля с керамической добавкой того же состава, что и керамика. Электропроводящие элементы при этом вжигают в алюмонитридную подложку совместно и одновременно с ее спеканием в защитной газовой атмосфере азота в смеси с водородом или без него при той же высокой температуре в диапазоне $1700-1900^\circ C$. Данный процесс пригоден для металлизации сырых, не спеченных керамических изделий и не предназначен для металлизации спеченных пластин, отшлифованных в размер.

Исходя из анализа литературных данных и результатов собственных исследований, нами был разработан способ изготовления кермета для подогревателя катода, включающий следующие этапы:

- подготовка исходных материалов;
- приготовление шликера;
- формование сырых образцов;
- выжигание пластификатора;
- спекание образцов;

Для изготовления экспериментальных образцов исходные сухие компоненты перемешивались с растворителем, диспергатором, пластификатором, связкой и пеногасителем в эксцентриковой мельнице с яшмовыми шарами и обезгаживались в вакууме. Приготовленный состав формовался в

виде цилиндрических заготовок. Удаление пластификатора и спекание заготовок производилось в проходной водородной печи.

В качестве токопроводящей фазы использовался молибден марки МЧ, а в качестве диэлектрика – порошок *AlN*.

Список литературы

- [1] Патент США №5165983, кл. H05B 3/10, 24.11.1992.
- [2] Патент РФ №0002528815. Металлизационная паста и способ металлизации алюмонитридной керамики.
- [3] Патент РФ №2154361, кл. H05B 3/10, H01C 17/00, 10.08.2000.

Йе Еинт Ко Ко - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ueyintkoko49@gmail.com

Твердова Светлана Михайловна - преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivalug@rambler.ru

Е.Ю. Агу

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДНЫХ КАТОДОВ В ЛАЗЕРАХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Эффективность и конкурентоспособность современных летательных аппаратов (ЛА) во многом определяется совершенством гироскопических датчиков, на базе которых строятся навигационные системы и системы управления.

В настоящее время существует большое многообразие различных типов гироскопических датчиков, правильное применение которых обеспечивает необходимые эксплуатационные качества ЛА.

При выборе гироскопического датчика учитываются следующие его основные характеристики: точность, надежность работы, энергопотребление, габаритные размеры и стоимость.

Из всего многообразия датчиков можно выделить лазерные гироскопы. Лазерные гироскопы обладают рядом преимуществ - повышенная надежность, минимальное потребление электроэнергии и высокая точность работы [1].

Широкую востребованность для производства лазерных гироскопов имеют малогабаритные газоразрядные (гелий-неоновые) лазеры с холодным катодом [2, 3]. Использование холодного катода, малая потребляемая мощность, высокая долговечность позволяют успешно конкурировать данному виду лазеров с доведенными в настоящее время до высокого совершенства полупроводниковыми лазерами, а по ряду свойств и превосходить их [4].

Поскольку требования к миниатюризации изделий и снижению весогабаритных характеристик, а также долговечности таких лазеров непрерывно возрастают, то поиску материалов для холодных катодов и совершенствованию технологии их изготовления уделяют все больше внимания.

Холодные катоды газоразрядных приборов в последнее десятилетие разрабатывают на основе многокомпозиционных материалов. И особый интерес в качестве холодного источника электронов для лазеров вызывает использование композиций, базирующихся на титане и цирконии [5, 6].

Эффективность данного вида структур экспериментально доказана испытаниями их в изделиях мощной полупроводниковой электроники [7].

На фото рис. 1. приведены изготовленные и исследованные в газоразрядных макетах миниатюрные наноструктурированные холодные источники электронов на основе титана и циркония предназначенные для применения их в малогабаритных газоразрядных лазерах.

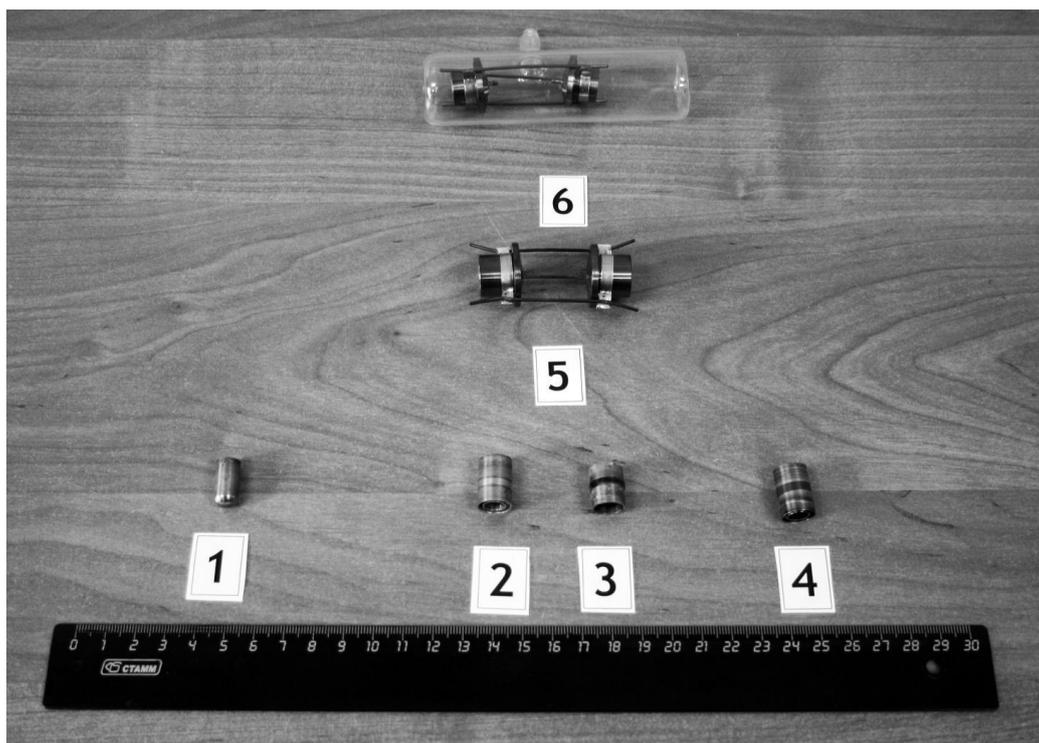


Рис. 1. Миниатюрные наноструктурированные холодные источники электронов на основе титана и циркония: 1- циркониевый холодный катод с полусферическим дном, 2 – цилиндрический холодный катод из циркония, 3 – циркониевый холодный катод с никелевым пояском – токопроводом, 4 – циркониевый холодный катод, сформированный из многослойной ленты, 5 – титановые полые холодные катоды с полусферическим дном, смонтированные для транспортировки потребителю, 6 – титановые холодные катоды в вакуумированной стеклянной колбе

При исследовании экспериментальных образцов катодов на основе титановых и циркониевых композиций были получены уникальные результаты, позволяющие рекомендовать такие важные изделия электронной компонентной базы (ЭКБ) для использования их в малогабаритных атомарных и молекулярных газоразрядных лазерах высокой долговечности.

Список литературы

[1] Галкин В.И. Перспективные гироскопы летательных аппаратов – М.: МАТИ, 2005 – 151 с.

[2] Синельников А.О., Ермак Е.М., Коржавый А.П. Особенности захвата частот в лазерном гироскопе с частотной подставкой на эффекте Зеемана // Научные технологии. 2012. Т. 13. № 10. С. 40-45.

[3] Хворостов В.И., Горбунов А.К., Хворостова Н.Н., Силаева Н.А. Физико-технологические особенности применения эмиттирующих структур в газоразрядных лазерных датчиках // Научные технологии. 2012. Т. 13. № 10. С. 34-39.

[4] *Дерюгина Е.О.* Роль физико-химических свойств материала и конфигурации поверхности холодного катода в обеспечении его работоспособности в тлеющем разряде: Автореф. дис. канд. ф-м. наук. — Москва, 2004. — 20 с.

[5] *Марин В.П., Жданов С.М., Пчелинцева Н.И.* Основные физические процессы, используемые в технике обеспечения высокой долговечности малогабаритных лазеров на химически активных средах // Научные технологии. 2009. Т. 10. № 11. С. 49-56.

[6] *Горбунов А.К., В.П., Жданов С.М., Пчелинцева Н.И., Никифоров Д.К.* Получение и использование наноструктур и нанопокровов в атомарных и молекулярных газовых лазерах средах // Научные технологии. 2014. Т. 15. № 10. С. 54-60.

[7] *Скипер А.В., Лазарева Н.С., Зайончковский В.С., Расторгуев И.А.* Анализ омического контакта системы титан-никель с сильно легированным кремнием N-типа // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 5. С. 8-10.

Агу Елизавета Юрьевна - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: liza.kornyushina@gmail.com

В.В. Андреев, Д.В. Андреев, Д.М. Ахмелкин, В.В. Кузнецов

ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МДП-СТРУКТУР ИНЖЕКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Данная работа посвящена исследованию влияния режимов инжекционно-термической обработки на модификацию МДП-структур. Изучено влияние режимов сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик МДП-структур, а также влияние температуры кристалла, при которой проводится инжекция, на плотности зарядовых дефектов и инжекционную стойкость [1-11].

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термического диоксида кремния (SiO_2), изготовленные промышленным способом на пластинах кремния КЭФ-4,5. Пленку SiO_2 толщиной $30 \div 50$ нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температурах $850 \div 1000$ °С с добавлением 3% HCl . В качестве затвора (верхнего электрода) использовались пленки поликремния (Si^*) толщиной 0,6 мкм, легированные фосфором до $20 \text{ Ом}/\square$ площадью $10^{-4} \div 10^{-2} \text{ см}^2$.

Инжекционная обработка МДП-структур заключается в сильнополевой по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов из кремния в подзатворный диэлектрик МДП-структур импульсом постоянного тока рис. 1 (а) или напряжения рис. 1 (с) при температуре образца от 20 до 100 °С. Инжекция электронов из кремния была выбрана для обеспечения режима аккумуляции и упрощения интерпретации экспериментальных данных [9,10].

В режиме управляемого тока [9-11] для инжекционной модификации МДП-структуры использовался двухуровневый токовый импульс рис.1 (а). Участок I на рис. 2 (а,b) соответствует заряду емкости МДП-структуры постоянным измерительным током I_m . На этом участке весь ток, протекающий через диэлектрик, является емкостным. На участках II и IV заряд инжектируется в диэлектрик постоянным током I_m . Для модификации используется инжекция заряда стрессовым током I_s на участке III. Амплитуда тока I_m должна быть много меньше амплитуды тока I_s для того, чтобы корректно контролировать изменение зарядового состояния МДП-структур после модификации (участок IV) [10]. Контроль изменения зарядового состояния МДП-структуры при инжекционной обработке в режиме управляемого тока проводился по временной зависимости напряжения на МДП-структуре рис.1 (b) [10, 11].

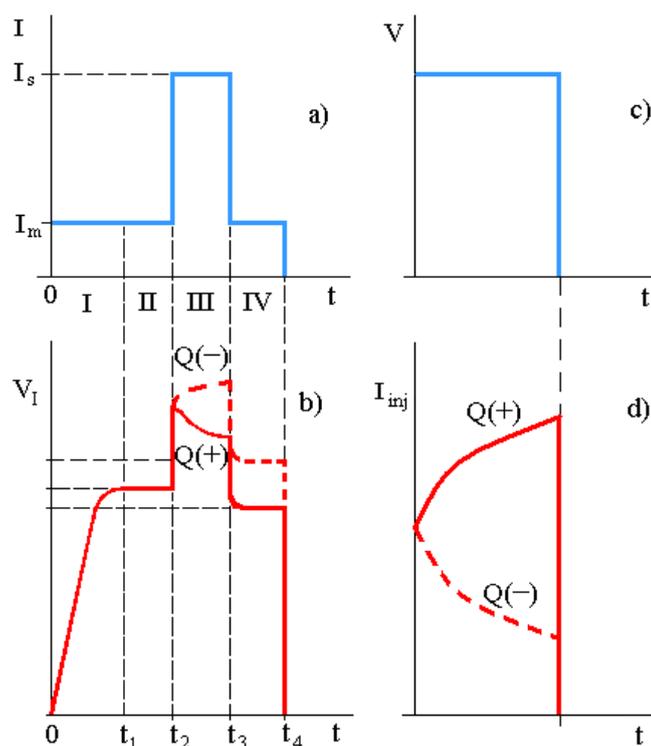


Рис. 1. Временные зависимости инжекционной обработки в режиме управляемого тока (а) и постоянного напряжения (с). Контроль изменения зарядового состояния в режиме управляемого тока осуществляется по временной зависимости напряжения на МДП-структуре (b), а в режиме постоянного напряжения - по временной зависимости тока, протекающего через диэлектрик (d)

Более простым методом инжекционной обработки МДП-структур является режим постоянного напряжения рис.1 (с). Изменение зарядового состояния МДП-структуры в этом режиме контролируется по временной зависимости инжекционного тока, протекающего через подзатворный диэлектрик рис.1 (d). К недостаткам этого режима следует отнести изменение режимов инжекции в процессе накопления в объеме подзатворного диэлектрика зарядов и, как следствие, усложнение контролируемой модификации МДП-структур [1,13], а также необходимость учета емкостной составляющей тока (на рис. 1 (d) емкостной ток не показан).

В данной работе для инжекционной обработки МДП-структур в основном использовался режим управляемого тока. Режим постоянного напряжения применялся только для МДП-структур с малой площадью затвора, для которых сложно было реализовать режим управляемого тока. Инжекционная обработка в основном проводилась при стрессовом уровне тока $0,1 \div 1 \text{ мА/см}^2$, что позволяло обеспечить малые времена обработки. Плотность измерительного тока при реализации режима управляемого тока рис. 1 (а) составляла $0,1 \text{ мкА/см}^2$.

При проведении ИТО МДП-структуры после инъекционной обработки отжигались при температуре 200 °С в течение 20 минут [9, 11].

Для оценки дефектности МДП-структур до и после ИТО использовался метод управляемой токовой нагрузки [10, 11], в котором величина заряда, инжескированного до его пробоя [9, 11], измерялась, как правило, в режиме поддержания постоянной плотности тока, соответствующей плотности стрессового тока при модификации.

Для исследования влияния радиационного облучения на зарядовое состояние МДП-структур использовалось ионизирующее излучение гамма-квантов (источник Co^{60}).

Для контроля изменения зарядового состояния МДП-структур после инъекционных обработок и радиационного облучения использовались методы многоуровневой токовой нагрузки [10] и C-V характеристик.

На рисунке 2 показаны относительные гистограммы распределения МДП-структур по величине заряда, инжескированного до пробоя образца, характеризующие проведение инъекционно-термической обработки. Гистограмма 2 на рисунке 2 соответствует группе МДП-структур, прошедших инъекционно-термическую обработку (0,5 мКл/см²), гистограмма 1 – группе структур, не подвергавшихся обработке.

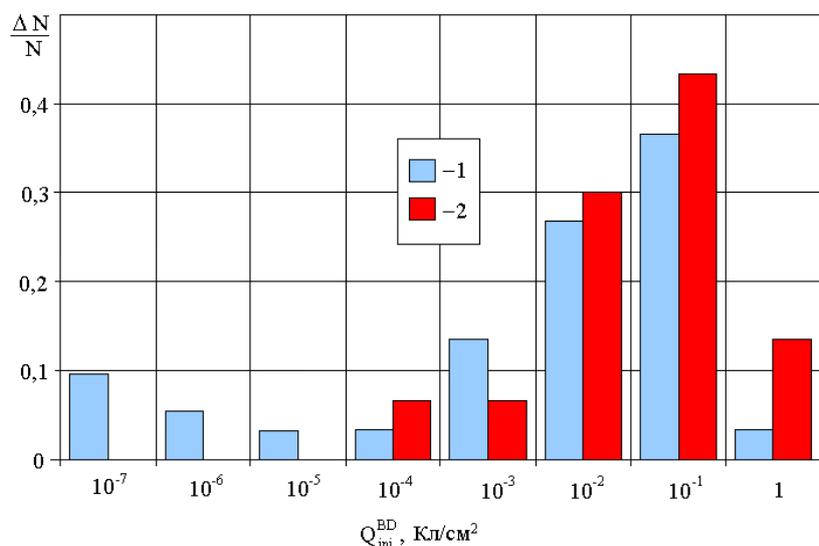


Рис. 2. Относительные гистограммы зарядовой стабильности, характеризующие распределение МДП-структур по пластине в зависимости от величины заряда, инжескированного в диэлектрик до их пробоя: 1 – до ИТО; 2 – после ИТО

Из гистограмм, приведенных на рис. 2, видно, что ИТО позволяет выявлять и устранять структуры с грубыми дефектами изоляции. Благодаря применению инъекционно-термической обработки происходит достаточно заметное повышение инъекционной и радиационной стойкости МДП-структур (рис. 4), что может быть объяснено образованием более совершенных структур.

шенной структуры подзатворного диэлектрика, поскольку сильнополевая инжекция электронов разрывает напряженные связи в пленке SiO_2 и на границе раздела Si-SiO_2 , а последующий отжиг восстанавливает валентные связи, но уже без их деформации [1-4].

Таким образом, показано, что процессы модификации и деградации МДП-структур, наблюдающиеся при инжекционно-термической обработке, во многом идентичны процессам, происходящим при радиационно-термической обработке (РТО), и, следовательно, для определенных видов МДП-приборов РТО может быть заменена на ИТО. Установлено, что проведение ИТО позволяет повысить надежность и выявлять МДП-приборы, содержащие зарядовые дефекты в подзатворном диэлектрике. Установлено, что основными параметрами при инжекционно-термической обработке, определяющими ее эффективность, являются величина электрического поля, при которой проводится инжекция, и величина заряда, инжектированного в диэлектрик. Для каждого конкретного подзатворного диэлектрика эти параметры должны подбираться экспериментально. Показано, что для уменьшения вероятности пробоя подзатворного диэлектрика и повышения эффективности ИТО сильнополевую инжекцию электронов лучше проводить при комнатной температуре, а возникающие при этом деградиационные эффекты снимать последующим отжигом.

Работа выполнена при финансовой поддержке администрации Калужской области (грант № 16-42-400791).

Литература

[1] Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Suñé J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. Wiley-IEEE Press. 2009. ISBN: 0471731722. 624 p.

[2] United States Military Standard MIL-STD-883H Method 1019.8.

[3] Катеринич И.И., Курин Ф.М., Попов В.Д. Метод радиационно-термической обработки и повышения надежности МОП интегральных схем. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 1996, вып.3-4, с.127-132.

[4] Воронкова Г.М., Попов В.Д., Протопопов Г.А. Уменьшение плотности ловушечных центров в оксиде кремния при радиационно-термической обработке. Физика и техника полупроводников, 2007, т.41, вып. 8, с.977-980.

[5] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures. Thin solid films, 2003, v.427, p.377-380.

[6] Knoll M., Brauning D., Fahrner W.R. Comparative studies of tunnel injection and irradiation on metal oxide semiconductor structures. J. Appl. Phys., 1982, v.53, p.6946-6952.

[7] Андреев В.В., Бедняков А.А., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Лоскутов С.А. Сравнительное исследование зарядового состояния МДП-структур при облучении протонами и инжекции заряда в сильных электрических полях. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2002, вып.1-2, с.61-66.

[8] Park M.S., Na I., and Wie C.R. A comparison of ionizing radiation and high field stress effects in n-channel power vertical double-diffused metal-oxide-semiconductor field-effect transistors. J. Appl. Phys., 2005, v.97, p.014503(1–6).

[9] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Михальков А.М., Столяров А.А., Соловьев И.В. Повышение инжекционной и радиационной стойкости наноразмерных диэлектрических пленок МДП-приборов. Перспективные материалы, 2011, № 3, с.29-32.

[10] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v.41, 2012, p.012017(1-6).

[11] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Ахмелкина М. Модификация диэлектрических пленок МДП-структур инжекционно-термической обработкой // Перспективные материалы. 2014. № 12. С.25-31.

Андреев Владимир Викторович - д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Андреев Дмитрий Владимирович - канд. техн. наук, ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dmitrii_andreev@bmstu.ru

Ахмелкин Дмитрий Михайлович - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Кузнецов Вадим Вадимович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ra3xdh@gmail.com

А.В. Романов

СЕНСОР РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ МДП-СТРУКТУР

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В данной работе разработан сенсор на основе МДП-структур для контроля интенсивности радиационного излучения и определения интегральной поглощенной дозы. Проведено исследование воздействия α -частиц на МДП-структуры, находящиеся в специальных электрических режимах.

Разработанный полупроводниковый кристалл сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур выполнен по технологии, совместимой с технологией изготовления серийных КМДП ИС 564 серии, и имеет размеры 4x4 мм. Фотография полупроводникового кристалла чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур приведена на рис. 1, а. На его поверхности сформированы шестнадцать МДП-структур различной площади, имеющие выводы на контактные площадки. Для удобства контактирования и использования полученные кристаллы развариваются в корпуса интегральных микросхем. С этой целью все контактные площадки сформированы на толстой пленке SiO_2 , а также имеются планарные контакты к подложке. На рис. 1, б показан такой кристалл, разваренный в 48-ми выводной стандартный металлокерамический корпус ИС. К выводам ИС подключается оборудование для задания электрических режимов работы сенсора и регистрации параметров и характеристик радиационных излучений.

Исследуемые МДП-конденсаторы формировались на пластинах КЭФ-4,5, имеющих кристаллографическую ориентацию $\langle 100 \rangle$. Низкоомный полупроводник был специально выбран для удобства создания сильнополевых инжекционных режимов при изучении ионизационных процессов, протекающих под действием облучения в наноразмерных диэлектрических пленках. Диоксид кремния толщиной 20÷100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl . Верхние электроды формировались с использованием фотолитографии по алюминиевой пленке, напыленной магнетронным методом. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °С.

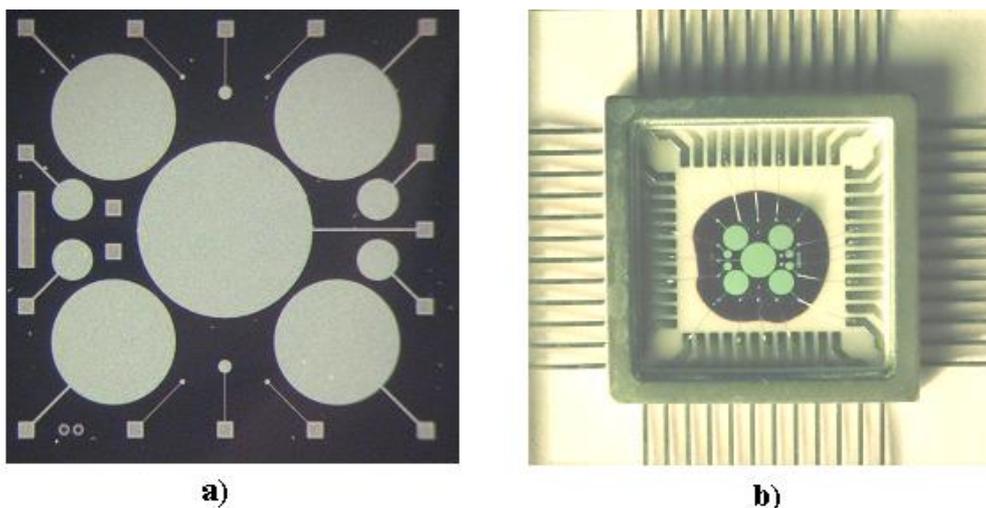


Рис. 1. Фотографии полупроводникового кристалла МДП-сенсора (а) и собранного сенсора радиационных излучений (b)

Во время облучения к МДП-структуре прикладывается импульс постоянного тока, обеспечивающий заряд емкости структуры, а затем установление режима сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. Амплитуда импульса тока выбиралась исходя из условия незначительной зарядовой деградации МДП-структуры, обусловленной инжекцией электронов в течение всего измерительного цикла, а также исходя из получения необходимой чувствительности МДП-структуры. Экспериментальная установка позволяла переключать амплитуду прикладываемого токового импульса, реализуя режимы многоуровневой токовой нагрузки [6-8]. Для получения информации об изменении зарядового состояния диэлектрической пленки и влиянии радиационной ионизации непосредственно в процессе облучения во время токового воздействия контролировалось напряжение на МДП-структуре. Кроме того, изменение зарядового состояния МДП-структур после радиационных воздействий контролировалось с использованием C-V метода.

Для исследования влияния α -частиц на МДП-структуры, находящиеся в режиме сильнополевой инжекции носителей в диэлектрик, образцы подвергались воздействию излучения источника ^{239}Pu . Мощность потока α -частиц составляла $10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Для исследования радиационного излучения гамма квантов использовался источник Co^{60} .

Экспериментальные результаты, иллюстрирующие воздействие α -частиц на МДП-структуры в условиях приложения к образцу постоянного импульса тока плотностью $10^{-8} \div 10^{-6} \text{ А/см}^2$, представлены на рис. 2. Участок 1 на рис.2 соответствует заряду емкости МДП-структуры постоянным током плотностью 10^{-8} А/см^2 до напряжения, обеспечивающего переход структуры в режим сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремниевой подложки (участок 2). Затем на расстоянии нескольких миллиметров от затвора МДП-структуры помещали источник α -частиц (рис. 2,

облучению соответствуют участки 3,4,5,6). В [5,9] было показано, что при приложении к МДП-структуре импульса постоянного тока плотностью J_0 можно записать следующее выражение для суммы плотностей токов:

$$J_0 = J_c + J_{inj} + J_{ion}, \quad (1)$$

где $J_c = C(dV/dt)$ – плотность емкостного тока; C – удельная емкость МДП-структуры; J_{inj} – плотность тока сильнополевой туннельной инжекции электронов; J_{ion} – плотность тока ионизации, возникающего в МДП-структуре под действием излучения.

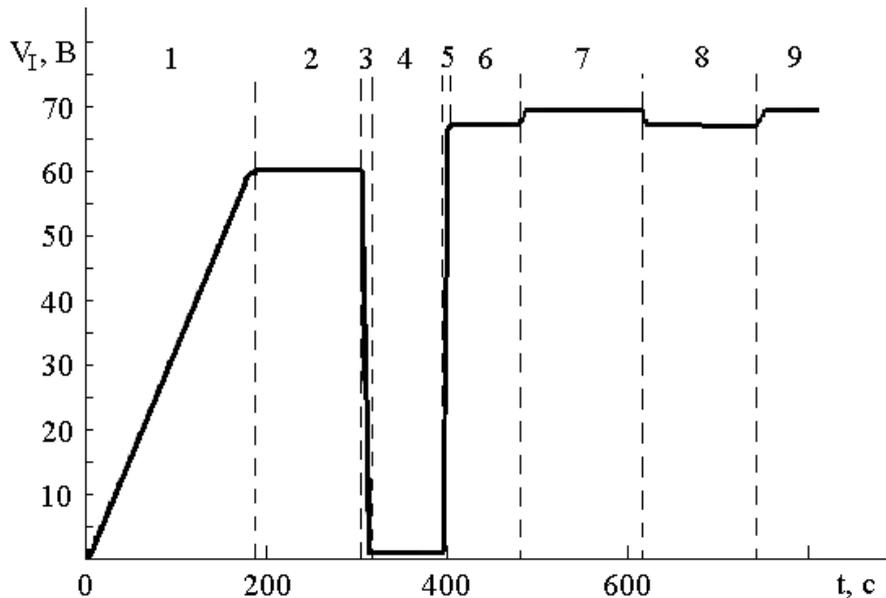


Рис. 2. Временная зависимость напряжения на МДП-структуре при заряде (участки 1,5) и разряде (участок 3) емкости МДП-структуры, а также при протекании сильнополевого инжекционного тока (участки 2,6,7,8,9) в условиях приложения к образцу постоянного импульса тока: 1,2,3,4 – 10^{-8} А/см²; 5,6,7,8,9 – 10^{-6} А/см²; на участках 3,4,5,6,8 проводилось облучение α -частицами

Следовательно, если плотность ионизационного тока больше плотности J_0 , то будет наблюдаться разряд емкости МДП-структуры до напряжений, близких к нулю (рис. 2, участок 3). По скорости разряда емкости МДП-структуры на этом участке, с использованием формулы (1), была рассчитана плотность тока ионизации, которая составила $3 \cdot 10^{-7}$ А/см² в середине участка и уменьшалась до $2 \cdot 10^{-7}$ А/см² в области более слабых электрических полей. На участке 5 (рис. 2) плотность тока, прикладываемого к МДП-структуре, была увеличена до 10^{-6} А/см², в результате чего J_{ion} стала меньше J_0 и структура перешла в режим заряда емкости. Наличие ионизационного тока на участке 5 приводит к уменьшению скорости возрастания напряжения (рис. 2) по сравнению с режимом, в котором отсутствовало облучение. Напряжение было рассчитано с использованием выражения (1). На этом участке значение J_{ion} также дало значение $(2 \div 3) \cdot 10^{-7}$

А/см². На участке 6 (рис. 2) напряжение, при котором структура переходит в режим сильнополевой инжекции электронов, ниже, чем на участке 7, где отсутствует облучение. Плотность ионизационного тока на участке 6 (рис. 2) можно рассчитать, используя выражение (1) и уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма [7].

Таким образом, ионизационный ток, возникающий в процессе облучения МДП-структуры при поддержании режима протекания постоянного тока, может существенно уменьшать электрическое поле в диэлектрической пленке. Плотность ионизационного тока, рассчитанная с использованием выражения (1) на участках 6 и 8 (рис. 2) была равна $5 \cdot 10^{-7}$ А/см². Более высокая плотность ионизационного тока на участках 6 и 8 была, по-видимому, обусловлена полевой зависимостью радиационной ионизации [5,9].

После прекращения кратковременного действия α -облучения напряжение на МДП-структуре практически возвращается к значениям, наблюдавшимся до облучения (рис. 2), что свидетельствует об отсутствии заметных деградиационных процессов в диэлектрической пленке [6]. При более длительных воздействиях α -частиц в подзатворном диэлектрике у границы раздела с кремнием накапливается положительный заряд, плотность которого пропорциональна интегральной поглощенной дозе ионизирующего излучения [2,3]. Накопление положительного заряда приводит к уменьшению напряжения, падающего на МДП-структуре в режиме сильнополевой инжекции электронов V_1 при протекании постоянного тока. Еще более существенное влияние накопление положительного заряда оказывает на сдвиг C-V характеристик.

Таким образом, разработан МДП-сенсор радиационного излучения, позволяющий контролировать интенсивность радиационного излучения и определять интегральную поглощенную дозу. Проведено исследование воздействия α -частиц и γ -излучения на МДП-структуры, находящиеся в специальных электрических режимах. Установлено, что ионизационный ток, возникающий в процессе радиационного облучения МДП-структуры, в режиме протекания через диэлектрик постоянного тока может существенно уменьшать электрическое поле в диэлектрической пленке. Показано, что из анализа временной зависимости напряжения, падающего на МДП-структуре в режиме протекания постоянного тока, как в режиме заряда емкости, так и в режиме сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, можно определять величину ионизационного тока. Это явление можно использовать в сенсорах радиационных излучений, позволяющих контролировать как интенсивность радиационных излучений, так и величину интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Литература

[1] *Asensio L.J., Carvajal M.A., Lopez-Villanueva J.A., Vilches M., Lallena A.M., Palma A.J.* Evaluation of a low-cost commercial mosfet as radiation dosimeter // *Sensors and Actuators A*. 2006. V. 125. P. 288–295.

[2] *Ma T.P., Dressendorfer P.V.* Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. Wiley-IEEE, 1989, 442 p.

[3] *Перевертайло В.Л.* Датчики интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзисторов // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2010, № 5-6, с. 22-29.

[4] *Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М.* Активный чувствительный элемент сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими слоями // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. 2010. С.118-127.

[5] *Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Романов А.В., Лоскутов С.А.* Процессы радиационной ионизации в диэлектрических пленках МДП-структур в сильных электрических полях // *Перспективные материалы*. 2015. № 12. С.25-31.

[6] *Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A.* Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2012. V. 41. P. 012017.

[7] *Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V.* Control current stress technique for the investigation of gate dielectrics of MIS devices // *Phys. Status Solidi C*. 2015. Vol.12. No. 3. P.299–303.

[8] *Андреев В.В., Столяров А.А., Дмитриев В.Г., Романов А.В.* Инжекционные методы контроля подзатворного диэлектрика МДП-ИМС // *Наукоемкие технологии*. 2012. Т.13. № 10. С.20-28.

[9] *Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Лычагин А.А., Столяров А.А., Ульяненко С.Е.* Радиационная ионизация в структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов // *Физика и химия обработки материалов*. 2006. № 5. С. 19-23.

Романов Андрей Владимирович - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

П.В. Кондрашов, В.В. Андреев, С.А. Лоскутов

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ УПРАВЛЯЕМОГО ТОКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

При изготовлении МДП-структур для обеспечения высокого уровня качества требуется применение эффективных методов контроля. В частности, в производстве больших интегральных схем контрольно-технологические операции составляют более 30% всех технологических операций. Наибольший процент брака МДП-БИС приходится на подзатворный диэлектрик, поэтому технологическая операция получения диэлектрической пленки определяет качество микросхем.

Наиболее удачным методом контроля дефектности МДП-структур для применения в условиях массового производства является метод измерения напряжения пробоя подзатворного диэлектрика. Измерения напряжения пробоя производятся в нормальных условиях и могут быть сравнительно легко автоматизированы. Достоинством измерения напряжения пробоя как метода контроля дефектности подзатворного диэлектрика является и то, что в этом случае получают количественную характеристику качества процесса получения МДП-БИС.

Известные методы измерения напряжения пробоя отличаются друг от друга, во-первых, способами фиксирования напряжения пробоя, а во-вторых, мерами, принимаемыми для уменьшения влияния токовых перегрузок, создаваемых при измерении напряжения пробоя, на свойства испытываемых образцов [1]. С точки зрения неразрушаемости, наилучшим способом фиксирования напряжения пробоя, является определение пробоя при достижении током, идущим через структуру, определенной величины.

Данная работа посвящена разработке установки для измерения параметров МДП-структур. Описан принцип ее работы, приводится ее структурная и электрическая схемы.

Структурная схема установки изображена на рис.1. Принцип работы последней следующий. Исследуемая МДП-структура подсоединяется к устройству подключения. Одновременно с этим, на устройство подключения подается напряжение с блока измерения, состоящего из узла измерения и узла коммутации добавочных резисторов. Для работы узла измерения необходимо опорное напряжение, которое формирует ЦАП. Управление узлом коммутации осуществляется автоматически, с помощью цифрового блока. Сделано это для повышения оперативности и удобства работы с установкой. ЦАП и цифровой блок управляются с компьютера.

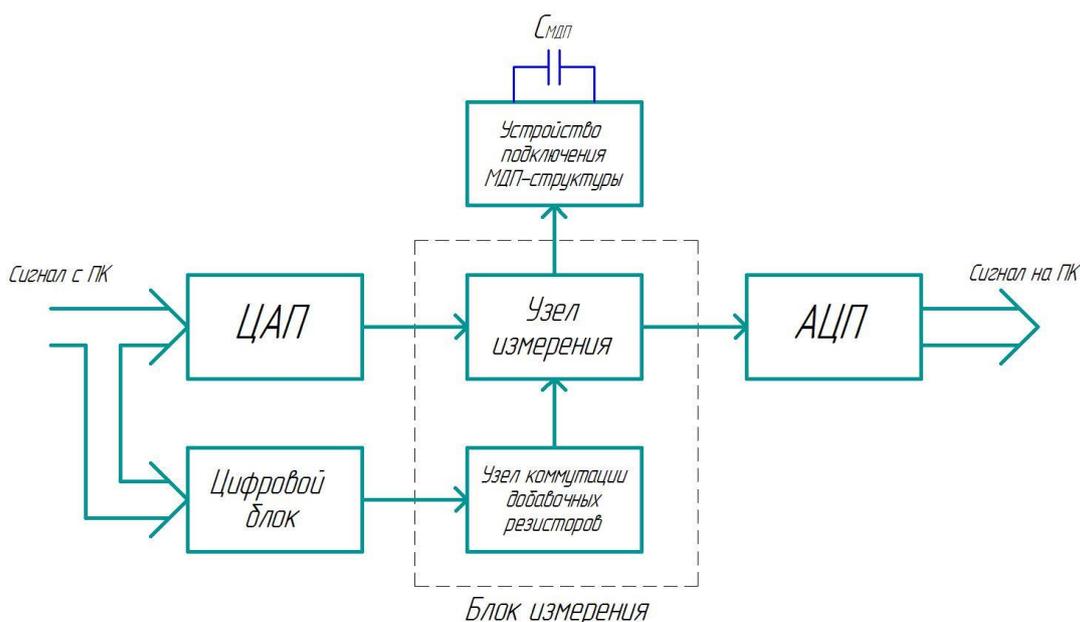


Рис. 1. Структурная схема

Формируемое на выходе узла измерения напряжение подается на АЦП, выход которого подключен к ПК.

ЦАП, АЦП и цифровой блок используются заводские, фирмы «National Instruments», NI9263, NI9205 и NI9401 соответственно. Для работы с ними создано программное обеспечение в среде для создания виртуальных измерительных приборов LabVIEW 8.2. Также ведется разработка отдельного программного обеспечения на языке программирования С#.

Для реализации установки был разработан специальный блок измерения, его электрическая схема приведена на рис.2. Основу ее составляет операционный усилитель DA1. На его неинвертирующий вход подается напряжение с ЦАП. Исследуемая структура включается между инвертирующим входом и выходом усилителя. При этом, структура, в совокупности с одним из добавочных резисторов R1-R5, создает делитель напряжения, коэффициент деления которого меняется с изменением протекающего через структуру инжекционного тока. В результате, напряжение на выходе усилителя также имеет переменную величину, равную сумме входного напряжения и напряжения на структуре. Выходное напряжение может превышать предельно допустимое для АЦП, поэтому выход микросхемы соединен не напрямую, а через делитель напряжения на резисторах R5 и R6.

Изменением напряжения на входе усилителя можно менять ток через структуру на 2 порядка. Дальнейшее изменение тока осуществляется за счет перекоммутации добавочных резисторов.

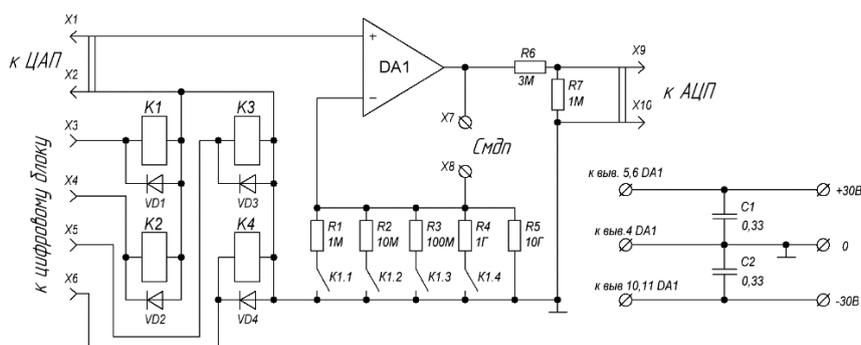


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная

Блок коммутации состоит из герконовых реле К1-К4, диодов VD1-VD4 и резисторов R1-R5. Поскольку одним из обязательных условий нормальной работы схемы являются малые токи утечки элементов, была выбрана электромеханическая схема коммутации. Ток срабатывания герконовых реле не превышает 20 мА, а это значит, что их обмотки можно подключать напрямую к цифровому блоку, без развязывающих цепей. Однако, это требует дополнительной защиты выходных цепей цифрового блока от ЭДС самоиндукции, возникающей при размыкании реле. С этой целью параллельно обмоткам реле включены диоды VD1-VD4.

Питание блока измерения осуществляется от двухполярного блока питания напряжением ± 30 В. Конденсаторы в цепи питания предназначены для подавления помех.

В качестве микросхемы DA1 используется операционный усилитель ОРА2544Т. Реле К1-К4 – РЭС81, паспорт РС4.569.790-02. Для соединения блока измерения с устройством подключения МДП-структур используются экранированные провода с разъемами СР-50.

Узел измерения и узел коммутации конструктивно объединены в одном корпусе 175x125x90, выполненном из металла. Во избежание наводок и самовозбуждения устройства корпус тщательно заземляется. Также заземляются корпуса блока питания и устройства подключения.

Таким образом, в данной работе разработана автоматизированная установка для измерения параметров МДП-структур в условиях управляемого токового воздействия. Она позволяет подавать на МДП-структуры импульсы тока в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-3} А. В результате можно реализовать методы исследования МДП-структур в режиме постоянного тока и управляемой токовой нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник: Монография.// М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 256 с.

Кондрашов Павел Вячеславович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: p.kondrashov.radio@yandex.ru

Андреев Владимир Викторович - д-р техн. наук, профессор, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Лоскутов Сергей Александрович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: SergeL-75@yandex.ru

СЕКЦИЯ 4.

ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ

Н.В. Гридчин, Ф.Г. Завальный

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПРОТЕЧЕК ЧЕРЕЗ ЛАБИРИНТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

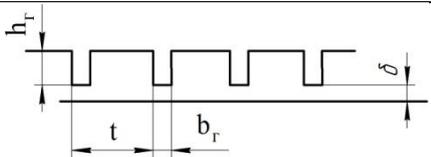
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

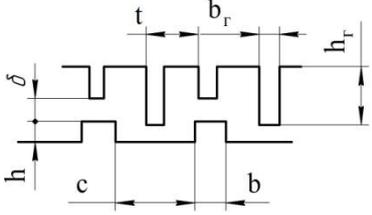
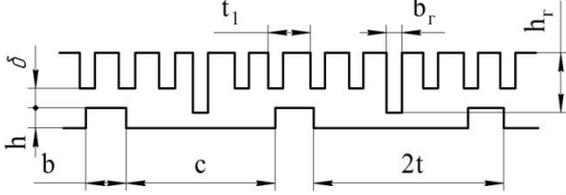
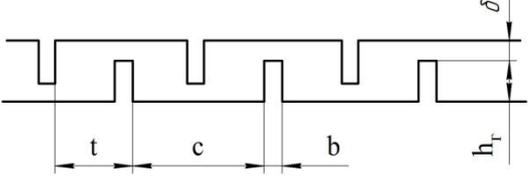
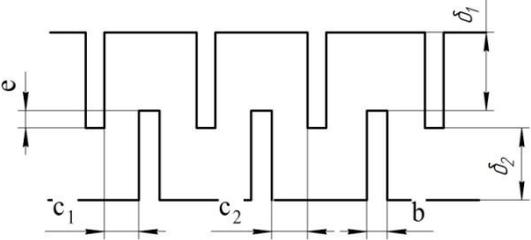
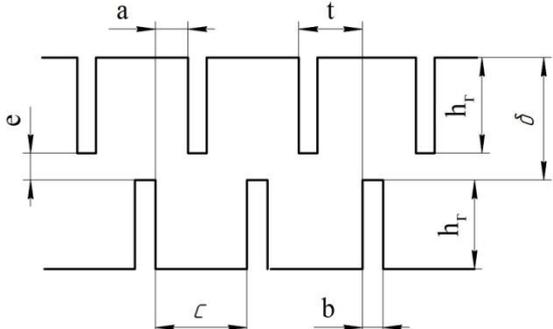
Лабиринтные уплотнения – бесконтактные уплотнения, предназначенные для ограничения утечек рабочей среды вдоль вала из корпуса турбомашин и перетечек между ступенями и лопаточными венцами ротора и статора. Принцип действия данного типа уплотнений пассивный – без отбора энергии у ротора.

Выбор типа уплотнений производится из условия достижения минимальной протечки при заданных осевых и радиальных габаритах участка, отводимого под уплотнение, и при определяющих размерах (осевом разбеге s и радиальном зазоре δ), обеспечивающих эксплуатационную надежность. Уплотнения выбираются по аэродинамическому признаку, характеризующему траекторию движения потока между соседними зазорами. В прямоточных (сквозных) уплотнениях уплотнительные зазоры располагаются на одинаковых диаметрах, осевой разбег не ограничен ($c = \infty$) и поток движется вдоль цилиндрической поверхности с прямолинейной образующей. В ступенчатых уплотнениях соседние зазоры расположены на разных диаметрах (с перекрышей), что ограничивает осевой разбег и вместе с тем заставляет поток двигаться зигзагообразно, периодически меняя направление [1,2].

К применению в турбомашинах рекомендуется пять основных типов уплотнений с оптимальным соотношением геометрических размеров (таблица 1). Уплотнительные зазоры в первых четырех типах уплотнений (прямоточное и три разновидности ступенчатого) – радиальные, а в пятом типе (гарантированно-бесконтактное) – осевые, поэтому величина радиального зазора в нем неограничена. Каждый тип уплотнения имеет предпочтительную область применения в зависимости от требуемых величин осевого разбега и радиального зазора.

Таблица 1. Типы лабиринтных уплотнений

Тип уплотнения		Оптимальные соотношения размеров
Прямоточное		h_r принимается минимальным, но $h_r > 2\delta$, $t = 2,5h_r$

Тип уплотнения		Оптимальные соотношения размеров
Ступенчатое с выступами и чередующимися короткими и длинными гребнями		$\frac{c}{2} > h \geq 3\delta$ $c > b \geq c - 3\delta$
Ступенчатое с выступами и увеличенным числом коротких гребней		$\frac{c}{2} \geq h \geq 3\delta \quad h_{\text{опт}} = \frac{c}{3},$ $t_1 = b \geq 3\delta$
Ступенчатое комбинированное с чередующимися гребнями ротора и статора		$\frac{c}{4} \leq h_r \leq \frac{c}{2},$ $h_r > \delta < \frac{c}{2}$
Гарантированно-бесконтактное уплотнение с чередующимися гребнями ротора и статора (Уплотнение ТМЗ)		$e = (0,15 \dots 0,2)(c_1 + c_2)$
Гарантированно-бесконтактное уплотнение с чередующимися гребнями ротора и статора (Уплотнение ЦКТИ)		$e = -0,05 + 0,15c$

Рабочий процесс – дросселирование – заключается в переводе разности потенциальных энергий среды разделяемых полостей в кинетическую энергию, а затем в тепло за счет гашения скорости трением. Т.е. работа возможна только при перетекании рабочей среды.

Ограничение утечки осуществляется следующими средствами:

1. уменьшением величины зазора;
2. уменьшением сечения струи в зазоре за счет создания отрывного течения заострением кромок гребней и резким изменением направления потока;

3. уменьшением скорости в зазоре путем дробления перепада давлений между полостями за счет увеличения числа гребней, а также путем более полного гашения скорости в камерах (в щелевых уплотнениях уменьшение скорости достигается так же увеличением протяженности щелей).

Методика расчета лабиринтных уплотнений стационарных паровых и газовых турбин программно реализована с использованием языка программирования Delphi. Расчет уплотнений построен на методике расчета утечек через уплотнения турбины на базе РТМ 108.020.33-86 «Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров» [1].

Программа может работать в двух режимах:

- проверочного расчета;
- проектировочного расчета.

При проверочном расчете производится расчет утечек через уплотнения по заданным исходным данным.

При проектировочном оптимизационном расчете производится перебор исходных данных в заданном коридоре, выбирается тип лабиринтного уплотнения, его основные геометрические размеры и производится расчет протечек.

Список литературы

[1] РТМ 108.020.33-86 «Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров».

[2] РТМ 24.021.08 «Турбины паровые стационарные. Нормы теплового расчета. Расчет осевого усилия».

Гридчин Николай Викторович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Завальный Федор Геннадьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fedor.zavalnyj1995@gmail.com

С.В. Киселев, А.А. Сидоров

ВЛИЯНИЕ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одной из основных задач турбостроения является задача обеспечения надежности турбоагрегатов в течение всего периода эксплуатации. В этой связи представляют практический интерес исследования влияния типа охлаждения сопловых лопаток перспективных высокотемпературных паро– и газотурбинных двигателей [1] на вибрационную надежность лопаток. Известно, что одной из причин колебаний рабочих лопаток являются переменные аэродинамические силы, вызванные неравномерностью от кромочных следов за сопловыми лопатками [2]. Интенсивность кромочных следов может меняться в зависимости от разных факторов: параметров основного потока, конструктивных особенностей сопловой решетки (угол установки, шаг решетки, тип профиля и т.д.), температуры потока, наличия или отсутствия системы охлаждения лопаток [3] и параметров охладителя. Влияние некоторых из перечисленных факторов на неоднородность потока было рассмотрено авторами ранее в других публикациях [4], [5]. Целью данной работы является изучение влияния на неоднородность потока одного из типов заградительного охлаждения - пленочного охлаждения сопловых лопаток.

Математическое моделирование процесса обтекания решетки профилей проводилось в программной среде STAR-CCM+v9.02.005., позволяющей решать прикладные задачи с высокой степенью точности.

Объектом исследований была решетка полых сопловых профилей С–9022А. Влияние предыдущей рабочей решетки не учитывалось.

- количество профилей в решетке – 5,
- хорда профиля – 45 мм,
- относительный шаг решетки – 0,6,
- рабочее тело – воздух.

Начальные параметры:

- температуры основного потока $t_0 = 500^\circ\text{C}$, 800°C , 1000°C
- полное давление 101325 Па
- скорость потока на входе в решетку $V_0 = 100$ м/с.
- давление окружающей среды – атмосферное (101325 Па),
- охлаждающая среда – воздух с параметрами:
 - температура $t_{\text{охл}} = 100^\circ\text{C}$,
 - давление 101425 Па,
 - скорость охладителя $V_{\text{охл}} = 100$ м/с

Теплофизические свойства воздуха выбирались программой из стандартной библиотеки, заложенной в нее, и пересчитывались программой в зависимости от конкретных условий в каждой ячейке расчетной сетки.

Математическая модель плоской сопловой решетки профилей показана на рис.1.

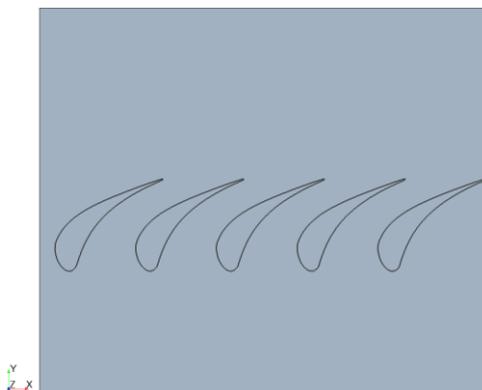


Рис. 1. Модель плоской сопловой решетки профилей С-9022А

Расчетная сетка модели содержала порядка 1,5 миллиона ячеек, причем ближе к выходным кромкам профилей, в области образования аэродинамических следов, сетка сгущалась (рис.2).

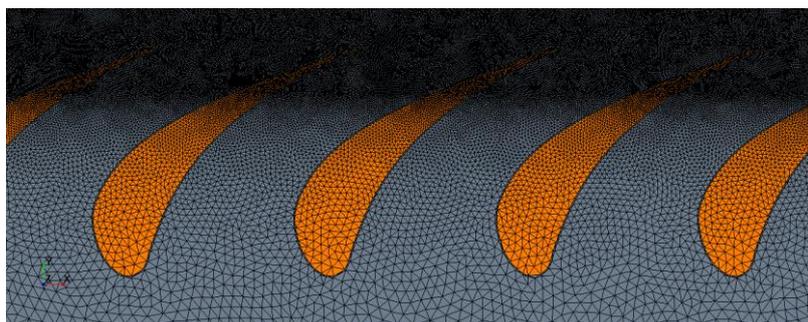


Рис.2. Расчетная сетка модели

Для численного измерения параметров за выходными кромками профилей было выбрано несколько линий замеров. Каждая линия располагается на определенном удалении от выходных кромок с шагом 0,5 мм (рис.3). Например, линия 1 касалась выходных кромок профилей, линия 5 находилась на расстоянии 2 мм, а линия 20 на расстоянии 9,5 мм от решетки, что позволило наиболее полно оценивать структуру аэродинамических следов на различных режимах работы и конструктивных вариантах решетки.

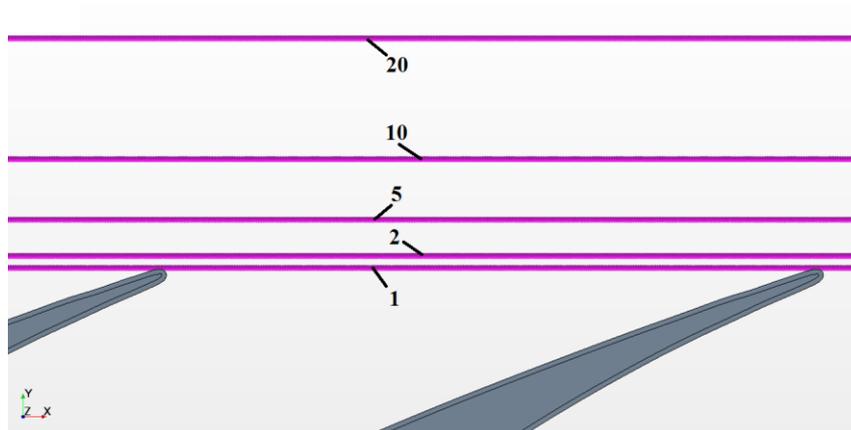


Рис. 3. Линии замера параметров потока в следах

Расчеты проводились для решетки с пленочным охлаждением и для сравнения решетки без охлаждения. На рис.4 представлена система подводящих охладитель каналов, которые представляют собой щели в профиле лопаток (рис.4).

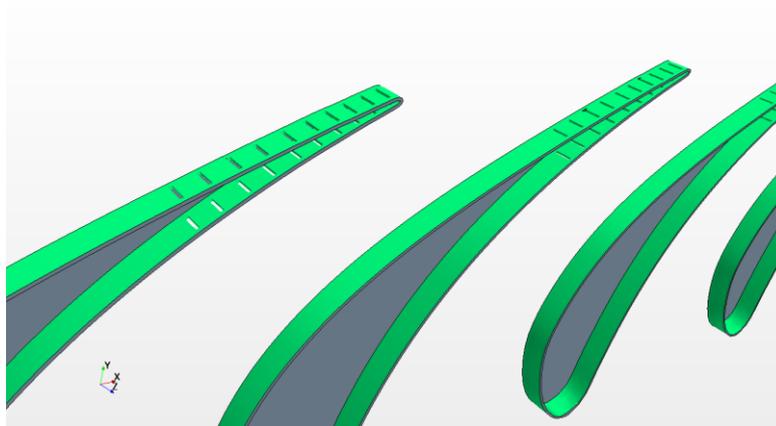


Рис. 4. Каналы для выхода охладителя

Охлаждение работает следующим образом. Охладитель подается в полость профиля и затем по щелям выходит в поток. При смешении охладителя с основным потоком образуется относительно холодная пленка вблизи поверхности профиля, что препятствует его перегреву.

Вначале, был проведен расчет без подачи охладителя через полые профили при температуре потока $t_0=500$ °С. Полученное поле скоростей потока, показано на рис.5.

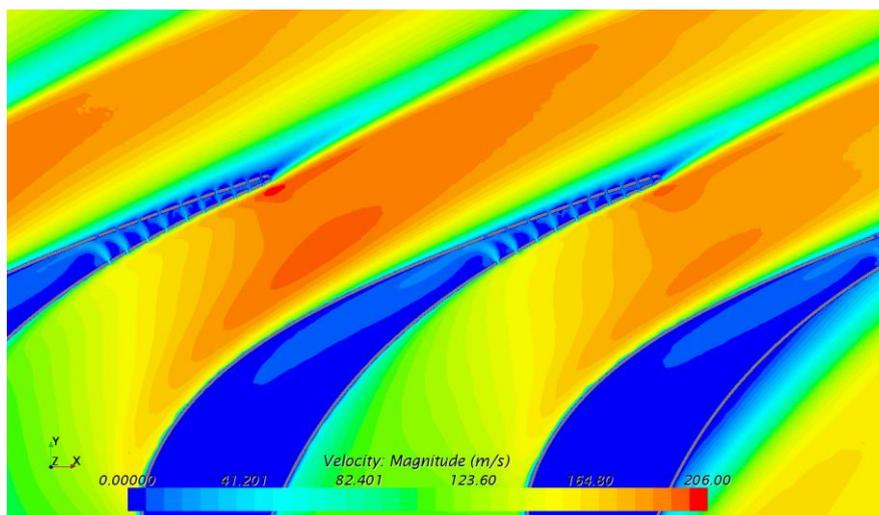


Рис. 5. Поле скоростей потока

Видно, как основной поток проникает в полости, и это означает, что размер ячеек расчетной сетки был выбран правильно. Далее с помощью двадцати линий замеров параметров были получены графики скоростей в аэродинамических следах на разном удалении от выходных кромок лопаток при наличии и отсутствии охлаждения. На Рис.6 показано сравнение графиков (по 5й линии замеров) при наличии и отсутствия охлаждения.

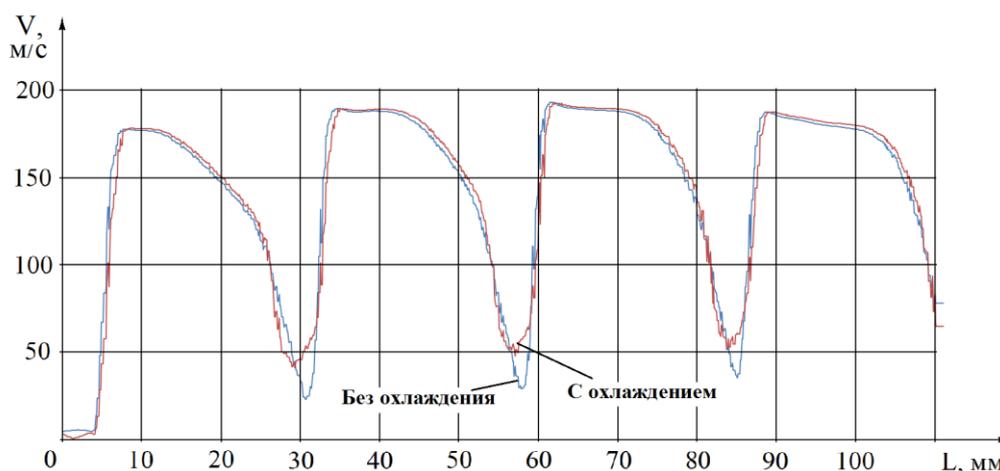


Рис. 6. Графики скоростей в аэродинамических следах с охлаждением профилей и без охлаждения

Аналогичные расчеты были проведены также при температурах основного потока $t=800^{\circ}\text{C}$, $t=1000^{\circ}\text{C}$. Картина принципиально не изменилась – при добавлении охлаждения «провал» скоростей за сопловыми профилями (неоднородность потока) уменьшается. Это объясняется тем, что при наличии охлаждения плотность пограничного слоя в пристеночной области увеличивается, силы трения растут и частицы слоя затормаживаются.

Список литературы

[1] Федоров В.А., Мильман О.О., Шифрин Б.А. Высокоэффективные технологии производства электроэнергии с использованием органического и водородного топлива. – М.: Изд—во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, с.116

[2] Быков Ю.А. Численное моделирование аэроупругости в решетке охлаждаемых лопаток // *Авиационно – космическая техника и технология*, 2010, №5 (72), с 59 – 63.

[3] Лапин Ю.Д., Поварнев М.В. Проблемы внутреннего охлаждения лопаток высокотемпературной паровой турбины: сборник статей «Разработка научных основ проектирования электростанций с высокотемпературными паровыми турбинами» - изд. МГТУ, 2009, с.300

[4] Сидоров А.А., Киселев С.В. Исследование влияния высокой температуры и конструкции лопаток на динамические напряжения. – Сборник трудов региональной научно-технической конференции «Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе», г. Калуга, 2011.

[5] Сидоров А.А., Киселев С.В. Влияние охлаждения сопловых лопаток высокотемпературной паровой турбины на неоднородность потока в кромочных следах за лопатками. – ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2011, сс.191-196.

Киселев Сергей Викторович - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SKV1985@yandex.ru

Сидоров Альберт Александрович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sidpol1@rambler.ru

Е.Г. Липихин, Д.В. Шевелев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ТРУБНОГО ПУЧКА НА ПАРАМЕТРЫ ГАЗО–ВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА МИКРО ТЭЦ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. В предыдущих работах была рассмотрена микро ТЭЦ с газовой микротурбиной измененной очередности процессов, [1]. Одним из основных элементов микро ТЭЦ является газо-водяной теплообменный аппарат (ТА). Этот компонент тепловой схемы используется для передачи тепловой энергии от продуктов сгорания сетевой воде системы отопления. К ТА микро ТЭЦ предъявляются следующие требования, [2]:

- Аппарат должен обеспечивать передачу требуемого количества тепла от горячего теплоносителя к холодному с получением необходимых конечных температур;
- Во всем диапазоне работы микро ТЭЦ должен быть работоспособным и надежным;
- Аппарат должен быть стабильным в работе при изменении в процессе теплообмена свойств теплоносителей;
- Поверхность теплообмена должна быть удобной в обслуживании (чистке, ремонте);
- Аппарат должен обладать достаточным запасом прочности;
- При заданной тепловой нагрузке должен иметь возможно меньшие габариты;
- Поверхность теплообмена должна быть технологичной и недорогой в производстве.

Исходя из выше сказанного, следует, что выбор наиболее эффективной поверхности теплообменника — один из принципиальных вопросов, требующих разрешения при проектировании.

Для ТА, используемого в схеме микро ТЭЦ с газовой микротурбиной измененной очередности процессов было проведено исследование влияния конфигурации поверхности теплообмена на массогабаритные показатели теплообменного аппарата энергетической установки.

Для вариантных расчетов был выбран тип поверхности теплообмена — оребренные трубы с круглыми ребрами. Указанный тип поверхности теплообмена в достаточной мере удовлетворяет указанным выше требованиям к поверхностям теплообмена, является наиболее распространенным.

Расчеты были проведены для нескольких типов поверхностей из труб с поперечными круглыми ребрами (Таблица 1), [3].

Таблица 1. Геометрические характеристики элементов поверхности из труб с поперечными круглыми ребрами

Геометрические характеристики	ККР-3	ККР-6	ККР-9
Наружный диаметр трубы, d_H , мм	10,67	16,38	19,66
Диаметр оребрения, D , мм	21,87	28,48	37,16
Высота ребра h , мм	5,6	6,05	8,75
Толщина ребра δ_p , мм	0,483	0,254	0,305
Поперечный шаг t_1 , мм	24,8	31,3	69,5
Продольный шаг t_2 , мм	20,4	34,3	44,5
Коэффициент компактности $f, \text{м}^2/\text{м}^3$	447	324	279
Отношение площадей живого сечения и фронта $\eta_{\text{суж}}$	0,494	0,443	0,572
Отношение площади поверхности ребер и полной оребренной поверхности F_p / F_{pc}	0,856	0,862	0,835
Отношение площадей полной поверхности к поверхности, несущей оребрение	7,08	6,76	10,1

Геометрия трубного пучка показана на Рис. 1:

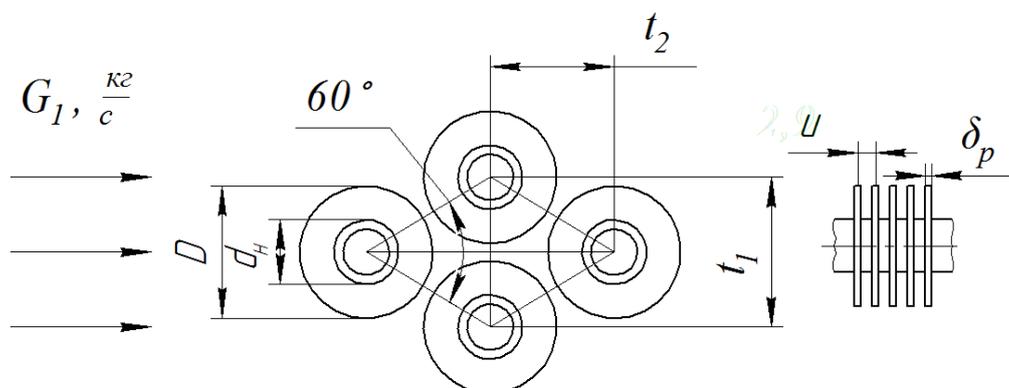


Рис. 1. Геометрия трубного пучка

Исходные данные для расчета определены из термодинамического расчета цикла когенерационной установки, при работе микро ТЭЦ на традиционную систему отопления [1]:

Температура газа на входе/выходе теплообменника $t'_1=536^\circ\text{C}$, $t''_1=70^\circ\text{C}$. Температура воды на входе/выходе теплообменника $t'_2=60^\circ\text{C}$, $t''_2=80^\circ\text{C}$.

Расход газа $G_1=0,186$ кг/с и воды $G_2=1,263$ кг/с соответственно. Давление газа $p_1=58410$ Па. Давление воды в трубах: $p_2=3$ МПа. Материал трубок и ребер – углеродистая сталь теплопроводностью $\lambda_{cm}=50$ Вт/(м·К).

Движение теплоносителей – перекрестный ток. Газ поперечно омывает трубы, вода движется внутри труб.

Для представленных типов оребренных труб проведен расчет теплообменника по методике [4]. Расчет выполнен из условия получения оптимального соотношения глубины пучка, ширины аппарата и длины трубок $H \times B \times L$. Теплофизические параметры теплоносителей были определены по их средним температурам. Для газа свойства были определены как для сухого воздуха, так как коэффициент избытка воздуха за турбиной микро ТЭЦ достаточно велик – $\alpha=4,2$. За определяющий размер взят наружный диаметр трубок d_n .

Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов для различных вариантов оребренных труб

тип трубок	стороны аппарата $H \times B \times L$, мм	число трубок N	площадь поверхности A , м ²	объем пучка V , м ³	сопротивление пучка $\Delta P_{пуч.}$ Па
ККР-3	408 × 347 × 347	266	21,34	0,049	190
ККР-6	596 × 434 × 438	308	35,88	0,113	130
ККР-9	698 × 634 × 655	208	80,13	0,290	21

На Рис. 2 представлено сравнение габаритов, полученных в ходе расчета вариантов ТА при использовании различных вариантов оребренных труб:

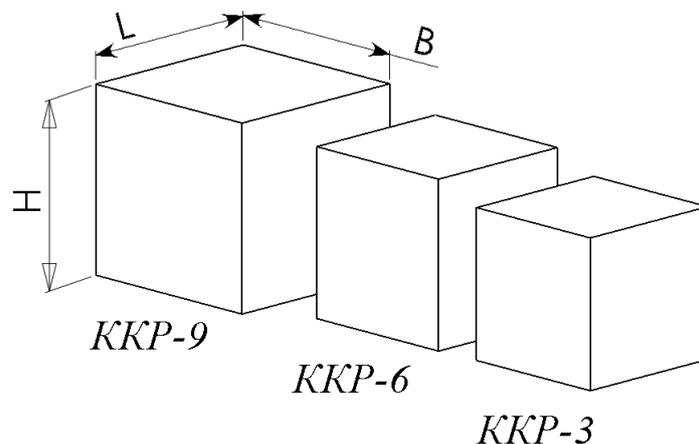


Рис. 2. Соотношение габаритов газовой теплообменника при использовании различных вариантов оребренных труб

Полученные данные свидетельствуют о том, что при переходе от трубок ККР-3 к ККР-9 габариты теплообменника увеличиваются за счет роста глубины пучка H , площадь поверхности увеличивается в 3,8 раза, а сопротивление по газовой стороне снижается в 9 раз.

Выводы. По результатам расчета сделан выбор в пользу поверхности из труб ККР-3 так как при этом достигаются минимальные габариты из трех вариантов, а величина сопротивления пучка $\Delta P_{пуч}=190$ Па не превышает установленного в ходе теплового расчета цикла когенерационной установки значения суммарного сопротивления $\Delta P_{ТА}=594$ Па ($\sigma_{ТА}=1\%$) - с учетом сопротивления в диффузорном и конфузорном патрубках ТА.

Список литературы:

[1] *Липихин Е.Г., Шевелев Д.В.* Микро-ТЭЦ с микротурбиной измененной очередности процессов. Научно-практическая конференция «Энергетика, Экология, Энергосбережение», 16-18 мая 2016. Тезисы докладов. – Калуга, с. 133-136.

[2] *Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р.* Пластинчатые и спиральные теплообменники. М., «Машиностроение», 1973, 288 с.

[3] *Лондон А.Л., Кейс В.М.* Компактные теплообменники. М.: Энергия, 1967.

[4] *Берман С.С.* Расчет теплообменных аппаратов. М., Госэнергоиздат, 1962 г. -240 с.

[5] *Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И.* Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов. Под ред. Леонтьева А.И. -2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, -529 с.

[6] *Иванов В.Л.* Методы расчета теплообменных аппаратов газотурбинных установок: Учебное пособие по курсу «Теплообменные аппараты ГТУ». Под ред. Леонтьева А.И. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1989, -22 с.

[7] *Грязнов Н.Д., Епифанов В.М., Иванов В.Л., Манушин Э.А.* Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок: Уч. пособие для ВУЗов. –М.: Машиностроение, 1985. -360 с.

[8] *Григорьев В.Г.* Расчет теплообменных аппаратов газотурбинных установок. Методические рекомендации к курсовому и дипломному проектированию. М. изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001 г. -60 с.

Липихин Евгений Геннадьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Evgeny.Lipihin@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

П.М. Сидоров, П.М. Сидоров, Д.В. Шевелев

К РАСЧЕТУ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НАРУЖНЫХ ОГРАНИЧИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Теплоизоляцией называются элементы конструкции, уменьшающие интенсивность процесса теплопередачи и выполняющие роль основного термического сопротивления. Например, в структуре кирпичной стены жилого здания роль теплоизоляции выполняет воздушная прослойка или слой керамзита. Стена металлического ангара может быть теплоизолирована слоем минеральной ваты, пенопласта и т.п. Большинство эксплуатирующихся зданий и сооружений в климатических условиях Российской Федерации имеют тот или иной вид теплоизоляции. Однако, рост цен на энергоносители (электричество, газ, централизованное теплоснабжение) делает актуальной задачу повышения энергоэффективности существующих зданий и сооружений. Это возможно осуществить нанесением на наружные поверхности дополнительной теплоизоляции – базальтовых плит, экструдированного пенополистирола, жидкого пенополиуретана.

Выбор вида теплоизоляции и ее необходимого количества требует проведения теплотехнического расчета. Исходными данными для расчета являются:

- структура ограждающих конструкций (толщина δ_i , мм и теплопроводность материала λ_i , Вт/(м·К) слоев);
- общая площадь наружных поверхностей ограждающих конструкций (без учета оконных и дверных проемов), F , м²;
- температура воздуха внутри помещения $t_{вн}$, °С;
- температура атмосферного воздуха $t_{нар}$, °С;
- желаемая величина снижения теплопотерь через ограждающие конструкции, Δ %;
- свойства теплоизоляционного материала (теплопроводность $\lambda_{из}$ Дж/(м·К), плотность $\rho_{из}$, кг/м³).

Для практических расчетов рекомендуется внести следующие допущения:

1. Стены зданий и сооружений в продольном направлении принимаются однородными.

2. Температура наружного воздуха $t_{нар}$ принимается равной температуре воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 [1];

3. Температура воздуха внутри жилых помещений $t_{вн}$ определяются по [2], внутри производственных помещения по [3].

4. Коэффициенты теплоотдачи от наружных $\alpha_{нар}$ и внутренних $\alpha_{вн}$ поверхностей ограждающих конструкций принимается в виде фиксированного значения по [3].

Методика расчета

1. Определяются потери тепла через наружные ограждающие конструкции для исходного варианта (без теплоизоляции).

1.1 Внутреннее термическое сопротивление ограждающих конструкций

$$R_{ст} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$$

1.2 Внешние термические сопротивления ограждающих конструкций

$$R_{нар} = \frac{1}{\alpha_{нар}}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт} - \text{внешнее термическое сопротивление наруж-}$$

ной поверхности ограждающих конструкций;

$$R_{вн} = \frac{1}{\alpha_{вн}}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт} - \text{внешнее термическое сопротивление внутрен-$$

ней поверхности ограждающих конструкций;

1.3 Общее термическое сопротивление ограждающих конструкций

$$R' = R_{нар} + R_{ст} + R_{вн}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$$

1.4 Поверхностная плотность теплового потока через ограждающие конструкции

$$q' = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{R'}, \text{Вт}/\text{м}^2$$

1.5 Температура наружной поверхности здания

$$t_{ст\ нар} = \frac{q' + \alpha_{нар} t_{нар}}{\alpha_{нар}}, \text{°C}$$

1.6 Потери тепла через ограждающие конструкции

$$Q' = q' \cdot F, \text{Вт}$$

2. Определяются потери тепла после мероприятий по увеличению энергоэффективности

$$Q'' = Q' \left(1 - \frac{\Delta}{100} \right), \text{Вт}$$

3. Определяется плотность теплового потока через ограждающие конструкции после мероприятий по увеличению энергоэффективности

$$q'' = \frac{Q''}{F}, \text{Вт}/\text{м}^2$$

4. Определяется требуемая величина термического сопротивления ограждающих конструкций после мероприятий по увеличению энергоэффективности

$$R'' = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{q''}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$$

5. Требуемое термическое сопротивление слоя дополнительной теплоизоляции

$$\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} = R' - R'', (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$$

6. Требуемая величина слоя теплоизоляции

$$\delta_{из} = \lambda_{из} (R' - R'') \cdot 1 \cdot 10^3, \text{ мм}$$

7. Определяется температура наружной поверхности здания после мероприятий по увеличению энергоэффективности

$$t_{ст\ нар} = \frac{q'' + \alpha_{нар} t_{нар}}{\alpha_{нар}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

8. Объем требуемого количества теплоизоляционного материала

$$V = F \cdot \frac{\delta_{из}}{1 \cdot 10^3}, \text{ м}^3$$

9. Масса требуемого количества теплоизоляционного материала
 $m_{из} = V_{из} \cdot \rho_{из}, \text{ кг}$

Предложенная методика отличается простотой, достаточной для инженерных расчетов точностью и может быть рекомендована для практического применения организациями, занимающимися продажей и нанесением теплоизоляционных материалов.

Список литературы

[1] Строительные нормы и правила: СНиП 23-01-99. Строительная климатология. В ред. Изменения №1, принятого Постановления Госстроя РФ от 24.12.2002 №164: нормативно-технический материал. – М.: [б.и.], 2002. – 77 с.

[2] ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

[3] Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

[4] Строительные нормы и правила: СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий: нормативно-технический материал. – М.: Госстрой России, 2004. – 31 с.

Сидоров Петр Михайлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPM@yandex.ru

Сидоров Павел Михайлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPawel95@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

А.Ф. Заричный, В.Ю. Ильичев

МЕТОД РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ РОТОРОВ, СОЕДИНЕННЫХ РЕЗИНОПАЛЬЦЕВЫМИ МУФТАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

При создании роторных систем в турбоагрегатах применяются соединительные муфты, использование которых не должно приводить к превышению нормативного уровня вибрации. Наиболее подходящими являются подвижные муфты, потому что они допускают некоторое смещение валов в осевом и радиальном направлениях относительно друг друга. Выделяют четыре типа подвижных муфт [1]:

1. Упругие муфты – компенсация расцентровок и обеспечение относительных смещений валов осуществляется только за счет упругих деформаций элементов соединительной муфты (например, дисковые муфты);

2. Муфты со скольжением – компенсация расцентровок и обеспечение относительных смещений валов осуществляется за счет относительного скольжения элементов муфты (шлицевые, зубчатые);

3. Смешанные конструкции муфт – компенсация расцентровок осей и обеспечение относительных смещений валов осуществляется как за счет упругих деформаций элементов муфты, так и за счет относительного скольжения (шлицевые муфты с промежуточным валом, муфты с плоскими пружинами);

4. Резинопальцевые муфты – компенсация расцентровок и обеспечение относительных смещений валов осуществляется за счет деформации резиновых элементов, обладающих специфическими свойствами. Они применяются в турбоагрегатах небольшой мощности, широко используются в паротурбинных установках в конструкциях конденсатных, циркуляционных и питательных турбо- и электронасосов.

Одной из причин появления вибрации турбоагрегата является взаимное смещение концов соединяемых валов (полумуфт) – расцентровка Δ , что приводит к появлению переменных сил и моментов. Так как уровень вибрации роторной системы является одним из основных показателей, характеризующим надежность турбоустановки, прогнозирование вибрационного состояния при наличии расцентровки соединяемых валов, несомненно, является важной задачей.

Целью данной работы является описание разработанной авторами методики расчета колебаний роторов, соединенных резинопальцевыми муфтами при расцентровке осей соединяемых валов.

В качестве исходных данных используются следующие величины, определяемые конструктивно и экспериментально:

– радиальная расцентровка соединяемых роторов Δ ;

- геометрические размеры элементов роторов;
- модули упругости материалов роторов E ;
- массы элементов роторов;
- число пальцев муфты z , радиус расположения пальцев R , число поясков на резиновых втулках n , длина резиновой втулки l (рис. 1);

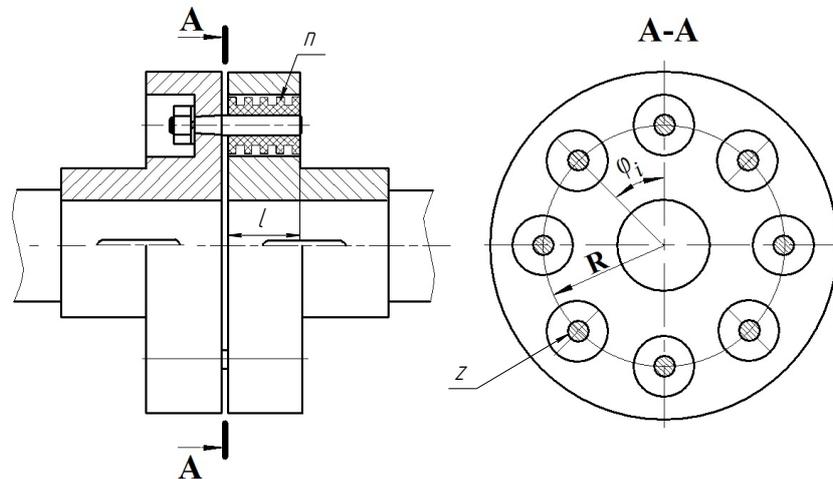


Рис. 1. Муфта резинопальцевая

- статические и динамические жесткости втулок муфты в окружном, радиальном и осевом направлениях $C_{uc}, C_{rc}, C_{oct}, C_{ud}, C_{rd}, C_{od}$;
- коэффициенты демпфирования втулок муфты в окружном, радиальном и осевом направлениях μ_u, μ_r, μ_o .

Авторами разработан следующий порядок расчета деформаций и колебаний валов в месте расположения муфты, а также определения постоянных и переменных составляющих сил и моментов, вызванных расцентровкой. Величина переменных составляющих зависит от угловой скорости вращения роторной системы ω .

1. Определяются следующие характеристики соединяемых роторов при приложении к концу вала единичной силы и момента:

δ_P – смещение конца вала от единичного вектора силы;

θ_P – угол между направлением единичного вектора силы и смещением от него;

δ_M – смещение конца вала от единичного момента;

θ_M – угол между плоскостью действия единичного момента и смещением от него;

Φ_P – поворот плоскости полумуфты от единичного вектора силы;

$\theta_{P\beta}$ – угол между направлением поворота плоскости полумуфты и единичным вектором силы, вызывающим этот поворот;

Φ_M – поворот плоскости полумуфты от единичного момента;

$\theta_{M\beta}$ – угол между направлением поворота плоскости полумуфты и плоскостью действия единичного момента, вызывающего этот поворот.

Эти податливости должны вычисляться с учетом податливостей опор и свойств масляной пленки в подшипниках. Их расчет возможен с помощью точных формул сопромата (для простейших роторных систем), а также с помощью систем трехмерного моделирования, использующих метод конечных элементов [2]. На многих предприятиях имеются собственные методики.

Схема деформации расцентрованной роторной системы при вращении показана на рисунке 2.

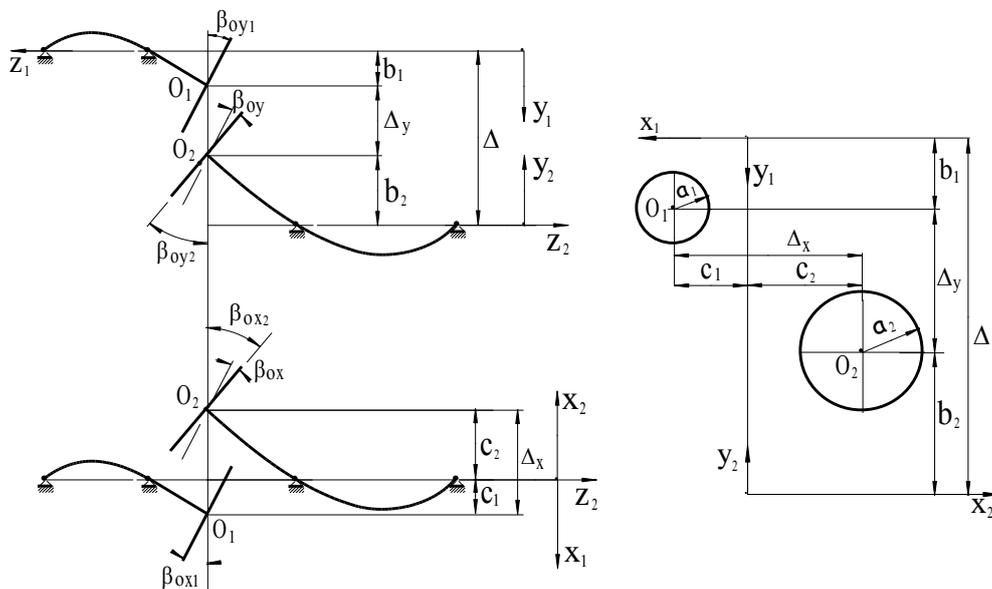


Рис. 2. Деформации расцентрованной роторной системы

2. Вычисляются значения коэффициентов A , B , C , D :

$$A = \frac{z}{2} (c_{u\partial} + c_{r\partial}); \quad (1)$$

$$B = \frac{z}{2} \omega (\mu_u + \mu_r); \quad (2)$$

$$C = \frac{R^2 z}{2} c_{o\partial} + \frac{l^2 z}{24} \left(\frac{1+n}{n-1} \right) (c_{u\partial} + c_{r\partial}); \quad (3)$$

$$D = \frac{R^2 z}{2} \omega \mu_o + \frac{l^2 z}{24} \left(\frac{1+n}{n-1} \right) \omega (\mu_u + \mu_r). \quad (4)$$

3. Заполняется матрица 1 [3].

Таблица 1. Заполнение матрицы 1

c_1	c_2	b_1	b_2	β_{ox1}	β_{ox2}	β_{oy1}	β_{oy2}	Сво- бодные члены
$1+\delta_{01PA}$	δ_{01PA}	δ_{01PB}	δ_{01PB}	$-\delta_{01MC}$	δ_{01MC}	δ_{01MD}	$-\delta_{01MD}$	$\Delta\delta_{01PB}$
δ_{02PA}	$1+\delta_{02PA}$	δ_{02PB}	δ_{02PB}	δ_{02MC}	$-\delta_{02MC}$	$-\delta_{02MD}$	δ_{02MD}	$\Delta\delta_{02PB}$
$-\delta_{01PB}$	$-\delta_{01PB}$	$1+\delta_{01PA}$	δ_{01PA}	δ_{01MD}	$-\delta_{01MD}$	δ_{01MC}	$-\delta_{01MC}$	$\Delta\delta_{01PA}$
$-\delta_{02PB}$	$-\delta_{02PB}$	δ_{02PA}	$1+\delta_{02PA}$	$-\delta_{02MD}$	δ_{02MD}	$-\delta_{02MC}$	δ_{02MC}	$\Delta\delta_{02PA}$
φ_{01PA}	φ_{01PA}	φ_{01PB}	φ_{01PB}	$\varphi_{01MC}-1$	φ_{01MC}	φ_{01MD}	$-\varphi_{01MD}$	$\Delta\varphi_{01PB}$
φ_{02PA}	φ_{02PA}	φ_{02PB}	φ_{02PB}	φ_{02MC}	$\varphi_{02MC}-1$	$-\varphi_{02MD}$	φ_{02MD}	$\Delta\varphi_{02PB}$
$-\varphi_{01PB}$	$-\varphi_{01PB}$	φ_{01PA}	φ_{01PA}	φ_{01MD}	$-\varphi_{01MD}$	$1+\varphi_{01MC}$	$-\varphi_{01MC}$	$\Delta\varphi_{01PA}$
$-\varphi_{02PB}$	$-\varphi_{02PB}$	φ_{02PA}	φ_{02PA}	$-\varphi_{02MD}$	φ_{02MD}	$-\varphi_{02MC}$	$1+\varphi_{02MC}$	$\Delta\varphi_{02PA}$

где δ_{0iP} – деформация конца первого/второго вала в месте расположения муфты под действием единичной силы, приложенной в направлении расцентровки (при отсутствии вращения валов);

δ_{0iM} – деформация первого/второго вала в месте расположения муфты под действием единичного момента (при отсутствии вращения валов);

φ_{0iP} – угол поворота конца первого/второго вала под действием единичной силы (при отсутствии вращения валов);

φ_{0iM} – угол поворота конца первого/второго вала под действием единичного момента (при отсутствии вращения валов).

Эти деформации и углы поворота найдены в пункте 1.

4. Решая матрицу, отыскиваем значения $c_1, c_2, b_1, b_2, \beta_{ox1}, \beta_{ox2}, \beta_{oy1}, \beta_{oy2}$, где b_1, c_1 и b_2, c_2 – уровни постоянных смещений центров полумуфт в вертикальной и горизонтальной плоскостях, β_{oy1}, β_{oy2} и β_{ox1}, β_{ox2} – постоянные угловые положения полумуфт в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 2).

5. Определяются постоянные составляющие сил и моментов, действующих на концы валов при расцентровке [3]:

$$P_{xc} = -\frac{z}{2}(c_1 + c_2)(c_{u0} + c_{r0}) + \frac{z}{2}(\Delta - b_1 - b_2)\omega(\mu_u + \mu_r); \quad (5)$$

$$P_{yc} = \frac{z}{2}(\Delta - b_1 - b_2)(c_{u0} + c_{r0}) + \frac{z}{2}(c_1 + c_2)\omega(\mu_u + \mu_r); \quad (6)$$

$$M_{xzc} = \frac{R^2 z}{2} [(\beta_{oy2} - \beta_{oy1})\omega\mu_o - (\beta_{ox2} - \beta_{ox1})c_{o0}] +$$

$$+ \frac{l^2 z}{24} \left(\frac{1+n}{n-1} \right) \left[-(\beta_{ox2} - \beta_{ox1})(c_{u\partial} + c_{r\partial}) + (\beta_{oy2} - \beta_{oy1}) \omega (\mu_u + \mu_r) \right]; \quad (7)$$

$$M_{yzc} = -\frac{R^2 z}{2} \left[(\beta_{ox2} - \beta_{ox1}) \omega \mu_o + (\beta_{oy2} - \beta_{oy1}) c_{o\partial} \right] + \frac{l^2 z}{24} \left(\frac{1+n}{n-1} \right) \left[-(\beta_{oy2} - \beta_{oy1})(c_{u\partial} + c_{r\partial}) - (\beta_{ox2} - \beta_{ox1}) \omega (\mu_u + \mu_r) \right]. \quad (8)$$

где ω – угловая скорость.

Для вычисления переменных сил и моментов необходимо знать переменные смещения и углы поворота полумуфт, а также их фазовые углы: $a_1, a_2, \beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_{1\beta}, \alpha_{2\beta}$. Методика определения этих величин изложена в литературном источнике [3].

6. Определяются среднеквадратичные статические и динамические силы и моменты, действующие на концы валов, а также перемещения и углы поворота концов валов под действием этих сил и моментов [3]:

$$P_c = \sqrt{P_{xc}^2 + P_{yc}^2}; \quad (9)$$

$$M_c = \sqrt{M_{xc}^2 + M_{yc}^2}; \quad (10)$$

$$P_\partial = \sqrt{P_{x\partial}^2 + P_{y\partial}^2}; \quad (11)$$

$$M_\partial = \sqrt{M_{x\partial}^2 + M_{y\partial}^2}; \quad (12)$$

$$\delta_{iP} = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}; \quad (13)$$

$$\varphi_{iP} = \sqrt{C_i^2 + D_i^2}; \quad (14)$$

$$\theta_{iP} = \arctg \left(\frac{B_i}{A_i} \right); \quad (15)$$

$$\theta_{iP\beta} = \arctg \left(\frac{D_i}{C_i} \right). \quad (16)$$

Следует отметить, что эти силовые и деформационные факторы зависят от частоты вращения соединяемых роторов.

Таким образом, следуя вышеприведенной методике, для любой роторной системы после решения вышеприведенных уравнений и матриц возможно привести частотные зависимости силовых и деформационных факторов, действующих на концы валов при расцентровке. Это позволит прогнозировать вибрационное состояние роторной системы при заданной частоте вращения и выработать меры для снижения уровня вибраций.

Список литературы

[1] Диментберг Ф.М., Колесников К.С. Вибрации в технике. Т. 3: *Колебания машин, конструкций и их элементов*. Москва, Машиностроение, 1980, 544 с.

[2] Заляев Р.Р. *Повышение вибрационной надежности двухконсольных роторов турбомашин*. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Казань, 2007, 170 с.

[3] Ильичев В.Ю. *Исследование влияния конструкции соединительных муфт на динамику роторных систем турбоагрегатов*. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Калуга, 2003, 164 с.

Заричный Александр Федорович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sefank790@ya.ru

Ильичев Владимир Юрьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

А.И. Сафонов, Д.В. Шевелев, Е.Г. Липихин

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ РЫНКА КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одним из приоритетных направлений инновационного развития РФ является практическая реализация технологической платформы «Малая распределенная энергетика», учрежденная протоколом Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям [1]. Она предполагает создание локальных энергосистем, состоящих из большого числа когенерационных установок (микро-ТЭЦ) вырабатывающих тепловую и электрическую энергию для нужд обособленных потребителей.

В настоящее время на рынке микро-ТЭЦ в РФ широко представлены установки зарубежного производства. Однако, климатические условия России, в большинстве ее регионов, значительно суровее чем в Западной Европе и густонаселенных районах Северной Америки. Это значит, что микро-ТЭЦ, первоначально спроектированные для условий европейского климата, могут не покрыть потребности российских потребителей в тепловой энергии. В связи с этим, необходимо сформулировать требования к микро-ТЭЦ, эксплуатируемых в РФ.

Нормируемые климатические параметры, необходимые для расчета потребляемой тепловой энергии, за отопительный период, на примере двухэтажного индивидуального жилого дома приведены в таблице 1 [2,3]. Данные указаны для трех федеральных округов РФ, где ЦФО – Центральный федеральный округ, УФО – Уральский федеральный округ, СФО – Сибирский федеральный округ.

Таблица 1. Нормируемые климатические параметры необходимые для расчета потребляемой тепловой энергии

Климатический параметр	ЦФО	УФО	СФО
Продолжительность отопительного периода, сут.	210	230	240
Средняя температура воздуха отопительного периода, °С	-2,9	-6	-8,5
Нормируемый удельный расход тепловой энергии на 1 кв. м отапливаемой площади, ГДж/м ²	0,550	0,628	0,744

В таблице 2 представлены средние показатели тепловой мощности, необходимой для отопления жилого дома различной площади и этажности в ЦФО рассчитанные согласно [3].

Таблица 2. Тепловая мощность ($N_{\text{тепл}}$, кВт) для отопления жилого дома

Отапливаемая площадь жилого дома, м ²	Количество этажей		
	1	2	3
60 и менее	15	–	–
100	20	20	–
150	25	25	30
250	35	35	40
400	–	50	50
600	–	65	70
1000 и более	–	95	100

Ориентируясь на наиболее востребованную площадь жилого дома в 250...300 м², можно сделать вывод, что для ЦФО оптимальной будет тепловая мощность микро-ТЭЦ в 40...50 кВт, для УФО 45...55 кВт и для СФО 55...70 кВт.

Что касается потребной электрической мощности микро-ТЭЦ, анализ статистических данных показывает, что потребление электроэнергии среднестатистическим домохозяйством в России и за рубежом приблизительно одинаково и составляет величину порядка 3 – 5 кВт.

Ориентируясь на представленные данные, можно сделать вывод, что для эксплуатации в условиях РФ, оптимальными параметрами микро-ТЭЦ, для тепло- и электроснабжения среднестатистического домохозяйства, являются 3 кВт электрической мощности и 40 – 70 кВт тепловой мощности.

В настоящее время, на рынке присутствуют коммерческие модели микро-ТЭЦ различных типов – на базе поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), двигателей Стирлинга, газовых и паровых микротурбин. Перспективными считаются микро-ТЭЦ на топливных элементах и двигателях термоакустического типа.

Наиболее широко на рынке представлены микро-ТЭЦ на основе поршневых ДВС. Это обусловлено их высокой эффективностью выработки электроэнергии, относительно низкой ценой и простотой обслуживания. Характеристики микро – ТЭЦ на основе газопоршневых ДВС представлены в табл. 3, [4,5,6].

Таблица 3. Характеристики микро – ТЭЦ на базе газопоршневых ДВС

Производитель	Модель	Электрическая мощность ($N_{\text{эл}}$), кВт	Тепловая мощность ($N_{\text{тепл}}$), кВт	Электрический КПД, %	Тепловой КПД, %	$N_{\text{тепл}}/N_{\text{эл}}$
Vaillant	Ecopower	1,3 – 4,7	4 – 12,5	96 (общий КПД)		2,7 – 3,1
Viessmann	Vitobloc EM – 18/36 DN – 20eco	18	36	32,1	55,9	2
SenerTec	Badger Pro 20	19,2	до 42	–	–	до 2,2

Микро-ТЭЦ с двигателем Стирлинга, отличаются от своих ближайших конкурентов – поршневых ДВС, простотой конструкции, малым уровнем шума и вибраций, возможностью работать на твердом топливе. Характеристики микро – ТЭЦ на базе двигателей Стирлинга представлены в таблице 4, [4,7,8].

Таблица 4. Характеристики микро-ТЭЦ с двигателем Стирлинга

Производитель	Модель	Электрическая мощность ($N_{эл}$), кВт	Тепловая мощность ($N_{тепл}$), кВт	Электрический КПД, %	Тепловой КПД, %	$N_{тепл}/N_{эл}$
Viessmann	Vitotwin 300-W	1	6	15	81	6
Navien	Navien Hybrigen SE	1	30	97,4 (общий КПД)		30
Qnergy	QB80	3 – 6,5	14 – 36,4	–	–	4,7 – 5,6

Хотя газовые турбины нашли основное применение в составе энергетических установок средних и больших мощностей, на рынке присутствуют микро-ТЭЦ на базе газовых микротурбин. Характеристики таких установок представлены в таблице 5, [9, 10].

Таблица 5. Характеристики микро-ТЭЦ на базе газовых микротурбин

Производитель	Модель	Электрическая мощность ($N_{эл}$), кВт	Тепловая мощность ($N_{тепл}$), кВт	Электрический КПД, %	Тепловой КПД, %	$N_{тепл}/N_{эл}$
MTT	EnerTwin	1 – 3	6 – 15	15	–	5 – 6
Capstone	C 15	15	30	23	–	2

Возможно создание микро-ТЭЦ на базе паровых микротурбин. НПП «Донские технологии» (Россия) разработало микро-ТЭЦ с вертикальной влажно-паровой микротурбиной двух типоразмеров (таблица 6), [11,12].

Таблица 6. Характеристики микро-ТЭЦ с вертикальной влажнопаровой микротурбиной

Характеристика	МЭК-5	МЭК-30
Электрическая мощность ($N_{эл}$), кВт	5	30
Тепловая мощность ($N_{тепл}$), кВт	70	400
Диаметр рабочего колеса, мм	163	163
Расход рабочего тела, кг/с	0,028	0,14
Электрический КПД, %	–	не менее 22
Коэффициент использования первичного топлива, %	80	80
$N_{тепл}/N_{эл}$	14	13,3

На рынке коммерческих когенерационных установок присутствуют представители нетрадиционной энергетики – микро-ТЭЦ на базе топливных элементов. Для них характерно отсутствие движущихся частей, высокий уровень электрического КПД, низкий уровень выбросов вредных веществ. Параметры микро-ТЭЦ на топливных элементах представлены в таблице 7, [4, 13].

Таблица 7. Характеристики микро-ТЭЦ на базе топливных элементов

Производитель	Модель	Электрическая мощность ($N_{эл}$), кВт	Тепловая мощность ($N_{тепл}$), кВт	Электрический КПД, %	Тепловой КПД, %	$N_{тепл}/N_{эл}$
Baxi Innotech	GAMMA 1.0	1	1,7	32	–	1,7
Viessman	Vitovvalor 300-P	0,750	1	37	49,3	1,33

Представителем нетрадиционной энергетики так же являются микро-ТЭЦ термоакустического типа. В конце декабря 2013 года компания Nirvana Energy System (США) объявила о создании принципиально нового типа микро-ТЭЦ которая способна с помощью звуковых колебаний превращать тепловую энергию в электричество. Она генерирует от 1 до 4 кВт электрической энергии и от 15 до 30 кВт тепловой энергии при общем КПД системы выше 90 % [14]. Канадская компания Etalim произвела аналогичную разработку термоакустического генератора КПД которого составляет 40 % при рабочей температуре газа 700°C [15]. Главная идея этих

двигателей состоит в том, что организованные процессы подвода и отвода тепла к рабочему телу заставляют его сжиматься или расширяться, вызывая, тем самым, колебания среды. Связанная с валом упругая металлическая диафрагма улавливает колебания среды и приводит его в движение, который, вращаясь, вырабатывает энергию на генераторе.

Большой выбор типов микро – ТЭЦ на рынке обусловлен их достоинствами и недостатками. Поршневые ДВС при своей дешевизне и высокой электрической эффективности имеют малую тепловую мощность, требуют применения масла в цилиндрах и содержат в своем составе большое количество трущихся элементов, что приводит к их малому ресурсу. Двигатели Стирлинга массивные, материалоемкие и работают под высоким давлением рабочего тела. Установки с топливными элементами и микро-ТЭЦ термоакустического типа имеют высокие показатели электрической эффективности и обладают малым количеством вредных выбросов, однако имеют сравнительно малую тепловую мощность, малый ресурс работы, высокую стоимость и неотработанную конструкцию.

Для климатических условий РФ, большинство из перечисленных типов микро-ТЭЦ непригодны для применения в среднестатистическом индивидуальном домохозяйстве. Наиболее полно удовлетворяют поставленным требованиям микро-ТЭЦ на базе газовых микротурбин. Газовые микротурбины имеют средние показатели эффективности среди микро – ТЭЦ по электрическому КПД цикла, но работа при высоких температурах рабочего тела обуславливает высокие показатели тепловой мощности, что позволяет им занимать свою нишу на рынке. К недостаткам микро-ТЭЦ на базе микротурбин следует отнести их высокую стоимость и необходимость применения дожимающих компрессоров топливного газа. Этих недостатков лишена микро – ТЭЦ на базе газовой микротурбины измененной очередности процессов предложенная в [16].

Выводы. Представленные на рынке микро-ТЭЦ достаточно разнообразны, но все же ни один из представленных коммерческих проектов не удовлетворяет требованиям обеспечения тепловой энергией автономных индивидуальных потребителей в климатических условиях Российской Федерации. Однако, перспективным выглядит развитие микротурбинных технологий, так как, только микро-ТЭЦ на базе микротурбин имеют параметры, близкие к требуемым в нашей стране.

Список литературы

[1] Инновации в России. Технологическая платформа «Малая распределенная энергетика» <http://innovation.gov.ru/node/3459>. (Дата обращения 16.03.16)

[2] СНиП 23-01 «Строительная климатология», НИИСФ, 1999 г.

[3] СНиП 23-02 «Тепловая защита зданий», НИИСФ, 1999 г.

- [4] Viessmann. Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.viessmann.ru/>
- [5] Senertec. Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://senertec.com/>
- [6] Vaillant. Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vaillant.com>
- [7] Navien. Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.navien.ru>
- [8] Qnergy. Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.qnergy.com/>
- [9] Capstone. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.capstoneturbine.com/>
- [10] Enertwin. Официальный сайт компании. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.enertwin.com/>
- [11] *Ефимов Н.Н.* Микроэнергодомкомплекс на базе влажно-паровой турбины // Энергосбережение. – 2013. – №6. – С.54 – 56.
- [12] *Ефимов Н.Н., Паршуков В.И., Папин В.В., Безуглов Р.В., Янченко И.В., Клинико Р.А., Чумаков Д.Ю., Трофименко Е.С.* Микротурбинная установка для эффективного энергоснабжения автономных индивидуальных потребителей // Изв. Вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2015.
- [13] Baxi Innotech Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.baxi-innotech.de>
- [14] Nirvana energy system Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://nirvana-es.com/>
- [15] Etalim Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.etalim.com/>
- [16] *Липихин Е.Г., Шевелев Д.В.* Когенерационная установка с газовой микротурбиной измененной очередностью процессов. Электронный журнал: «Наука, техника и образование». Выпуск №1. 2016 г., [Электронный ресурс]. URL: <http://nto-journal.ru/catalog/mashinostroenie/111/>

Сафонов Александр Игоревич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: safonov.k40@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Липихин Евгений Геннадьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Evgeny.Lipihin@yandex.ru

Е.А. Юрик, Р.И. Мусин

ОБЗОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИМЕНЯЕМЫХ НА МИНИ-ТЭЦ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Мини-ТЭЦ (мини-теплоэлектроцентраль) – это практическое воплощение двух технологий: когенерации и малой энергетики. Основным принципом когенерации – стремление к максимальному использованию энергии первичного топлива за счет совместного производства тепловой и электрической энергии, общий КПД энергетической станции в режиме когенерации составляет 80–95%.

Целью применения Мини-ТЭЦ является уменьшение доли электропотребления из электросети до минимума или полное ее исключение, посредством самостоятельной выработки электроэнергии. В сочетании с использованием тепла, выработанным Мини-ТЭЦ, потребитель получает экономическую выгоду. Для получения этой экономической выгоды необходимо тщательное планирование и проектирование Мини-ТЭЦ. Основанием для планирования и проектирования является определение правильной величины мощности Мини-ТЭЦ. Для этого необходим детальный анализ потребности в тепловой и электрической энергиях и условий на конкретном объекте. Для обеспечения экономической выгоды необходима максимально высокая загрузка установки Мини-ТЭЦ [1].

Основными достоинствами мини-ТЭЦ являются:

1. Невысокие потери при транспортировке тепловой и электрической энергии по сравнению с системами централизованного тепло- и электроснабжения.
2. Автономность функционирования мини-ТЭЦ (независимость от внешней энергосистемы) и возможность продажи в энергосистему излишков вырабатываемой электроэнергии или теплоты.
3. Низкая себестоимость вырабатываемой тепловой и электрической энергии (в 2-2,3 раза меньше, по сравнению с системами централизованного тепло- и электроснабжения).
4. Повышение надежности энергоснабжения, так как возможные перебои в подаче электроэнергии от внешней энергосистемы не приводят к прекращению работы мини-ТЭЦ.
5. Невысокий расход топлива для производства электроэнергии и теплоты.
6. Большой моторесурс и долговечность оборудования мини-ТЭЦ.
7. Мобильность, возможность перевозки и быстрого подключения к тепловым и электрическим сетям потребителей после доставки на место (в стационарном или контейнерном исполнении).

В современных когенерационных установках роль первичного двигателя могут выполнять: поршневые двигатели, газовые турбины, паровые турбины, парогазовые турбины, паровинтовые турбины и микротурбины [2].

Основными критериями выбора типа установки являются:

- Единичная электрическая и тепловая мощность;
- Удельная стоимость энергоустановки;
- Моторресурс и надежность первичного двигателя;
- Вид топлива;
- Качество вырабатываемой электроэнергии;
- Экономическая эффективность (конкурентоспособность);
- Экологические характеристики;
- Возможность работать в энергосистемах;
- Особенности и ограничения применения;
- Принцип действия и устройство когенерационных энергоустановок;
- Стоимость серийного обслуживания;

Газотурбинные мини-ТЭЦ (ГТУ-ТЭЦ)

После газовой турбины, для теплоснабжения потребителей, предусматривается установка газо-водяного теплообменника-утилизатора или парового котла-утилизатора (рисунок 1). В этих аппаратах используется теплота продуктов сгорания (с температурой 420–500 °С) для нагрева сетевой воды или для выработки пара.

Примерно 40% энергии от сгорания газа приходится на выработку электроэнергии, остальные 60% используются для производства теплоты. Электрический КПД газотурбинных мини-ТЭЦ в среднем равен 25–35%. Общий коэффициент использования теплоты (по сумме электрической + тепловой мощности) у газотурбинных мини-ТЭЦ достигает 75–85%.

Спектр выпускаемых газотурбинных мини-ТЭЦ достаточно широк и лежит в диапазоне от 2,5 до 25 МВт по электрической мощности. Тепловая мощность газотурбинных мини-ТЭЦ (при температуре уходящих дымовых газов 100–115 °С) составляет от 1,5 до 27 Гкал/ч.

К достоинствам ГТУ-ТЭЦ относятся:

- Способность работать на различных видах топлива (газообразном и жидком).
- Длительность периода, на протяжении которого оборудование ГТУ-ТЭЦ может эксплуатироваться без остановки (до 9000 часов).
- Незначительный расход смазочного масла для оборудования ГТУ-ТЭЦ (до 1,3 тонн в год).
- Малые выбросы вредных веществ в окружающую среду
- ($\text{NO}_x = 25\text{--}50 \text{ ppm}$; $\text{CO} = 60\text{--}75 \text{ ppm}$).
- Высокое значение отношения отпущаемой теплоты к производимой электроэнергии ($\frac{Q}{N} = 1,7 - 2,1$).

- Возможность производства пара в котлах-утилизаторах ГТУ-ТЭЦ. Это обстоятельство позволяет использовать газотурбинные мини-ТЭЦ на промышленных предприятиях для покрытия технологической тепловой нагрузки [5].

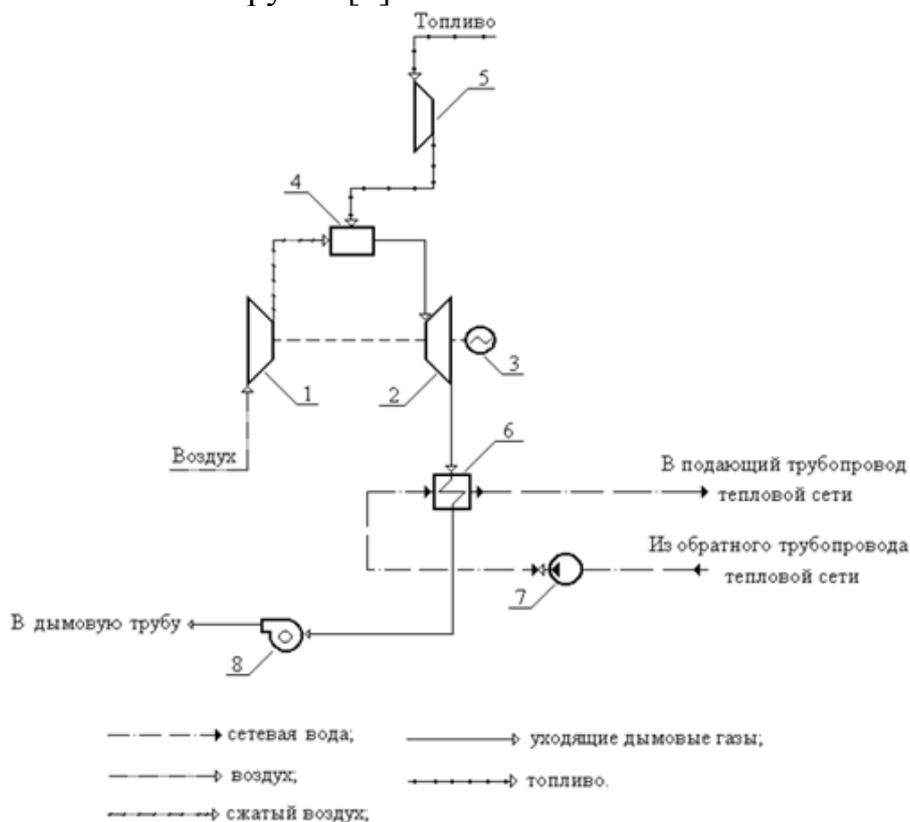


Рис. 1. Принципиальная схема газотурбинной мини-ТЭЦ: 1 – Воздушный компрессор; 2 – Газовая турбина; 3 – Генератор; 4 – Камера сгорания; 5 – Дожимающий компрессор; 6 – Газоводяной теплообменник-утилизатор; 7 – Насос; 8 – Дымосос

Мини-ТЭЦ на базе малых паротурбинных установок (ПТУ-ТЭЦ), а также на базе паровых роторных объемных машин (ПРОМ) и паровинтовых машин (ПВМ).

Надстройка существующих паровых и пароводогрейных котельных паротурбинными установками (или установками ПРОМ и ПВМ). Когда давление пара на выходе из паровых котлов значительно выше, чем требуется потребителям теплоты (или для собственных нужд котельной), вместо редукционных установок используются паровые турбины малой мощности (100–4000 кВт). Эти турбины работают на насыщенном или перегретом паре с давлением 8–40 кгс/см² и температурой 140...450 °С. Проходя через турбину, пар расширяется, его давление уменьшается и, тем самым, он передает свою энергию генератору. За счет расширения пара, генератор паровой турбины вырабатывает электроэнергию, которая затем поступает к потребителям.

После турбины, пар с давлением 3–7 кгс/см² и температурой 135...165 °С поступает для теплоснабжения технологических потребителей теплоты или для собственных нужд котельной (рисунок 2).

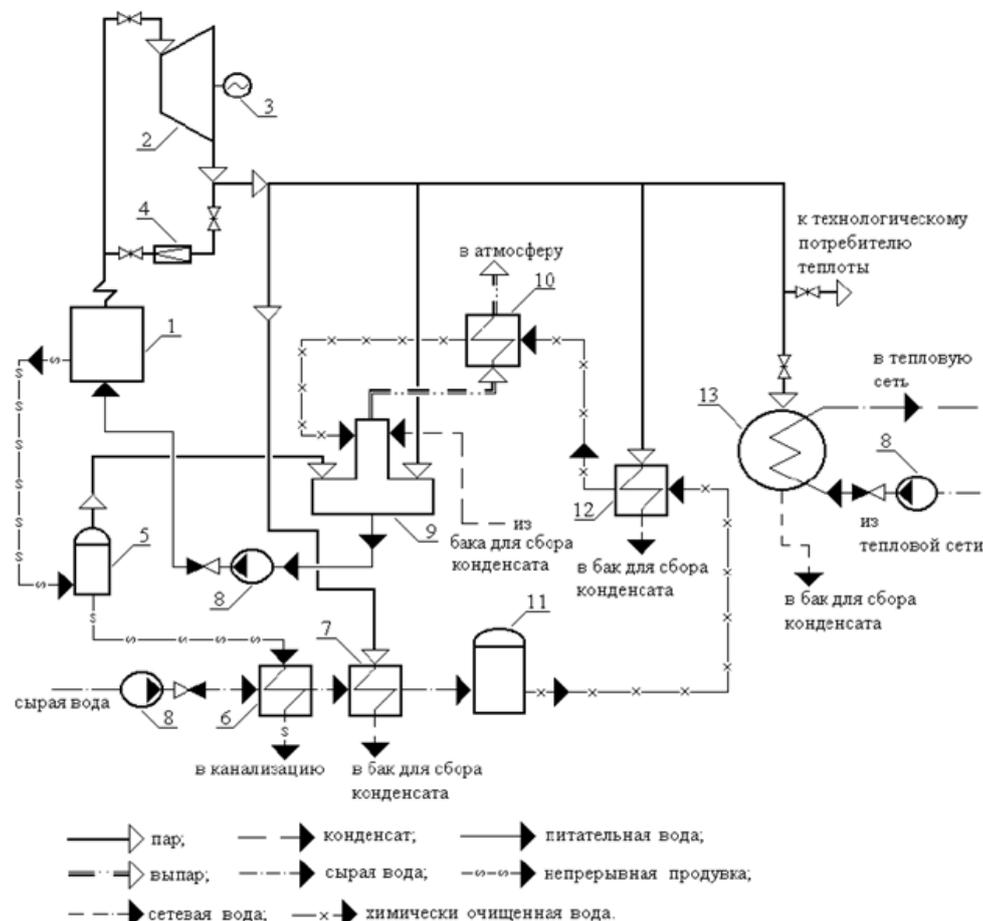


Рис. 2. Принципиальная схема ПТУ-ТЭЦ на базе блочных турбогенераторов:

- 1 – Паровой котел; 2- Блочный турбогенератор;
- 3 – Генератор; 4 – Редукционная установка; 5 – Расширитель;
- 6 – Охладитель непрерывной продувки; 7 – Подогреватель;
- 8 – Насосы; 9 – Деаэратор; 10 – Охладитель выпара;
- 11- Химводоочистка

Также возможно пар после турбины использовать в конденсаторе-бойлере для подогрева сетевой воды до температуры 80...90 °С для коммунально-бытовых нужд потребителей теплоты.

Перспективным направлением реализации возможности комбинированной выработки электроэнергии и теплоты в паровых и пароводогрейных котельных, с паровыми котлами низкого и среднего давления, является использование паровых роторных объемных машин (ПРОМ) и паровинтовых машин (ПВМ) [3].

В сравнении с ПТУ-ТЭЦ, энергоагрегаты ПРОМ и ПВМ имеют следующие преимущества:

- Не требуют высоких и жестких ограничений к качеству поступающего пара (могут эффективно работать на водяном паре со степенью сухости меньше 0,98).
- Имеется возможность изменения параметров пара на выходе из энергоагрегата. При этом появляется возможность регулирования соотношения электрической и тепловой мощности мини-ТЭЦ.
- Энергоагрегаты ПРОМ и ПВМ имеют малые габариты, металлоемкость и вес. Это обстоятельство обеспечивает возможность установки машин в существующем здании котельной без сооружения дополнительного помещения и массивного фундамента.

Мини-ТЭЦ на базе ПГУ.

Электрический КПД парогазовых установок (ПГУ) достигает 58%, а при использовании пара для выработки тепла общий КПД возрастает до 96%, в то время как обычная электростанция выдает 35%. ПГУ – реальная и выгодная перспектива теплоэнергетики, и строительство таких блоков лежит в основе государственной программы модернизации энергетической отрасли страны.

Комбинированный парогазовый цикл (технология NGCC) включает в себя газотурбинную установку, котел-утилизатор и паровую турбину. ГТУ, паровой котел-утилизатор, паровая турбина и турбогенератор вместе образуют бинарную парогазовую установку (ПГУ). Принципиальная схема бинарной ПГУ приведена на рисунке 3.

В современных энергетических ГТУ температура отработавших в турбине уходящих дымовых газов составляет 550-640 °С. Их тепловой потенциал может быть использован (утилизирован) в паровом котле-утилизаторе (КУ). Каждая газотурбинная установка работает на свой КУ, в котором вырабатывается пар, поступающий в паровые турбины. В паровых турбинах вырабатывается дополнительная электроэнергия. Проходя через паровые турбины, пар поступает в конденсатор и конденсируется. Конденсат с помощью насосов направляется в котел-утилизатор [4].

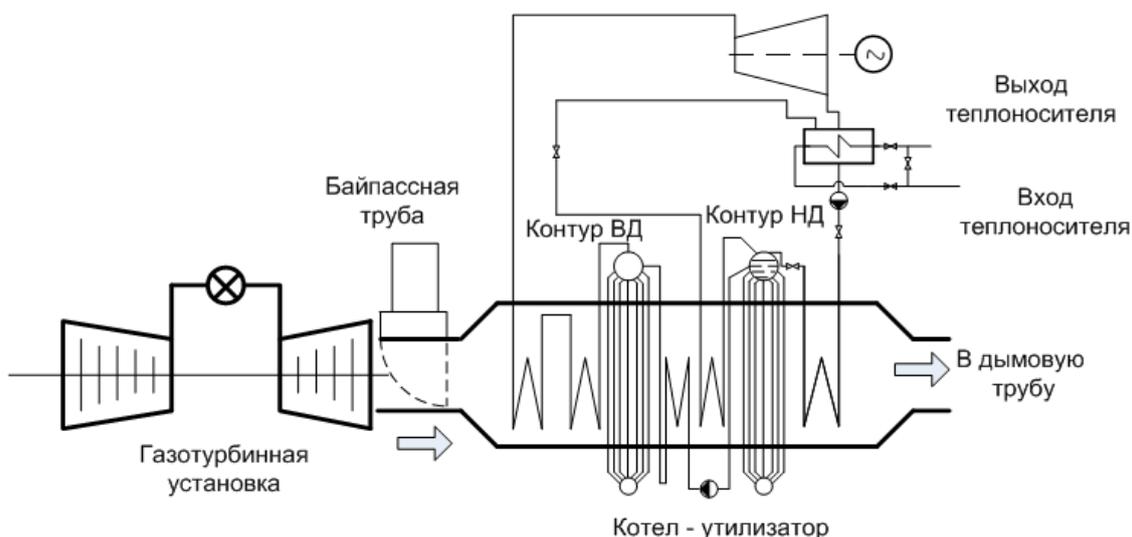


Рис. 3. Двухконтурная бинарная ПГУ с паровой турбиной типа Р

Парогазовые установки обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными газовыми и угольными электростанциями:

- Более высоким электрическим КПД – до 60 %.
- Более низкие капитальные затраты: 650-1100 долл. США/кВт против 1400-1500 долл. США/кВт для обычной паротурбинных электростанции.
- Более сжатые сроки строительства благодаря блочной конфигурации парогазовых установок: 2-3 года против 6-8 лет для обычных паротурбинных электростанций.
- Низкий уровень выбросов по сравнению с традиционными угольными электростанциями – снижение выбросов более чем на 50%.

Возможны различные сочетания газотурбинных и паротурбинных циклов. Среди них доминируют:

1. Двухконтурная бинарная ПГУ с паровой турбиной типа Р.
2. Двухконтурная бинарная ПГУ с паровой турбиной типа Т.
3. Двухконтурная бинарная конденсационная ПГУ.
4. Трехконтурная бинарная ПГУ с паровой турбиной типа Т с промежуточным перегревом пара.

Вывод

Как уже отмечалось выше, инвестиционная привлекательность проектов строительства мини-ТЭЦ не вызывает сомнения. Они характеризуются относительно высокой производительностью при небольших габаритах и массе. Это дает возможность устанавливать ее в практически любом здании котельной без значительных объемов строительных работ. Конкурентоспособность энергоустановок с ГТУ, ПГУ и ПГУ обеспечивается достаточно низкой в сравнении с другими видами оборудования удельной стоимостью за МВт установленной мощности.

Выбор той или иной схемы мини-ТЭЦ требует решения сложной технико-экономической задачи, учитывающей такие факторы как эффективность и надежность установки, стоимость разработки, изготовления и эксплуатации и т.д.

Список литературы

[1] А.П. Белкин. Расчет тепловых схем парогазовых установок утилизационного типа. ФГБОУ ВПО Тюменский государственный архитектурно-строительный университет. 2013. С. 20-35.

[2] В.Н. Чурашев, В.М. Маркова. МИНИ-ТЭЦ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015

[3] Приложение №3 к программе Модернизация электроэнергетики России на период до 2020 года. Анализ развития передовых технологий в теплоэнергетике.

[4] Л.В. Зысин. Парогазовые и газотурбинные установки. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010-368с.

[5] Шевелев Д.В., Сафонов А.И. Перспективные технологии утилизации тепла выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов. Электронный журнал: наука, техника и образование №2, 2016, ISSN 2413-6220, <http://nto-journal.ru/catalog/mashinostroenie/>

Юрик Елена Алексеевна - канд. техн. наук, доцент, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ea Юрий@gmail.ru

Мусин Р.И. - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zenitromanmusin@gmail.com

А.А. Сидоров, Я.А. Сафронова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ТУРБИНЫ В СОСТАВЕ ПГУ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Перспективный путь развития энергетики связан с парогазовыми установками (ПГУ), на которых основным элементом являются газотурбинные установки. В настоящее время в энергетике России принят курс на обновление ТЭС с помощью парогазовых технологий. Переход на профиль ПГУ пропагандируется давно, однако в последние годы это стало более актуально в связи с реальным и планируемым строительством новых энергетических объектов и возможностью значительного увеличения экономичности и экологичности выработки электро- и теплоэнергии. Это реализуется на базе мощных высокотемпературных газовых турбин, работа которых надежна и практична. Внедрение в энергетику современных парогазовых технологий кардинально улучшило технико-экономические показатели строительства и эксплуатации электростанций.

Классическая ПГУ состоит из одной-двух газовых турбин (ГТ), одного-двух котлов-утилизаторов (КУ), паровой турбины (ПТ) и соответствующего количества генераторов.

Основанная на принципе совместной работы газотурбинной и паротурбинной установок, парогазовая установка в ее классическом варианте работает следующим образом. Воздух из атмосферы поступает на вход воздушного компрессора ГТУ, который представляет собой осевую турбомашину. Ротор компрессора приводится в движение газовой турбиной. Поток сжатого воздуха подается в камеру сгорания, куда так же подается топливо. Топливом газотурбинной установки является природный газ. При сжигании топлива образуются продукты сгорания, имеющие температуру свыше 1000 °С. Рабочие газы, подаются в проточную часть газовой турбины, где расширяются практически до атмосферного давления, в результате чего вырабатывается механическая энергия. Большая часть этой энергии затрачивается на привод компрессора, а оставшаяся – на привод электрогенератора. Это, так называемый первый, или газотурбинный цикл работы электростанции, КПД на данном этапе составляет 35-39%. Отработавшие в ГТУ газы, имеющие высокую температуру, направляются в специальный котел-утилизатор, и здесь вступает в действие второй или паротурбинный цикл установки. Водяной пар с температурой 500-600 С и высоким давлением поступает в паровую турбину, к валу которой присоединен второй электрогенератор. Благодаря этому, ПТУ вырабатывает дополнительно

около 20% электроэнергии. Таким образом, общий КПД электростанции на базе парогазовых установок достигает почти 60%.

Обзор расчетной парогазовой установки. Расчетная парогазовая установка расположена на Адлерской ТЭС.

Адлерская ТЭС — современная парогазовая электростанция, состоящая из двух автономных энергоблоков ПГУ-180. Каждый из энергоблоков включает в себя две газовые турбины производства Ansaldo Energia (Италия) и паровую турбину российского производителя ОАО «Калужский турбинный завод». Технология парогазового цикла, на основе которой функционирует основное оборудование Адлерской ТЭС, обеспечивает высокий КПД (52%), низкий расход топлива и снижение уровня выбросов в атмосферу в среднем на 30% в сравнении с традиционными паросиловыми установками.

Основным и резервным топливом Адлерской ТЭС является природный газ — самый экологически чистый энергетический ресурс. Система охлаждения станции — это закрытая система оборотного водоснабжения с сухими вентиляторными градирнями. Охлаждаемая вода циркулирует по закрытому контуру, что не приводит к повышению влажности воздуха и загрязнению окружающей среды.

Электростанция спроектирована и построена в конфигурации, позволяющей обеспечить все основные требования, предъявляемые как в части выработки электрической и тепловой энергии, так и по обеспечению экологических требований. Технологические решения и материалы, использованные при строительстве Адлерской ТЭС, соответствуют самым высоким российским и международным экологическим стандартам.

Таблица 1. Состав основного оборудования Адлерской ТЭС

ПГУ-180	Газовая турбина V64.3A Ansaldo Energia (Италия) 66 МВт 2 шт.	Паровая турбина Т-48/62-7,4/0,12 ОАО «Калужский турбинный завод» — теплофикационный режим - 48 МВт — конденсационный режим – 62 МВт	Котел-утилизатор Е-99,6/14,5-7,71/0,55-545/214 ОАО «Подольский машиностроительный завод». Паропроизводительность: — Контур высокого давления 99,6 тонн в час; — Контур низкого давления 14,5 тонн в час. 2 шт.
ПГУ-180	Газовая турбина V64.3A Ansaldo Energia (Италия) 66 МВт 2шт.	Паровая турбина Т-48/62-7,4/0,12 ОАО «Калужский турбинный завод» — теплофикационный режим - 48 МВт — конденсационный режим – 62 МВт	Котел-утилизатор Е-99,6/14,5-7,71/0,55-545/214 ОАО «Подольский машиностроительный завод». Паропроизводительность: — Контур высокого давления 99,6 тонн в час; — Контур низкого давления 14,5 тонн в час. 2 шт.

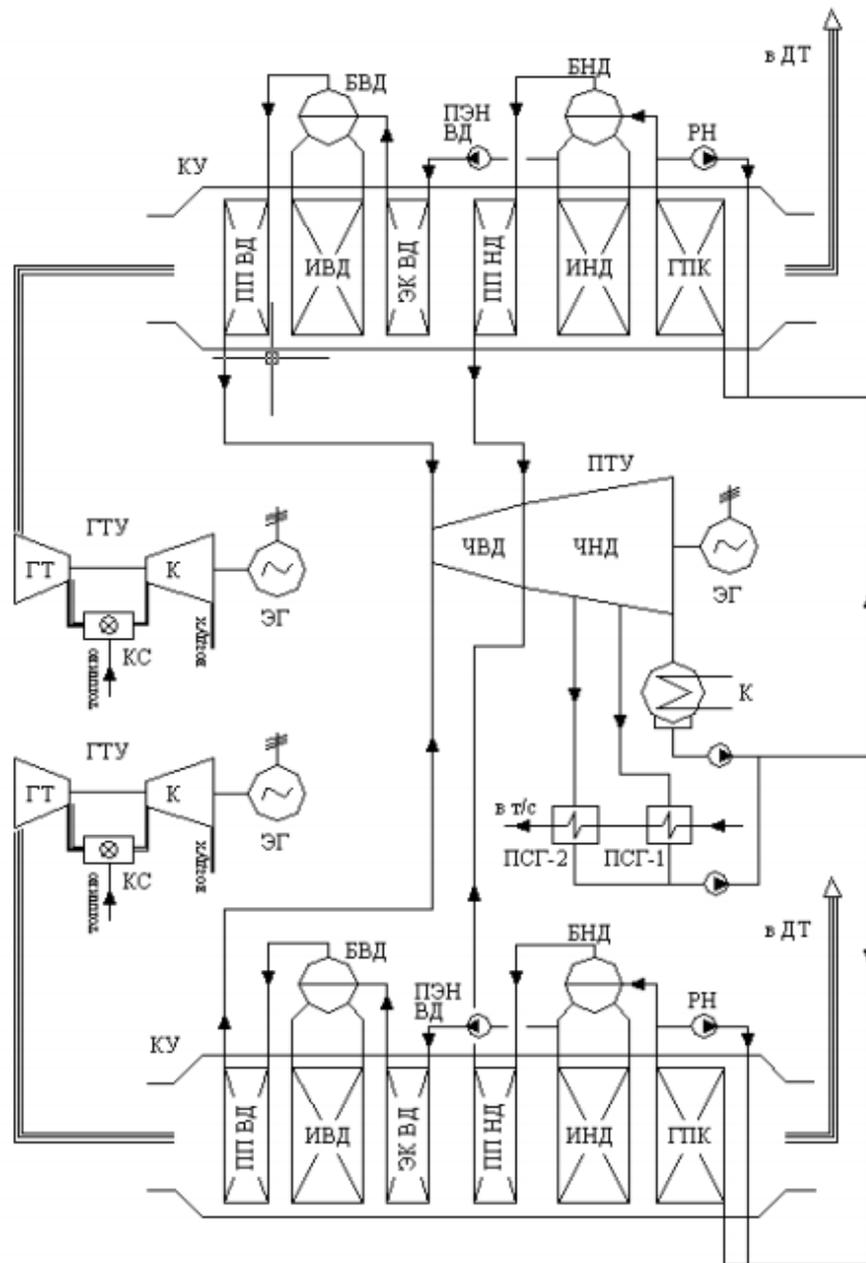


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема блока ПГУ-180 Адлерской ТЭС: БВД, БНД – барабаны высокого и низкого давлений; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ЭГ – электрогенератор; РН – насос рециркуляции; К – компрессор; КС – камера сгорания; ДТ – дымовая труба; ИВД, ИНД – испарители высокого и низкого давлений; ЧВД, ЧНД – части высокого и низкого давлений; ЭКВД – экономайзер высокого давления; ПЭНВД – питательный насос высокого давления; ПСГ-1, ПСГ-2 – сетевой подогреватель; ППВД, ППНД – пароперегреватели высокого и низкого давлений

Определение тепловой нагрузки паровой турбины Т-48/62-7.4/0.12. Тепловая нагрузка ТЭС, как и электрическая, изменяется во времени. Отопительно-вентиляционное тепловое потребление имеет суточную равномерность и годовую неравномерность, так как является сезонным. Летом отопительная нагрузка отсутствует.

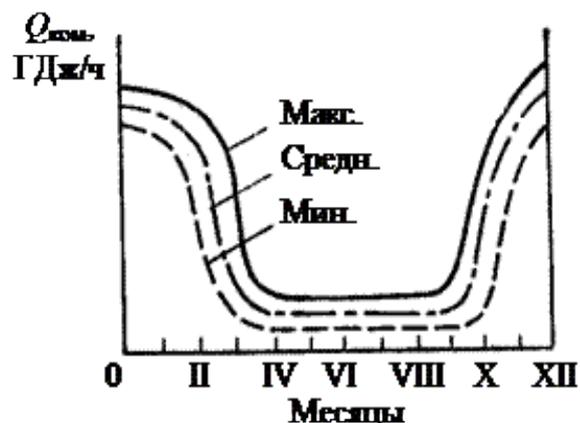


Рис. 2. График отопительно-вентиляционной нагрузки

Бытовая тепловая нагрузка принимается постоянной летом и зимой (рис.2). Однако, летом тепловая нагрузка на бытовое потребление ниже, чем зимой, что обуславливается повышением температуры исходной (сырой) воды. На рисунке 2 изображен график годовой отопительной нагрузки, принятый в настоящей работе для расчета турбины. Следует отметить, что в опубликованной литературе [2] можно найти и другие варианты тепловой нагрузки турбины.

Отопительная тепловая нагрузка, расход теплоты на вентиляцию и кондиционирование воздуха зависят от температуры наружного воздуха и имеют сезонный характер. Расход теплоты на отопление и вентиляцию наибольший зимой и полностью отсутствует в летние месяцы; на кондиционирование воздуха теплота расходуется только летом.

Наличие круглогодичной бытовой тепловой нагрузки улучшает энергетические и технико-экономические показатели ТЭС, так как увеличивает энергетически выгодную выработку электроэнергии на тепловом потреблении.

Графиками тепловых нагрузок необходимо располагать как при проектировании ТЭЦ, так и во время ее эксплуатации. В эксплуатационных условиях по ним выбирается режим работы электростанции. Электрическая нагрузка при этом устанавливается с учетом необходимой общей электрической нагрузки района, возможностей рассматриваемой ТЭС и ряда других факторов; теплофикационная нагрузка в крупных городах также может распределяться между рядом ТЭС района; промышленная тепловая нагрузка должна быть обеспечена данной ТЭЦ и может распределяться только между агрегатами этой электростанции, так как потребители получают пар обычно от одной электростанции.

Режимы работы паровой турбины с теплофикационным отбором



Рис. 3.1. Конденсационный режим работы турбины

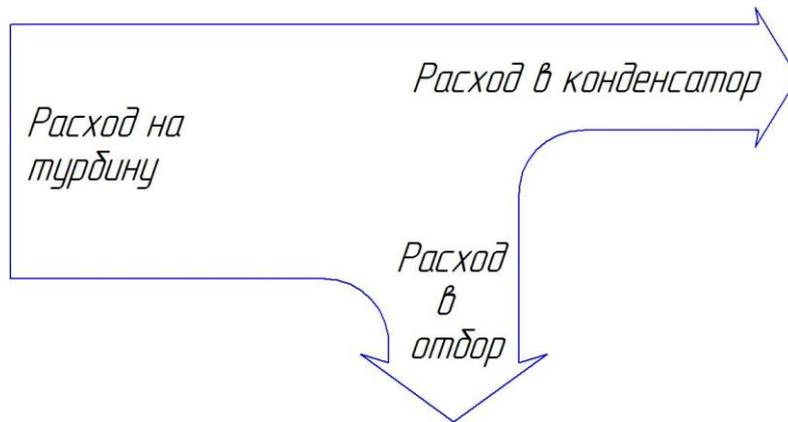


Рис. 3.2. Работа турбины с полным отбором пара по схеме «зима»

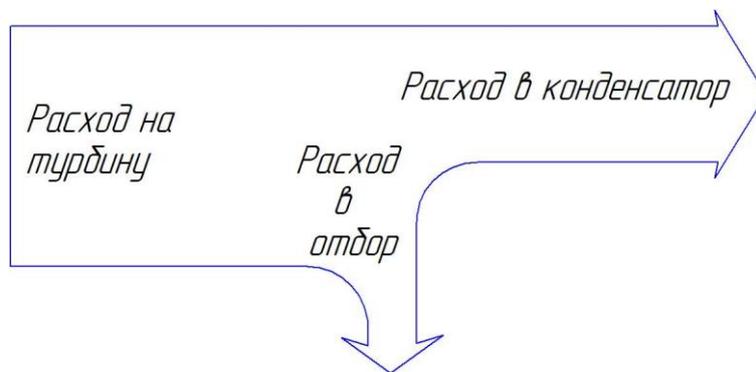


Рис. 3.3. Работа турбины с частичным отбором пара по схеме «лето»

Для определения максимального значения тепловой нагрузки в течение года воспользуемся схемой с полным отбором пара (рис.3.2).

С помощью формул, приведенных ниже, можно найти максимальное значение тепловой нагрузки:

$$Q_{\max} = G_{om} \cdot c_p \cdot (t_{om} - t_k) = G_{om} (h_{om} - h_k), \quad (1)$$

где Q_{\max} – расчетная тепловая нагрузка $\frac{\text{Дж}}{\text{ч}}$;

G_{om} – расход пара в регулируемом теплофикационном отборе, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$;

c_p – удельная теплоемкость водяного пара, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

t_T – температура в отборе, $^\circ\text{C}$;

t_{δ} – температура конденсата греющего пара, $^\circ\text{C}$;

h_{om} – энтальпия пара в регулируемом теплофикационном отборе, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

h_k – энтальпия конденсата греющего пара, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

$$Q_{\max} = G_{om} \cdot (h_{om} - h_k) = 129800 \cdot (2742 - 449,2) = 297605440 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} = 297,6 \frac{\text{ГДж}}{\text{ч}}$$

По полученным данным строим график тепловой нагрузки.

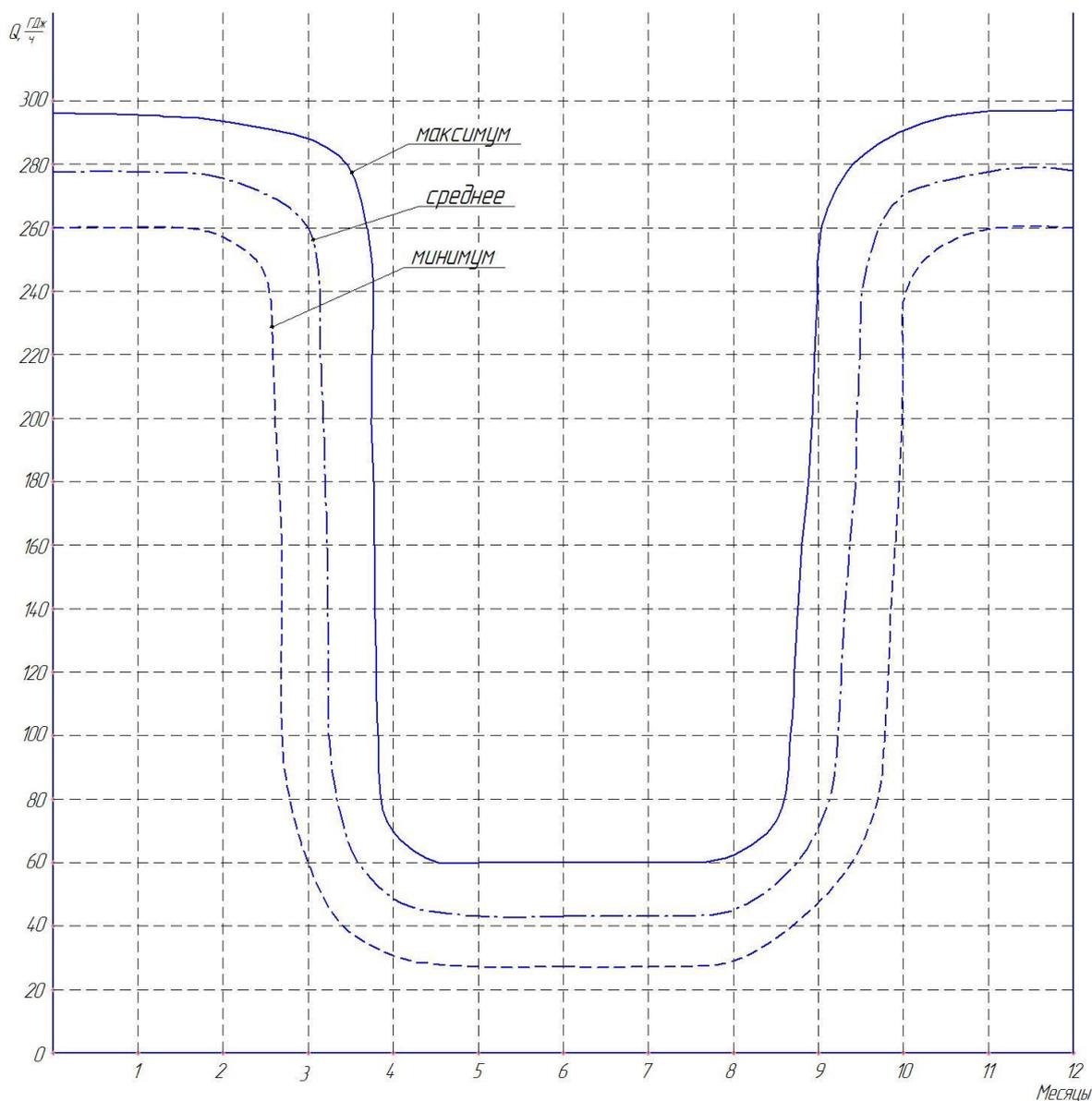


Рис. 4. Графики тепловой нагрузки теплофикационной турбины

Построенный график максимальной тепловой нагрузки в дальнейшем будет использован и при расчете турбины, и для оптимизации геометрии ступеней ЧНД турбины.

Список литературы

- [1] *Бененсон Е.И., Иоффе Л.С.* Теплофикационные паровые турбины, 1986.
- [2] *Канаев А.А., Корнеев М.И.* Парогазовые установки. Конструкции и расчеты, 1974. – 240с.
- [3] *Рыжкин В.Я.* Тепловые электрические станции: Учебник для теплотехн. спец. вузов. — М.-Л.: Энергия, 1967. — 400 с.

Сидоров Альберт Александрович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sidpol1@rambler.ru

Сафронова Яна Андреевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: safronovayna17@gmail.com

А.А. Жинов, Г.А. Круглова

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОНСТРУКЦИИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ОСЕВЫХ УСИЛИЙ НА РОТОРЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Осевые усилия, действующие на ротор паровой турбины и воспринимаемые упорным подшипником, являются важнейшим компонентом, определяющим надежную и безаварийную работу всей турбоустановки. Величина осевых усилий определяется распределением давлений пара по проточной части турбины, степенями реактивности ее ступеней и дисков, конструктивными особенностями проточной части, конструкцией дисков, концевых и диафрагменных уплотнений, наличием и типом систем разгрузки, работой систем регулирования параметров пара в уплотнениях и т.д.

Значительное влияние на осевые усилия, действующие на ротор турбины, оказывают переменные режимы ее работы, режимы пуска-останова, а также режимы работы основного и вспомогательного оборудования энергоустановки (конденсатора, регенеративных подогревателей, деаэратора, электрогенератора и т.п.).

Суммарное осевое усилие зависит от расхода, начальных параметров пара и давления за турбиной, состояния диафрагменных и концевых уплотнений и чистоты проточной части турбины. Оно может оказаться настолько большим, что его не сможет выдержать упорный подшипник. Аварийность упорных подшипников значительно выше, чем у опорных подшипников. Выход упорного подшипника из строя приводит, как правило, к серьезным повреждениям проточной части турбомашин с последующими длительными ее остановками. Поэтому необходимость оптимизации режимных параметров и конструкции паровой турбины для уменьшения осевых усилий на роторе является актуальной проблемой.

Совершенствование конструкции упорных и опорно-упорных подшипников паровых турбин имеет большое значение для обеспечения надежной работы турбоагрегатов, поскольку они воспринимают значительные усилия и вибрации, и фиксируют ротор в осевом направлении.

Работа упорного подшипника скольжения осуществляется за счет поддержания масляного клина между упорным гребнем вращающегося ротора и статором [4]. Современные упорные подшипники для паровых турбин выполняют сегментной или колодочной конструкции, при которой упорные колодки для создания масляного клина должны отклоняться от вертикального положения. Конструкции упорных и опорно-упорных подшипников разных турбостроительных фирм отличаются в основном

устройством установки упорных колодок в статоре [6]. Их принцип работы и разнообразные конструкции детально представлены в литературе [2].

Следует отметить, что на надежную работу упорного подшипника влияет конструкция системы равномерного распределения усилия и подвода масла по колодкам, которая должна обеспечивать достаточную несущую способность подшипника, а также возможность автоматической самоустановки колодок при изменении нагрузки и частоты вращения, надежность подачи масла при нормальной работе насосов и их аварийном отключении, минимум потерь энергии на трение и минимальный расход масла. Требуется обеспечить необходимую жесткость конструкции подшипника при статическом и динамическом приложении нагрузки, достаточно высокие технологичность и ремонтпригодность, а также возможность контроля за надежностью его работы в процессе эксплуатации турбины [2].

Безаварийная работа подшипника обеспечивается только в случаях сохранения масляного слоя, разделяющего трущиеся поверхности. Известно, что между нагрузкой на упорный подшипник и максимальной температурой колодок существует однозначная зависимость. Характер зависимости определяется конструкциями колодки и подшипника, а так же рядом эксплуатационных факторов. Если нагрузка, действующая на подшипник, меньше предельной, то температура колодок возрастает плавно с ростом усилия. При достижении предельной нагрузки происходит резкое увеличение температуры и подплавление рабочих поверхностей, как правило, имеющих баббитовый слой. Для контроля работы упорного подшипника в его колодки устанавливаются термодатчики. Введение термоконтроля, желательно на всех колодках подшипника, ведет к снижению числа аварий подшипников при эксплуатации.

Несущая способность подшипника определяется температурой колодок, которая зависит от нагрузки, действующей на колодку, вязкости масла, расхода, степени отчистки и способа подачи масла при нормальном и аварийном режимах работы турбоагрегата, конструкции колодок, их числа и материала, способа выравнивания нагрузки по колодкам, шероховатости рабочих поверхностей диска и колодок, величины осевого разбега, частоты вращения и др. [2].

Большую роль в надежной работе турбины играет конструкция и состояние диафрагменных, осевых, периферийных и концевых паровых уплотнений. Они оказывают влияние не только на экономичность турбины, но и существенно влияют на осевые усилия, действующие на ротор турбины, и, следовательно, на работу упорного подшипника. Осевое усилие, действующее на уступы уплотнения (уступы ротора), зависит от конструкции самого уплотнения, от количества гребней и давления пара перед уступом.

Особое воздействие на осевые усилия и работу упорного подшипника оказывают режимы работы турбины, конденсатора, системы регенерации. При медленном нагружении турбины соотношение расхода пара по ци-

линдрам постоянно и осевое усилие плавно возрастает с увеличением мощности. Величина и направление действия усилия определяются алгебраической суммой составляющих по отдельным отсекам турбины, которые зависят от расхода пара и соответствующего изменения давления. При пуске турбины и начальном нагружении, ступени работают с большим отклонением от расчетных режимов, вследствие этого нагрузка на подшипник иногда оказывается направленной в сторону, противоположную действию нагрузки при номинальной мощности.

Включение или выключение подогревателей высокого и низкого давления значительно влияет на соотношение расходов пара по отсекам и цилиндрам турбины, это приводит к изменению осевого усилия, действующего на ротор, и, следовательно, к изменению нагрузки, воспринимаемой осевым подшипником.

Работа турбины с пониженной начальной температурой пара вызывает рост степени реактивности ступеней, а, следовательно, увеличение составляющих осевого усилия, действующего на ротор.

Изменение осевых усилий, действующих на ротор, при быстром переходе на новый режим работы (например, при сбросе и наборе нагрузки) зависит от конструкции турбины и работы установленных систем защиты. В турбоустановках, паровой тракт которых не имеет системы промежуточного перегрева пара, сепараторов и т.п., а также промежуточных регулирующих и отсечных клапанов, при сбросе нагрузки и закрытии клапанов свежего пара происходит быстрое снижение давлений по всей проточной части и уменьшение осевого усилия до величин, существенно меньших усилия при номинальной нагрузке. При наборе нагрузки происходит практически одновременное повышение давления по проточной части до расчетного значения. Поэтому соответственное увеличение осевого усилия не может привести к сколь-либо заметному превышению усилия при максимальной нагрузке [2].

Вследствие изменения расхода пара, температуры и расхода охлаждающей воды, загрязнения трубок конденсатора, увеличение подсосов воздуха и других отклонений в работе конденсационной установки давление пара за последней ступенью турбины может изменяться. Это приведет к изменению температурного состояния цилиндра низкого давления, изменится величина зазоров по проточной части и степень реактивности ступеней, а, следовательно, и осевое усилие.

Занос солями каналов сопел и рабочих лопаток приводит к сужению их сечений, в результате чего при неизменном расходе увеличивается давление пара перед этими ступенями, изменяется располагаемый теплоперепад на ступень и степень реактивности, возрастает перепад давлений на рабочих лопатках и диске. Это обуславливает повышение составляющей осевого усилия по ряду ступеней. Если в отсеке повышенного давления нахо-

дится уступ ротора, то возрастает составляющая осевого усилия, действующая на уступ.

При попадании воды в работающую турбину происходит сильное увеличение осевого усилия. При значительных забросах воды возрастание осевого давления так велико, что обычно приводит к аварии упорного подшипника. Увеличение осевого давления объясняют при этом следующим образом: при попадании воды в относительно горячую турбину повышается давление в ступенях вследствие частичного испарения воды, кроме того, увеличивается отношение $\frac{u}{c_0}$ и возрастает степень реактивно-

сти на лопатках из-за понижения температуры пара.

При больших количествах попавшей в турбину воды образуется врашающиеся водяные кольца, в которые погружаются рабочие лопатки. В результате на лопатках сильно возрастает степень реактивности и, следовательно, сильно увеличивается осевое усилие на упорный подшипник.

Для уменьшения осевого усилия на ротор паровой турбины используют следующие решения:

- для уменьшения разности давлений на дисках в ЦВД и ЦСД применяют разгрузочные отверстия [5];
- в целях уменьшения осевых усилий у реактивных турбин применяют не дисковые, а барабанные роторы, у которых осевые усилия создаются только в местах, где изменяется диаметр барабана [3];
- если суммарное усилие на роторе оказывается значительным, то с целью уменьшения нагрузки на осевой подшипник применяют разгрузочный поршень (думмис) [2];
- двухпоточное исполнение цилиндров позволяет почти полностью избавиться от осевого усилия. В этом случае осевое усилие на роторе может возникнуть лишь в результате различных технологических отклонений размеров при изготовлении элементов проточных частей отдельных потоков, а также при изменении проходных сечений в процессе эксплуатации. Однако осуществить такой путь уравнивания осевого усилия не всегда возможно [2];
- в отдельных многоцилиндровых турбинах уравнивание осевых усилий достигается направлением потоков пара в первом и втором цилиндрах во взаимно противоположные стороны;
- для уравнивания осевого усилия каждого цилиндра, увеличивают диаметр переднего концевое уплотнения [2]. Увеличивая диаметр переднего концевое уплотнения полное осевое давление на подшипник можно уменьшить до любой величины, однако при этом необходимо считаться с увеличением протечки пара через уплотнение и с конструктивными затруднениями в выполнении плотного горизонтального разъема цилиндра [1];

– применяют поворот потока пара после нескольких ступеней в одном цилиндре [2].

Таким образом, для увеличения надежности работы энергооборудования, существует необходимость дальнейшей доработки существующих и разработки новых научно обоснованных подходов и методик, позволяющих осуществлять поиск путей уменьшения и компенсации осевых усилий, действующих со стороны ротора на упорный подшипник, путем оптимизации режимных параметров и конструкции турбины.

Список литературы

[1] Зальф Г.А., Звягинцев В.В. Тепловой расчет паровых турбин. – М.: МАШГИЗ, 1961. – 289 с.

[2] Сережкина Л.П., Зарецкий Е.И. Осевые подшипники мощных паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.: ил.

[3] Теплотехника: учебник / И.И.Сушкин [и др.]; под ред.И.И.Сушкина. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1973. – 479 с.

[4] Трухний, А.Д. Стационарные паровые турбины / А.Д. Трухний. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.

[5] Трухний А.Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: Учебное пособие для вузов / Трухний А.Д., Ломакин Б.В. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 540 с.: ил., вкладки

[6] Независимый научно-технический портал NTPRO.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ntpro.com/izobreteniya-rossiyskoj-federacii/podshipniki/8875-upornyj-podshipnik.html>. - (дата обращения: 16.10.2016)

Жинов Андрей Александрович - д-р техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

Круглова Галина Алексеевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: signora.pandora@ya.ru

Н.В. Гридчин, Я.В. Афанасов

ПЕРЕВОД КС МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД НА ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Перевод камеры сгорания малоразмерного ГТД на газообразное топливо является актуальной задачей при создании средств автономного энергоснабжения. Большинство малоразмерных ГТД производимых в нашей стране спроектированы как ВСУ военного назначения, использующие жидкое топливо. Конверсия продукции, изначально спроектированной для военного назначения в продукцию гражданскую, неизбежно требует решения задач придания ей конкурентоспособных на рынке характеристик по надежности, эффективности и цене [1].

Особенности перевода КС на газообразное топливо. При переходе на газообразное топливо, как показывает практический опыт множества двигателестроительных предприятий, приходится решать общие (типовые) задачи [1,2]:

1. Модернизация фронтального устройства (ФУ) для обеспечения подготовки топливо-воздушной смеси из топлива, плотность которого в 10^3 раз меньше жидкого (плотность дизельного топлива $\rho \approx 830 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а плот-

ность природного газа $\rho = 0,7 \dots 1,0 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$), при этом стремятся обеспечить минимальное избыточное давление газа над давлением воздуха в камере сгорания (для жидкого топлива эта величина $\Delta p = 1 \text{ МПа}$), вследствие чего проходные сечения каналов газовых форсунок значительно отличаются по размеру и количеству от жидкостных;

2. Организация пуска камеры сгорания;

3. Достижение высокого качества процесса горения, определяемого для современных камер сгорания не только традиционными параметрами $\eta_{\text{КС}}$, $t_{\text{ст}}$, $\Theta_{\text{Г}}$ и др., но и экологическими характеристиками, т.е. обеспечением допустимых уровней эмиссии выбросов вредных веществ. Практически все находящиеся в эксплуатации ГТУ оснащены низкоэмиссионными камерами сгорания.

Работа над новыми концепциями организации процесса горения ведется непрерывно.

Концепции КС. Ключевым в формировании облика конвертированной на газообразное топливо КС является выбор технологии сжигания газа, которая будет отвечать всем предъявляемым требованиям (ресурс, полнота сгорания, экологичность).

Широко известны следующие концепции КС: LPP и RQL, а также технология “микрофакельного” сжигания газа.

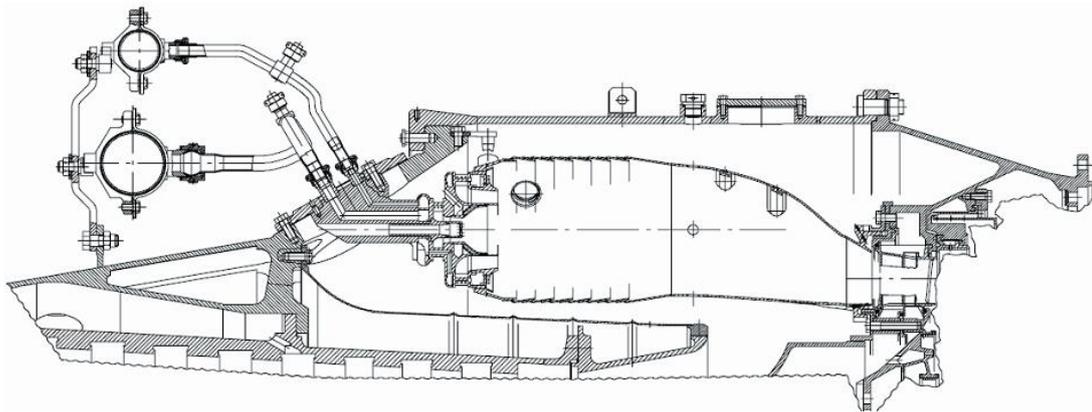


Рис. 1. КС двигателя ДН80 концепции LPP

Концепция LPP (рис.1) предполагает горение предварительно подготовленной ТВС при больших значениях коэффициента избытка воздуха в зоне горения, благодаря чему достигается относительно низкая температура горения (рис.2) и снижаются выбросы NO_x [4].

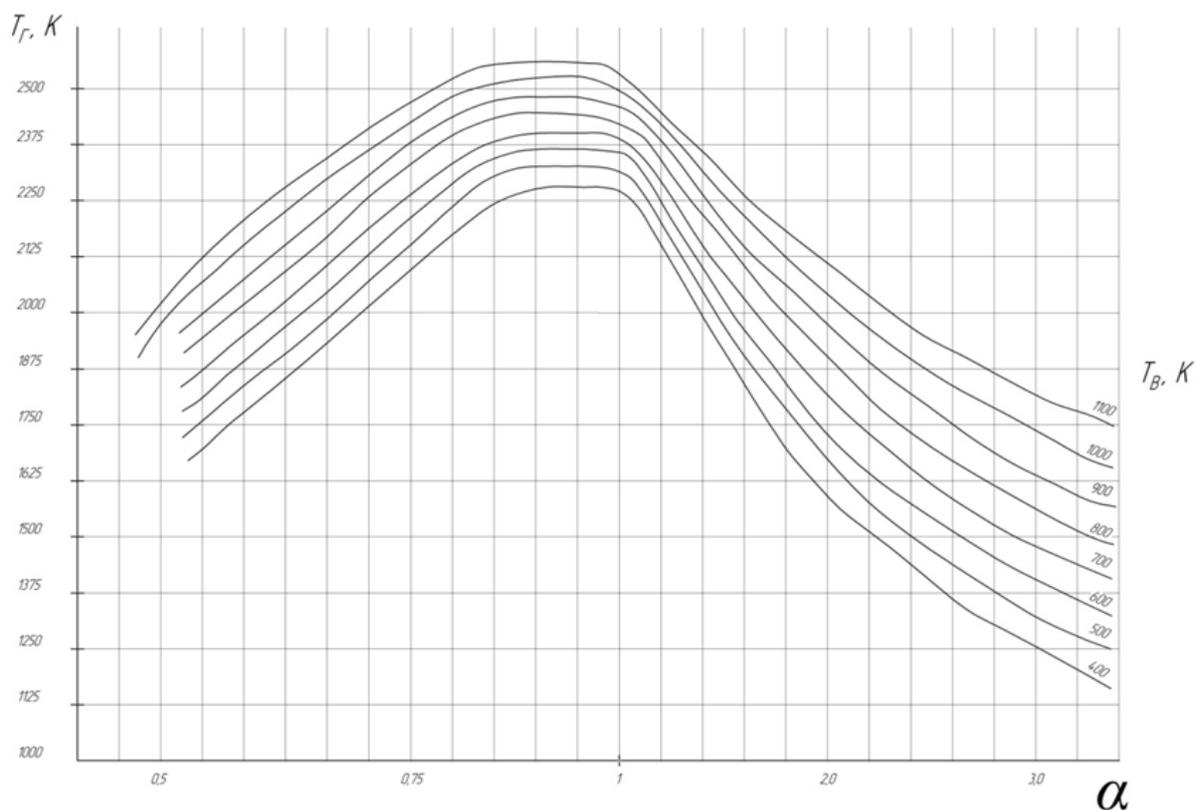


Рис. 2. Зависимость температуры пламени от коэффициента избытка воздуха

К недостаткам данной концепции относится [5]:

- необходимость разработки принципиально нового ФУ;
- сложность поджига КС;
- вероятность получения нестабильного (пульсационного) горения.

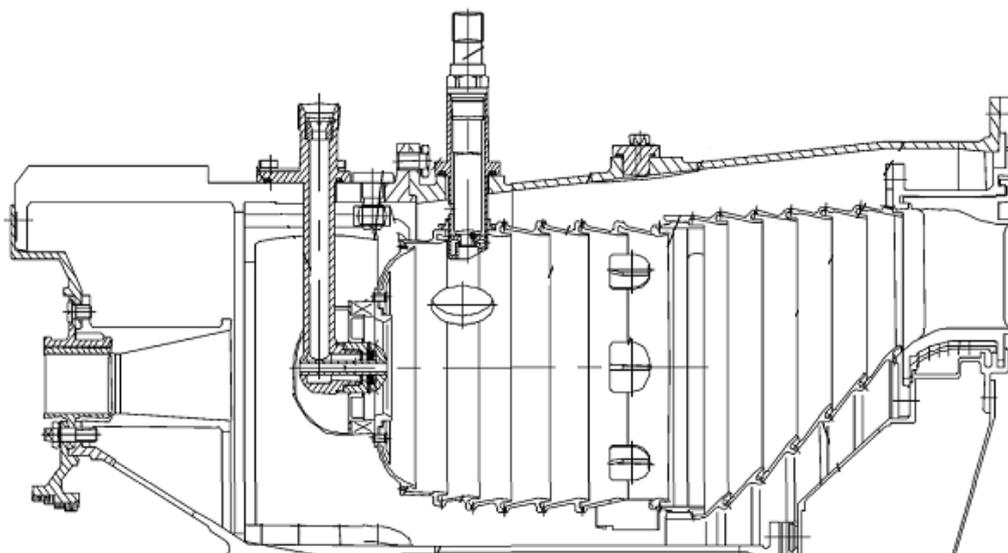


Рис. 3. КС ПС90-ГП2 концепции RQL

Технология RQL (рис.3) предполагает сгорание богатой топливовоздушной смеси (ТВС) в первичной зоне жаровой трубы (ЖТ), а затем быстрое разбавление продуктов сгорания значительными объемами холодного воздуха в зоне смешения, что позволяет сократить время пребывания смеси в высокотемпературной зоне КС, следовательно, снизить время на образования вредных веществ в продуктах сгорания [6].

Недостатками этой концепции являются:

- кардинальное изменение конструкции обечаек ЖТ;
- повышенное требование к охлаждению фронта КС.

Технология "микрофакельного" сжигания газа, предполагает горение топлива во множестве малоразмерных факелов при коэффициенте избытка воздуха близкому к стехиометрическому. Такая дискретизация процесса горения, позволяет достичь высокой полноты сгорания топлива и стабильности горения при равномерном поле температур во фронте КС, что позволит снизить эмиссию вредных веществ [7].

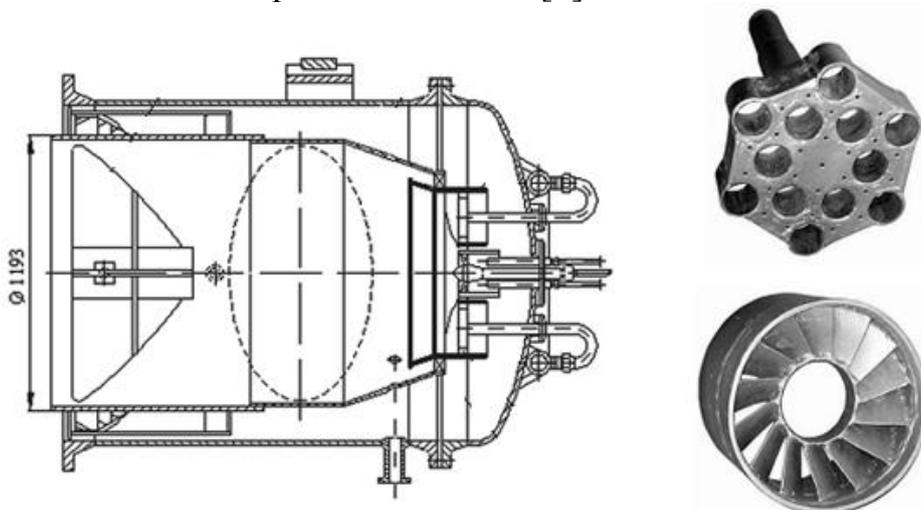


Рис. 4. КС ГПА ГТК-10 с трубчатыми горелками

Недостатки данной концепции:

- значительное увеличение площади ФУ;
- усложнение системы топливных коллекторов;
- недостаток информации о процессах в данных КС.

Кроме того, при выборе концепции проектирования новой КС основное ограничение оказывает компоновка двигателя, то есть возможность и рациональность внесения конструктивных изменений в различные элементы исходной конструкции.

Оценка параметров проектируемой КС. Предварительный расчет параметров КС позволяет оценить возможность реализации выбранных концепций на первом этапе, после компоновки. Ее рационально проводить, по следующим критериям:

1) Средняя скорость воздуха через отверстия в ЖТ исходной и новой конструкции.

$$V = \frac{\Sigma G_i}{\Sigma F_i}, \frac{м}{с} \quad (1)$$

где ΣG_i - суммарный расход воздуха через КС, ΣF_i - суммарная площадь отверстий в ФУ КС и ЖТ.

Данное значение определяет изменение площадей вдоль всей КС и возможность реализации запуска и стабильного горения на газе. При этом в уравнении расход воздуха, в случае конверсии, остается постоянным.

2) Теплонапряженность.

$$q_{жс} = \frac{G_T \cdot H_u}{V_{ж} \cdot p_B}, \frac{МДж}{м^3 \cdot час \cdot Па} \quad (2)$$

Ее значение определяет материалы, ресурс и требования к охлаждению ЖТ. Рекомендации по данному параметру широко приведены в литературе в зависимости от назначения установки.

3) Критерий форсирования был впервые предложен в ЦИАМ В.Е. Дорошенко. Он позволяет оценить такой параметр процесса горения как химический недожог.

$$k_v = \frac{G_B}{p_B^{1,25} \cdot T_B \cdot V_{ж}}, \frac{кг}{атм^{1,25} \cdot К \cdot м^3 \cdot с} \quad (3)$$

4) Время пребывания ТВС в объеме жаровой трубы позволяет оценить процесс горения в КС с точки зрения протекания химических процессов, например, оценить уровни эмиссии вредных веществ.

$$\tau = \frac{V_{ж}}{V_B}, \text{ сек.} \quad (4)$$

Оценка этих параметров позволяет на первоначальном этапе определить возможность реализации в рамках исходной установки той или иной концепции КС, не прибегая к более углубленному расчету каждого конкретного варианта.

Вывод. Задача перевода камеры сгорания малоразмерного ГТД на газообразное топливо не имеет универсального решения по причине значительного влияния компоновки установки на возможность реализации различных концепций КС. Для эффективного анализа возможностей конверсии требуется провести следующие этапы: анализ параметров и конструкции исходной КС, компоновочные работы по ряду вариантов, оценка технологических возможностей предприятия и сроков реализации, по результатам компоновки новых вариантов КС необходимо произвести предварительный расчет основных параметров КС. Затем необходимо провести углубленные компоновочные работы отобранных конструкторских решений, провести тепловой и гидравлический расчет отобранных вариантов КС, произвести CFD анализ структуры потока и концентраций ТВС, произвести расчет режимов запуска, сделать заключение о возможности реализации процесса горения в выбранной компоновке на пусковых режимах.

Список литературы

[1] *Ивах А.Ф., Гребенюк Г.П., Ишбулатов М.Н., Арефин В.И. Фокин Н.И.* Особенности конвертирования форсированной по скорости камеры сгорания при работе на природном газе // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2002. — №2.

[2] *Кочеров Е.А., Росляков А.Д., Цибузиов Ю.И.* Разработка конструкции камеры сгорания двигателя НК-14СТ-10 с модульными горелками // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2011. — №3(27). — С.112–116.

[3] *Матвеев С.Г., Ланский А.М., Орлов М.Ю., Абрашкин В.Ю., Дмитриев Д.Н., Зубрилин И.А., Семенов А.В.* Моделирование процессов горения пропана при переводе камеры сгорания ГТД на газообразное топливо // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2011. — №9(29). — С.168–178.

[4] *Романовский Г.Ф., Сербин С.И., Ванцовский В.Г., Викул В.В.* Технология малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — 2005. — №6. — С.154–160.

[5] *Герамисенко В.П.* О неустойчивости горения в камерах сгорания ГТД // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — 2007. — №2. — С.83–85.

[6] *Романовский Г.Ф., Сербин С.И., Ванцовский В.Г., Викул В.В.* Технология малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — 2005. — №6. — С.154–160.

[7] *Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Романов В.В., Ванцовский В.Г., Викул В.В.* Результаты испытаний камеры сгорания ГТД ДГ80 с низкоэмиссионным горелочным устройством на базе трубчатых модулей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — №6(40) — С.13–178.

Гридчин Николай Викторович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Афанасов Ян Валерьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Xoncu@yandex.ru

Н.В. Гридчин, А.С. Мазунов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГПА ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЯ МАГНИТНЫМИ ПОДВЕСАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современные турбомеханизмы с приводными синхронными машинами мегаваттного класса мощности составляют основу электроэнергетических установок в различных отраслях промышленности. Это обусловлено высокими энергетическими характеристиками и надежностью их работы. Главным их недостатком является наличие подшипников скольжения с системами смазки, уплотнений и охлаждения, значительно влияющих на ресурс и эксплуатационные затраты. Кроме того, наличие редуктора (мультипликатора) для повышения скоростей вращения выше 3000 об/мин приводит к снижению надежности и ресурса агрегата. Современные системы “электромагнитных подшипников” обеспечивают реализацию бесконтактных и безмасляных технологий стабильной работы синхронных машин, в том числе и в электроприводах газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) [1].

Системы электромагнитного подвешивания (ЭМП) и поддержки вращательных и линейных элементов движущихся агрегатов без вхождения в контакт с ротором известны достаточно давно и основаны на принципе левитации или отталкивания (притяжения) ферромагнитного материала ротора полем электромагнита (подшипника). Основными преимуществами отсутствия прямого контакта между ротором и подшипником являются [2]:

- уменьшение износа узлов из-за отсутствия трения при вращении ротора, что повышает долговечность эксплуатации машины;
- отсутствие затрат на смазочные материалы и дорогостоящие баббит и бронзу для механических частей подшипников;
- вследствие отсутствия трения нет и механических потерь энергии на трение при вращении электродвигателя во всем диапазоне скоростей;
- возможность работы агрегата в экстремальных условиях при воздействии высоких и низких температур, в условиях вакуума, химически агрессивных сред и повышенной влажности;
- в отсутствии контактной теплопередачи хорошая теплоизоляция корпуса статора от ротора, что улучшает общее тепловое состояние машины;
- максимальная скорость вращения ротора не ограничена как при традиционных подшипниках свойствами материала, из которого они изготовлены, позволяя создавать безредукторные высокоскоростные машины;
- отпадает необходимость в трудоемких работах по техническому обслуживанию и ремонту маслосистем, систем охлаждения и самих подшипников, значительно сокращая эксплуатационные расходы;

- повышается уровень оперативного диагностирования и прогнозирования технического состояния машины в целом за счет адекватной и достоверной системы автоматического мониторинга работы магнитного подвеса.

В настоящее время совершенствование конструкции опор и уплотнений вала центробежных машин является актуальным при создании нового компрессорного оборудования.

Опыт внедрения и эксплуатации активных магнитных подшипников показывает:

- более 70% нештатных ситуаций, возникающих при эксплуатации турбокомпрессоров, связаны с маслосистемами, традиционно используемыми для смазки подшипников и уплотнений вала. В отличие от громоздких и ненадежных маслосистем работа систем ЭМП не требует к себе постоянного внимания и характеризуется принципом “включил и забыл”;
- системы ЭМП доказали свою принципиальную пригодность и надежность для удержания в состоянии левитации роторов турбомашин и электродвигателей. Промышленная наработка отдельных агрегатов с ЭМП достигла 300 тыс. час без поломок и остановов, что обусловлено высокими эксплуатационными характеристиками магнитных опор и стабильностью САУ;
- одним из главных недостатков агрегатов с ЭМП является их относительно высокая цена (в соответствии с расчетами 125 млн. руб. против 59,1 млн. руб.). Высокий уровень капитальных затрат обусловлен новыми высокотехнологичными агрегатами с большими издержками производства, которые в дальнейшем значительно снизятся. К тому же значительное снижение эксплуатационных затрат из-за отсутствия маслосистем приведет к быстрой окупаемости систем ЭМП в течение 2-3 лет.
- в целом проведенные научно-исследовательские и маркетинговые исследования показали, что направление по внедрению ЭМП и безмасляных технологий на ГПА КС является актуальным и перспективным в плане повышения энергоэффективности и надежности работы электрооборудования и технологических агрегатов.

Список литературы

[1] *Крюков О.В.* Газотранспортные агрегаты с электромагнитным подвесом ротора // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* — 2016. — Том 4 — №1.

[2] *Журавлев Ю.Н.* Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. — СПб.: Политехника, 2003. — 206 с.: ил.

Гридчин Николай Викторович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Мазунов Андрей Сергеевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Е.В. Тарасов, А.А. Жинов

ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА СМЕШИВАЮЩЕГО ТИПА В ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКЕ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Конденсирующее устройство оказывает существенное влияние на термический КПД всей паротурбинной установки в целом. Традиционно, в стационарных паротурбинных установках, применяются поверхностные конденсаторы с охлаждением водой, но существуют и другие виды конденсаторов, например, с воздушным охлаждением [1, 2, 3] и конденсаторы смешивающего типа, в которых теплообмен между охлаждающей водой и конденсирующимся паром происходит при их непосредственном контакте – смешении.

Процесс конденсации в традиционных, поверхностных конденсаторах осуществляется при постоянном давлении. Для отвода теплоты, выделяющейся при конденсации пара, через трубки конденсатора, образующие поверхность охлаждения, непрерывно прокачивается охлаждающая вода. Здесь имеет место пленочная конденсация отработавшего пара турбины на наружной поверхности труб. Существуют также конденсаторы с конденсацией пара внутри труб и течением охлаждающей воды снаружи [1]. Количество теплоты, отведенной охлаждающей водой, составляет более половины от теплоты потока конденсирующего пара.

К недостаткам поверхностных конденсаторов можно отнести:

- большие габариты;
- повышенная металлоемкость конструкции;
- наличие поверхности теплообмена;
- повышенный расход охлаждающей воды.

Одним из главных недостатков поверхностных конденсаторов также является неизбежное переохлаждение конденсата. Переохлаждение зависит от многих факторов, таких как паровая нагрузка конденсатора, температура охлаждающей воды, эффективности работы эжектора и т.д. Переохлаждение конденсата без параллельного снижения давления снижает энтальпию рабочего тела, которое далее поступает в систему регенерации паровой турбины, а затем в паровой котел, что приводит к дополнительным затратам на нагрев питательной воды. Система регенерации паротурбинной установки тесно взаимосвязана с работой конденсатора и может оказывать существенное влияние на ее технико-экономические показатели [4]. Кроме того, следствием переохлаждения конденсата является насыщение его неконденсирующимися газами, которые активизируют коррозию конденсатного тракта. Также, наличие в конденсаторе неконденсирующихся газов ухудшает условия процесса теплообмена и приводит к повышению давления конденсации, а, следовательно, к ухудшению экономичности ПТУ.

Недогрев охлаждающей воды в поверхностном конденсаторе до температуры насыщения определяется наличием термического сопротивления между конденсирующимся паром и охлаждающей водой. Данный параметр характеризует эффективность работы конденсатора.

В современных конденсаторах поверхностного типа нормированный недогрев охлаждающей воды до температуры насыщения находится в диапазоне от 3 до 10 °С. Большие значения недогрева, как правило, присущи одноходовым конденсаторам. Величина недогрева зависит от коэффициента теплопередачи трубок конденсатора, их состояния и чистоты.

Вышеизложенных недостатков практически лишены смешивающие конденсаторы. В таких конденсаторах отсутствует трубчатая поверхность теплообмена и все связанные с этим элементы конструкции, характерные для поверхностных конденсаторов и определяющие в основном их высокую стоимость [5]. В смешивающих конденсаторах конденсация пара осуществляется при смешении отработанного пара с охлаждающей водой, которая вносится в зону конденсации [6, 7, 8, 9].

Основными преимуществами смешивающих конденсационных устройств перед поверхностными являются:

- простота конструкции, изготовления и обслуживания, а, следовательно, и снижение затрат на производство;
- отсутствие поверхности теплообмена;
- малые расходы охлаждающей воды;
- увеличенный температурный напор, при меньшей кратности охлаждения.

Несмотря на простоту конденсирующих устройств смешивающего типа, физические процессы, протекающие в них, остаются до сих пор актуальной задачей исследования, поэтому проектирование данных устройств представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Основной трудностью является составление корректной методики теплового и гидравлического расчета конденсирующих устройств смешивающего типа.

Зачастую, обобщенные закономерности теплообмена при конденсации пара на струях жидкости получены эмпирическим путем. При проектировании же конкретных устройств, требуется рассмотрение частных случаев, а, следовательно, требуется и оптимизация методик расчета, основанных на обобщенных эмпирических законах.

В работе была поставлена задача проектирования конденсирующего устройства смешивающего типа для паротурбинной установки средней мощности ПТ-40/50-8,8/1,3, с промышленным и теплофикационным отборами, имеющую развитую систему регенерации, выполненную по схеме 2ПВД+Д+3ПНД, производства ПАО «Калужский турбинный завод». По этой причине была проведена оптимизация методики теплового и гидравлического расчета [6, 7, 8].

Разработанный смешивающий конденсатор состоит из двух секций, расположенных по бокам выхлопного патрубка паровой турбины. Секции разделяются на зону массовой конденсации и зону газоохладителя, а также имеют общий конденсатосборник.

Для проведения сравнительного анализа характеристик штатного поверхностного и разработанного смешанного конденсаторов был рассмотрен конденсационный режим работы паротурбинной установки, при этом вырабатываемая ею мощность составляет 50 МВт.

Основные параметры штатного поверхностного и разработанного смешивающего конденсаторов для данной ПТУ, рассмотренных в работе, приведены в таблице 1.

Таблица 1

	Поверхностный конденсатор	Смешивающий конденсатор
Давление в конденсаторе (Конденсационный режим)	0,018 МПа	0,018 МПа
Расход пара	150 т/ч	150 т/ч
Температура охлаждающей воды	33°C	33°C
Расход охлаждающей воды	8000 т/ч	3100 т/ч

Анализируя полученные параметры сравниваемых конденсационных устройств, очевидно, что расход охлаждающей воды в смешивающем конденсаторе 2,6 раза меньше, чем в штатном поверхностном, при аналогичных режимах работы паротурбинной установки.

Конденсация пара в смешивающем конденсаторе происходит на струях охлаждающей жидкости. Из-за отсутствия разделяющей их поверхности, отсутствует термическое сопротивление стенок, следовательно, коэффициент теплоотдачи по пару у таких установок существенно выше. При анализе результатов тепловых расчетов рассматриваемых конденсаторов можно отметить, что коэффициент теплоотдачи по пару у смешивающего конденсатора в десятки раз выше, чем у поверхностного. Данный показатель характеризует эффективность конденсирующего устройства.

Недогрев охлаждающей воды у конденсатора смешивающего типа до температуры насыщения на порядок меньше, чем у поверхностного.

К преимуществам использования смешивающих конденсаторов, на примере рассмотренной паротурбинной установки, перед поверхностными конденсаторами, можно отнести:

- простоту конструкции, низкую металлоемкость;
- снижение затрат на производство и обслуживание;
- снижение расхода охлаждающей воды в 2,6 раза;
- отсутствие поверхности теплообмена;
- отсутствие термического сопротивления между конденсирующимся паром и охлаждающей водой;
- увеличение среднего коэффициента теплоотдачи в десятки раз.
- существенное снижение недогрева охлаждающей воды до температуры насыщения.

Разработанный конденсатор смешивающего типа имеет и недостатки. К ним можно отнести необходимость в высококачественной подготовке охлаждающей воды, необходимость сооружения охлаждающей установки, соответствующей жестким эксплуатационным требованиям.

В целом же, применение смешивающих конденсаторов в паротурбинных установках средней мощности является перспективным направлением их совершенствования.

Список литературы

[1] Федоров В.А., Мильман О.О. Конденсаторы паротурбинных установок. –М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 560 с.

[2] Федоров В.А., Мильман О.О., Карышев А.К., Жинов А.А., Шевелев Д.В. и др. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в циркуляционных воздушных конденсаторах паротурбинных установок. –М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”, 2015, №5. - с.85-103

[3] Жинов А.А., Шевелев Д.В. Исследование влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электрической станции. –М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”, 2015, №1. - с.122-132

[4] Тарасов Е.В., Жинов А.А. Исследование эффективности бездеаэрационных схем ПТУ со смешивающими подогревателями // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, апрель 2016 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.

[5] Ермолов В.Ф., Пермяков В.А., Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л. Смешивающие подогреватели паровых турбин. –М.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.

[6] Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Обобщение опытных данных по конденсации пара на струях воды в условиях вакуума // Теплоэнергетика, 1970, №10

[7] Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Тепло- и массообмен при конденсации пара на струях воды // Теплоэнергетика, 1975, №11

[8] Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Конденсация на струях воды при поперечном движении пара // Теплоэнергетика, 1976, №4

[9] Тарасов Е.В., Жинов А.А., Кирюхин А.А., Смирнов И.И. Возможность применения смешивающего конденсатора в паротурбинных установках средней мощности. Материалы XIV молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2016». СПб – АО «ЦКБ МТ «Рубин», 2016. – с. 524-528.

Тарасов Евгений Витальевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tarasovevgeniy@outlook.com

Жинов Андрей Александрович - д-р техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

В.Д. Шкилев, И.В. Митина

ПРИМЕНЕНИЕ КРИОГЕННОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Общеизвестно, что одной из важнейших задач в энергетике является аккумулярование энергии. На сегодня существуют преимущественно гидравлические аккумулярующие системы применяющие насосы, закачивающие воду на определенную высоту, используя дешевую электрическую энергию ночного времени, и возвращая потенциальную энергию при пиковых нагрузках в дневное время, преобразовывая ее в электрическую с помощью гидравлических турбин (рис. 1).

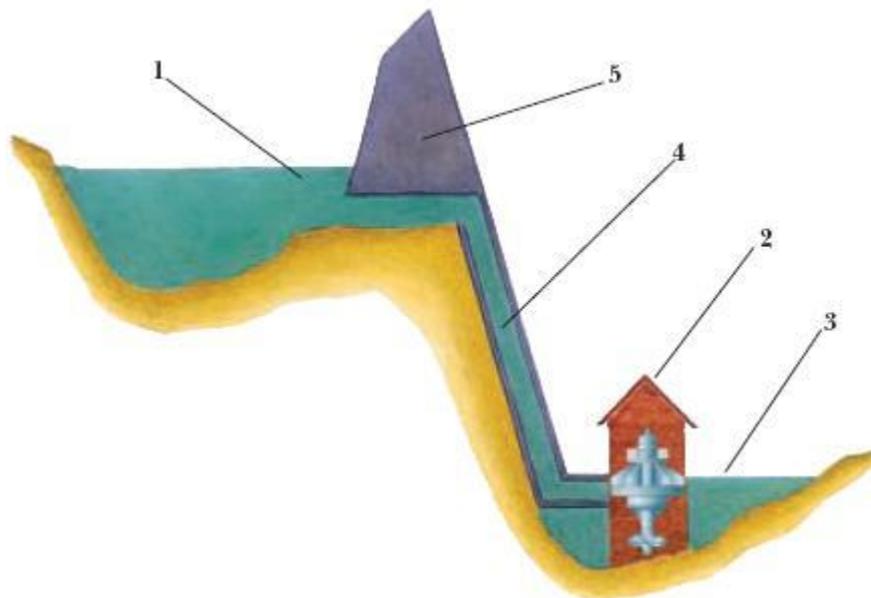


Рис. 1. Гидроаккумулирующая электростанция
1 – верхний аккумулярующий бассейн; 2 – здание электростанции;
3 – река; 4 – водовод; 5 – плотина

Однако для реализации этих систем требуется большой перепад высот, для которых нужна или гористая местность, или наличие объемных резервуаров под землей. На равнине создавать искусственно такие перепады экономически нецелесообразно. В отличие от гидроаккумулирующих станций, нуждающихся в огромных площадях и специфичном ландшафте с большим перепадом высот криогенные теплоаккумулирующие системы можно возводить практически в любом месте, а при необходимости разбирать и перевозить на новое место. Энергия у большинства потребителей ассоциируется с теплом, однако в данном случае при создании криогенной аккумуляющей станции нужно ориентироваться не на тепло, а на холод.

Основная часть. Принципиально новые возможности возникают при утилизации избыточной энергии, основанные на сжижении атмосферного воздуха для чего его нужно охладить до температуры ниже -196 C . Полученную жидкую смесь кислорода и азота (а это, как известно, и есть жидкий воздух) необходимо поместить в закрытом теплоизолированном термосе, в котором его можно хранить неделями с минимальными потерями, не превышающими один процент в сутки. Отобразить эту идею можно на символическом уровне в виде трехэлементной монады, центральное место в которой занимает криогенный аккумулятор жидкого воздуха, а остальные два островка представляют собой систему, преобразующую газообразный воздух в жидкое состояние, и систему, преобразующую сжиженный воздух снова в электрическую энергию (рис. 2). Символьный уровень понятен философам, но малоприменим для технического исполнения. Поэтому, остановимся более подробно отдельно на каждой из систем, раскрывая все ее основные компоненты.



Рис. 2. Криогенная теплоаккумулирующая система

Несомненным достоинством всей системы в целом является то, что все ее основные узлы хорошо проработаны в технике. Турбодетандеры, необходимые для получения жидкого воздуха, проработаны академиком Капицей в начале прошлого века и представляют собой разновидность турбины. У турбодетандера есть некоторые особенности в соплах и лопатках турбины. Не вдаваясь в конструкционные особенности, сам Капица называл турбодетандеры смесью паровой и гидротурбины.

Что касается основного элемента второй системы (имеется в виде криогенной турбины), то и здесь имеются серьезные проработки, правда не в классической энергетике, а в военной технике при создании гиперзвуковых ракетных двигателей (ГПВРД). Приоритет в этой части принадлежит России, как правопреемнику СССР. В далеком 1979 году Комиссия Президиума Совета министров СССР утвердила комплексный план научно-исследовательских работ по применению криогенного топлива для

авиадвигателей, в котором отдельное место было выделено для создания криогенной ГПВРД. Работы в этом направлении провел ЦИАМ им. Л.И. Баранова, который создал летающую лабораторию на основе зенитной ракеты 5В28 ЗРК С-200 и получившей название «Холод».

За последующие годы были введены известные комплексы С-300, С400 и так далее с использованием криогенных турбин. Передача этих работ в гражданскую сферу и доработка криогенной турбины на жидком воздухе (а не водороде как в криогенном ракетном двигателе Э-57), с проведением ресурсных испытаний, может стать прекрасным примером конверсии.

Все элементы криогенной аккумулирующей системы - сосуды Дьюара, турбодетандеры, криогенные турбины, криогенные форсунки, теплообменники и вся криогенная аппаратура известны с прошлого века и можно только удивиться тому, что такие удивительные отдельные элементы системы, выполненные преимущественно из нержавеющей стали, до сих пор не собраны в единый «пазл» криогенной теплоаккумулирующей системы.

Чтобы аккумулировать «временно не нужное электричество» в ночное время, нужно воздух охладить до жидкой смеси азота и кислорода, и во время дневных пиковых нагрузок подать жидкий воздух на промежуточный испаритель и раскрутить криогенную турбину с электрогенератором, а охлажденный воздух вернуть в атмосферу или использовать для систем кондиционирования. Учитывая наличие системы очистки воздуха перед сжижением, то на выходе из криогенной турбины будет воздух даже более высокого качества, чем на входе.

Предварительные расчеты показывают, что КПД такой аккумулирующей системы мало отличимо от КПД гидроаккумулирующих систем. Обратим внимание на то, что все оборудование криогенной аккумулирующей установки (может за исключением криогенной турбины) давно выпускается и не требует дополнительной сертификации. Система компрессоров и очистки от примесей – твердых частиц можно осадить на фильтрах, а влагу, углекислый газ отделить в известных адсорберах. Хранение жидкого воздуха можно реализовать при атмосферном давлении в стандартных криогенных емкостях с хорошей теплоизоляцией.

Значимость данного способа аккумулирования энергии будет существенно возрастать с применением криогенного теплоносителя не только в области производства и аккумулирования электрической энергии, но и в таких областях как двигателестроение или трубопроводного транспорта [3].

Выводы: Хранение жидкого воздуха намного безопасней, чем хранение углеводородов, а хранение основного компонента жидкого воздуха в виде жидкого азота даже применяют в системах пожаротушения. Использование криогенных аккумулирующих станций может стать демпфером для таких нестабильных аккумулирующих систем, построенных на ветроэнергетике или на гелиостанциях и оперативно гасить пиковые нагрузки независимо от наличия водных ресурсов и геологии в точке расположения.

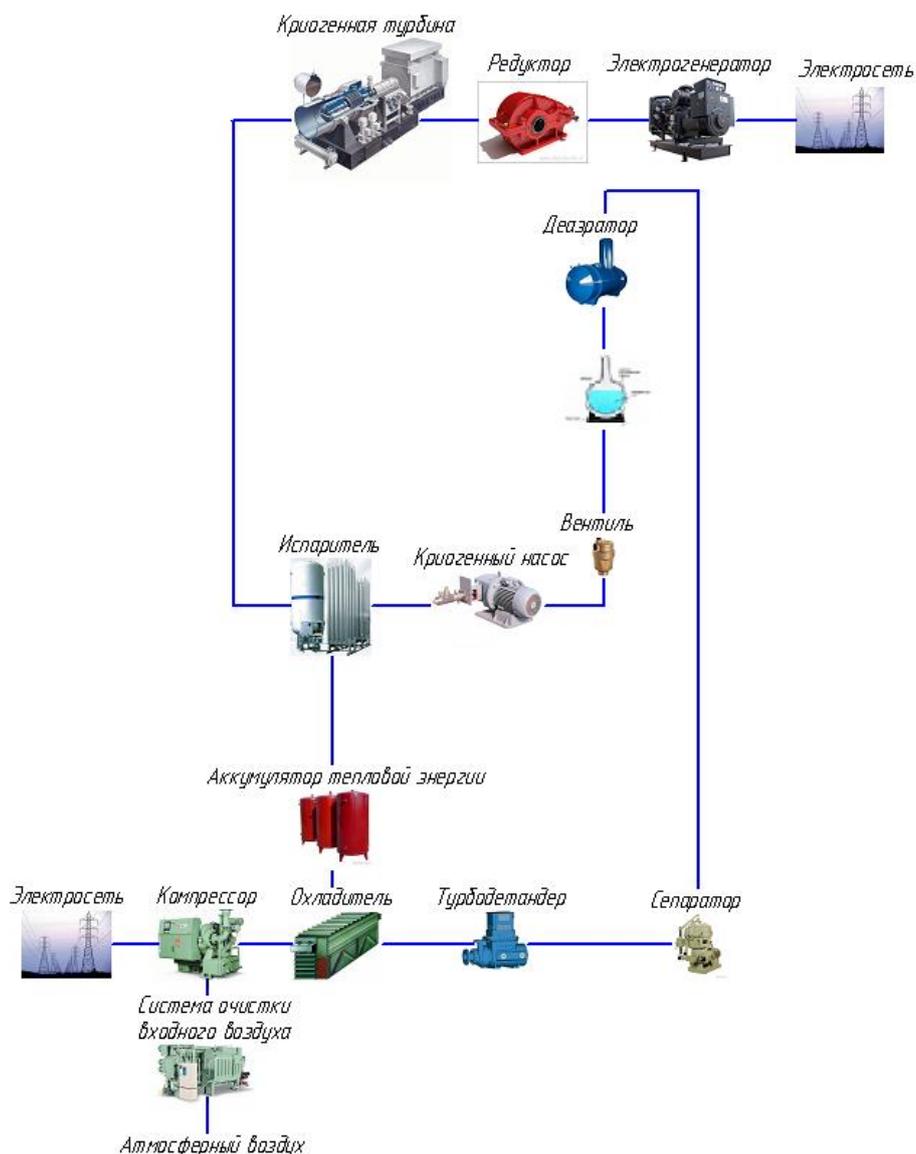


Рис. 3. Криогенная аккумулирующая система

Список литературы:

- [1] Синючин В.И., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции современной энергоэнергетики. – М.: ЭНАС, 2008, - 352 с.
- [2] Родионов В.Г. Оптимизация структуры генерирующих мощностей. Аккумуляторы – накопители энергии. Энергетика: проблемы настоящего и возможного будущего – М.: ЭНАС, 2010, с. 68 – 69.
- [3] Мартынюк Н.П., Шкилев В.Д. Авторское свидетельство РФ (положительное решение по заявке №2012148855) на Способ работы двигателя.

Шкилев Владимир Дмитриевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vladimir-shkilev@mail.ru

Митина Инна Валерьевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mitinainn@rambler.ru

Н.Э. Емельянов, А.К. Карышев

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ГТУ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СОПЛОВЫМ
АППАРАТОМ (РСА) В СИЛОВОЙ ТУРБИНЕ
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В связи с широким распространением газотурбинных двигателей средней мощности со свободной силовой турбиной в автономных энергетических, теплофикационных, парогазовых и газотранспортных установках целесообразно уделить внимание оценке эффективности применения регулируемой СТ и определению диапазонов такого регулирования на наиболее характерных режимах работы газотурбинных двигателей и установок для газотранспортных систем. В литературе имеются упоминания о возможном использовании регулируемых сопловых лопаток в части силовой турбины [1, 2, 3], как дополнительного регулирующего органа, наряду с топливным клапаном и регулируемым направляющим аппаратом компрессора, для наиболее эффективного управления установкой. Однако анализ большого числа работ по газотурбинным установкам наземного применения показал, что глубоких экспериментальных исследований регулируемых СТ практически не проводилось. Отметим, что в газотурбинных установках отечественного производства регулируемый сопловой аппарат ССТ не применяется.

Среди возможных причин скептического отношения производителей ГТУ и ГТД для наземного применения к использованию регулируемой силовой турбины называется [3] необходимость разработки поворотных узлов и уплотнений, надежно работающих при достаточно высоких температурах газового потока. Не менее существенной причиной является сложившееся мнение о пониженной эффективности регулируемых ступеней осевых турбин вследствие больших углов атаки рабочих лопаток, изменения осевых межвенцовых и радиальных зазоров в РСА. Причем по разным источникам [1, 2, 3 и др.] КПД ступени турбины при сопловом регулировании снижается не более, чем на 1,0...2,5%. Вместе с тем, есть значительный положительный эффект от применения РСА в одно- и двухступенчатых СТ: экономия топлива в холодное время года и при неполных нагрузках, повышение располагаемой мощности в летнее время и при ухудшении технического состояния турбомашин, а также улучшение динамики регулирования установкой в целом.

Таким образом, в научно-технической литературе отражается противоречивое отношение к использованию РСА в силовой турбине, и, кроме

[8], встречаются только приближенные оценочные способы расчета КПД регулируемых ступеней и турбин.

Поворот лопаток соплового аппарата турбины позволяет [4, 7]:

- регулировать расход газа через турбину;
- изменять формы треугольников скоростей (это снижает потери в лопаточных решетках на нерасчетных режимах);
- перераспределять работу между ступенями турбины и ее каскадами.

Использование регулируемого соплового аппарата в силовой турбине, как второго регулирующего фактора, при разных программах регулирования позволяет эксплуатировать двигатель в широком диапазоне режимов без существенного снижения КПД и с минимальным расходом топлива.

Расчетное исследование по определению КПД регулируемой ступени при повороте лопаток РСА проводилось для следующих начальных параметров, характеризующих ступень на номинальном режиме, по методике, изложенной в [8]:

$\varphi_0 = 0,97$, $\psi_0 = 0,96$ - значения коэффициентов скорости, характерные для регулируемой ступени при расчетном положении сопловых лопаток;

$\alpha_{10} = 19,75^\circ$; $\rho_0 = 0,32$; $\overline{c_{a0}} = 0,45$.

Результаты расчета представлены на рис.1 сплошными линиями. Графически показаны изменения окружного КПД по полным параметрам, изображены графики зависимостей мощности установки и степени реактивности ступени от угла α_1 при повороте лопаток РСА.

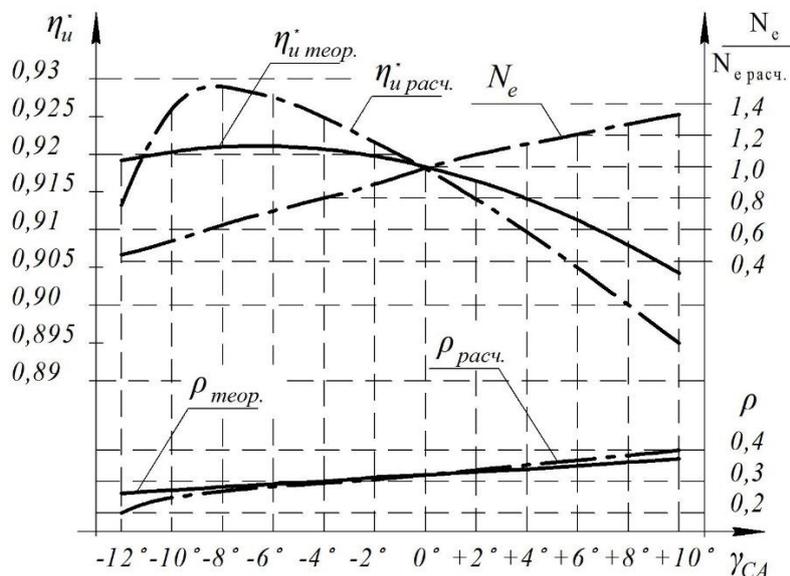


Рис. 1. Изменение внутреннего КПД и степени реактивности ступени с РСА при повороте сопловых лопаток

Анализ результатов расчетов, представленных на рис. 1, позволяет сделать заключение о том, что уменьшение угла выхода потока из СА, вызванное прикрытием лопаток РСА, приводит к росту мощностного КПД. По-видимому, это объясняется не столько изменением профильных потерь,

сколько положительным влиянием на КПД уменьшающегося угла α_1 , что наиболее выражено при больших его номинальных значениях.

Поворот сопловых лопаток в противоположном направлении, т.е. сопровождающийся увеличением проходного сечения на выходе из РСА и ростом угла α_1 , приводит к резкому падению внутреннего КПД, что обусловлено как увеличением профильных потерь из-за больших отрицательных углов атаки, так и негативным влиянием на него возросших значений углов α_1 .

Поворот сопловых лопаток в сторону прикрытия уменьшает степень реактивности ρ и коэффициент расхода c_a , что до достижения нулевой реактивности в корне лопаток благоприятно для роста мощностного КПД. Из рис. 1 видно, что уменьшение площади проходного сечения за РСА на приводит к незначительному изменению КПД из-за большего влияния снижения c_a и α_1 по сравнению с уменьшением ρ и ростом профильных потерь, особенно при номинальных углах выхода. При увеличении $F_{ca} \eta^*$ снижается, так как влияние увеличения c_a и α_1 на КПД более существенно, чем увеличение степени реактивности.

Однако, точно определить, как изменяются коэффициенты ψ, ϕ при нерасчетном обтекании лопаток – довольно затруднительно. К тому же, степень реактивности рабочих лопаток при уменьшении расхода сильно изменяется. Влияние этого фактора на эффективность ступени сложно учесть.

Численный эксперимент позволяет учесть эти факторы и более точно определить изменение КПД ступени.

Для расчета были построены трехмерные модели профилей соплового аппарата и рабочей лопатки. В качестве допущения принято, что потери в радиальном зазоре и потери на трение и вентиляцию диска не зависят от поворота соплового аппарата и остаются постоянными. Основное влияние на эффективный КПД турбины оказывает изменение окружного КПД, вызванное нерасчетным обтеканием сопловых и рабочих лопаток. Наибольший интерес представляла картина течения в рабочих лопатках, т.к. предполагалось, что именно в них присутствуют явления, значительно снижающие КПД турбины.

Для наглядного представления течения в ступени турбины приводятся картины распределения основных параметров в граничных сечениях.

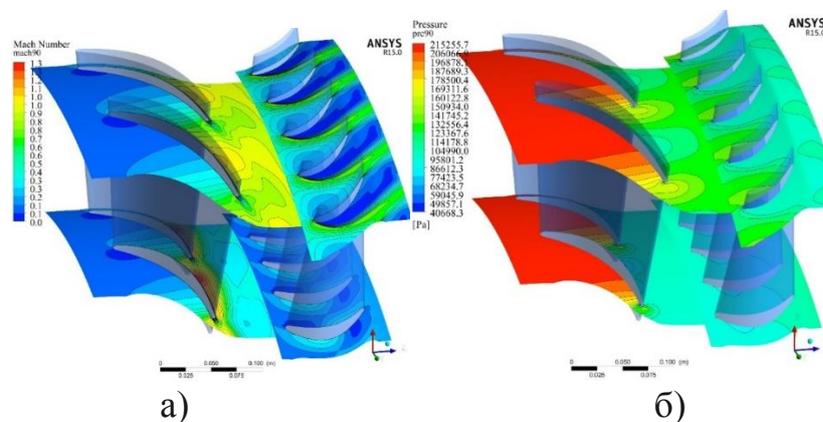


Рис. 2. Распределение чисел Маха(а) и давлений (б) при угле поворота СА -14 градусов

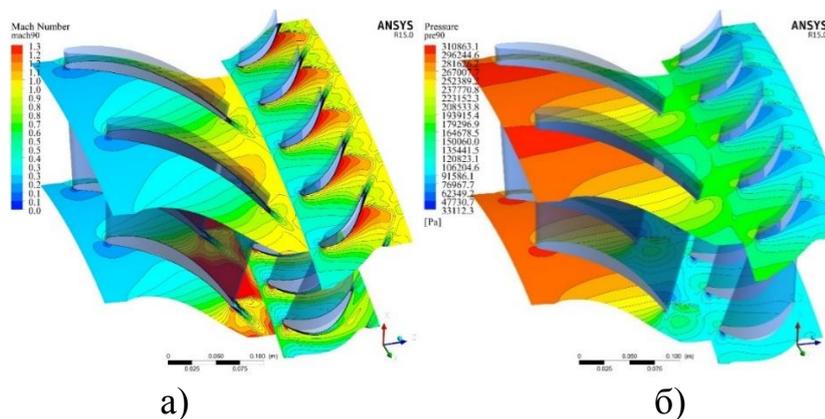


Рис. 3. Распределение чисел Маха (а) и давлений (б) при расчетном угле установки СА

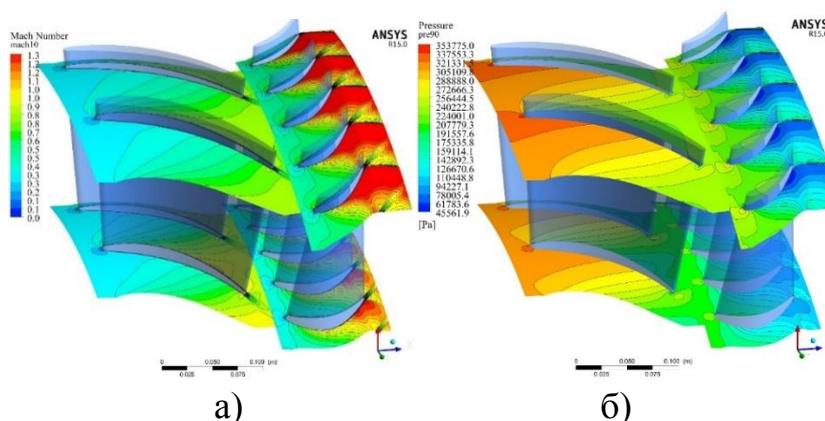


Рис. 4. Распределение чисел Маха (а) и давлений (б) при угле поворота СА +10 градусов

Сравнение результатов численного эксперимента и аналитического расчета показало хорошую сходимость.

По результатам численного эксперимента построены зависимости изменения мощности силовой турбины и изменения окружного КПД при повороте лопаток соплового аппарата. Экспериментальные данные нанесены на рис.1 сплошными линиями.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что силовая турбина с РСА достаточно эффективно может работать при частичных нагрузках. Целесообразно поворачивать сопловые аппараты на угол до 12 градусов в сторону прикрытия (чтобы избежать отрицательной степени реактивности у корня рабочих лопаток) и до 8 градусов в сторону открытия, т.к. дальнейшее увеличение расхода приводит к значительному росту чисел Маха у периферии рабочих лопаток и к волновым потерям.

Основными недостатками РСА являются сложность и недостаточная надежность самого механизма поворота лопаток и всех элементов конструкции, необходимость непрерывного регулирования поворотными направляющими аппаратами компрессора. Создание надежного органа

управления силовой турбиной требует конструкции, способной работать в условиях повышенных температур и сухого трения.

Несмотря на указанные трудности, в настоящее время ведутся научные исследования и конструктивные проработки по вопросам использования РСА в силовой турбине газоперекачивающих агрегатов.

Список литературы

[1] Варивода О.А., Васин О.Е., Ревзин Б.С. Экономический эффект от оптимизации программы регулирования в приводных ГТУ. *Газотурбинные технологии*, 2001, № 4, С.32–33.

[2] Комаров О.В. *Исследования и одномерная оптимизация проточной части свободных силовых турбин с регулируемой первой ступенью приводных ГТУ и ГТД*. Автореф. дис. к.т.н. Екатеринбург, 2005, 24 с.

[3] Михальцев В.Е., Панков О.М., Юношев В.Д. *Регулирование и вспомогательные системы газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Машиностроение, 1982. 257 с.

[4] Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. *Теория авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1977. 312 с.

[5] Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. Москва, Энергоатомиздат, 1985. 304с.):

[6] Ревзин Б.С. *Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом*. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2002. 269 с.

[7] Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. *Теория и расчет авиационных лопаточных машин*. Москва, Машиностроение, 1986. 432 с.

[8] Холщевников К.В. *Теория и расчет авиационных лопаточных машин*. Москва, Машиностроение, 1970. 610 с.

Емельянов Николай Эдуардович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: emelyanov92-mail@yandex.ru

Карышев Анатолий Константинович - канд. техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru

Е.В. Тарасов, А.А. Жинов

СМЕШИВАЮЩИЕ ПОДОГРЕВАТЕЛИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В отечественной энергетике значительная доля электрической энергии вырабатывается на паротурбинных энергоблоках, входящих в состав ТЭС, ТЭЦ и ГРЭС. В связи с этим повышению эффективности термодинамического цикла паровых турбомашин уделяется особое внимание, но эффективность основных агрегатов энергоблоков близки к предельным и повышение эффективности всей паротурбинной установки в целом видится возможным, в основном, за счет вспомогательного оборудования. Как правило, тепловые схемы паротурбинных установок средних и больших мощностей имеют развитую систему регенеративного подогрева. Обычно она включает в себя группы поверхностных теплообменных аппаратов – подогревателей низкого и высокого давления, в которых последовательно нагревается конденсат, в части низкого, а затем и питательная вода, в части высокого давления.

Зачастую, теплообменное оборудование, входящее в состав паротурбинных установок, генерирующих на сегодня электрическую энергию, сильно изношено и требует капитального ремонта или вовсе замены. В таком случае актуально проведение модернизации [1] системы регенеративного подогрева паровых турбин, с применением подогревателей низкого давления смешивающего типа, так как по данным зарубежных и отечественных источников такие теплообменные аппараты вносят практически 55% от общей доли повышения экономичности за счет модернизации системы регенеративного подогрева паротурбинных установок [2].

Смешивающие подогреватели имеют наилучшие условия для протекания процессов теплообмена между греемой средой – конденсатом, и греющей – паром низкого давления из отбора турбины, за счет их непосредственного контакта. В таком случае наличие термического сопротивления исключено, оно присуще только традиционным, поверхностным подогревателям и является одним из основных их недостатков, существенно влияющих на экономичность системы регенеративного подогрева и работы паротурбинной установки в целом.

В зависимости от ряда различных факторов, в отечественной теплоэнергетике установлена величина нормированного недогрева в поверхностных подогревателях. Она составляет порядка 2–4 °С. На практике, данная величина достигает значений 10–15 °С. Это означает, что часть тепловой энергии потока пара является потерянной, что негативно сказывается на эффективности теплообменного аппарата. Вследствие отсутствия трубчатых поверхностей нагрева, а, следовательно, и термического сопротивления, данный параметр у смешивающих подогревателей близится к нулю.

Целесообразное и первоочередное применение смешивающих подогревателей – вакуумные отборы турбины, где содержание воздуха во влажном или слабо перегретом паре относительно высоко. В таком случае реализуется стабильный и максимально возможный нагрев конденсата, так как смешивающие подогреватели заметно менее чувствительны к присутствию неконденсирующихся газов [3].

Конструктивно, смешивающие подогреватели низкого давления выполняются как горизонтального типа (Рис.1), данные конструктивные решения предложены ПАО «НПО ЦКТИ», так и вертикального (Рис.2).

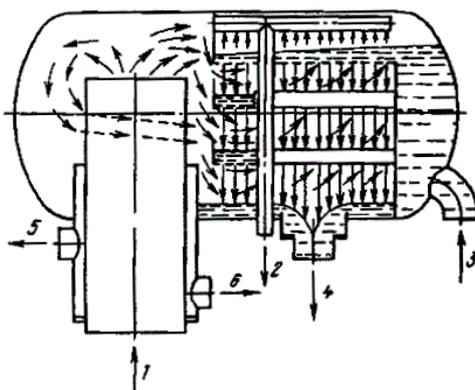


Рис.1. Смешивающий подогреватель низкого давления горизонтального типа
 1 – подвод греющего пара; 2 – отвод ПВС в конденсатор; 3 – подвод основного конденсата; 4 – отвод конденсата; 5 – аварийный сброс конденсата в конденсатор; 6 – аварийный отвод конденсата во всасывающий коллектор

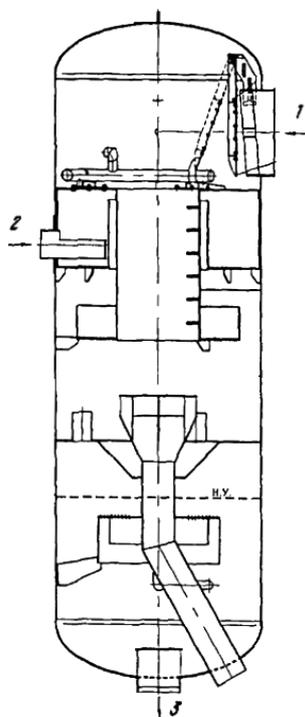


Рис. 2. Смешивающий подогреватель низкого давления вертикального типа
 1 – подвод пара; 2 – подвод основного конденсата; 3 – отвод конденсата

К достоинствам смешивающих подогревателей низкого давления можно отнести:

- простота конструкции, изготовления и обслуживания, а, следовательно, и снижение затрат на производство;
- повышенная надежность (отсутствие трубчатой поверхности теплообмена);
- стабильный и максимально возможный нагрев конденсата при относительно высоком содержании воздуха;
- возможность деаэрирования конденсата.

Последнее из преимуществ было подробно изучено и реализовано специалистами ПАО «НПО ЦКТИ» и ПАО «ВТИ им. Дзержинского». Ими разработаны концепции бездеаэраторных тепловых схем с применением смешивающих подогревателей, которые были применены на реально действующих установках [4,5,6]. Также, в [7] рассмотрено применение бездеаэраторных тепловых схем паротурбинных установок средней мощности на примере паротурбинной установки производства ПАО «Калужский турбинный завод».

Немаловажным фактором при внедрении смешивающих подогревателей низкого давления в систему регенеративного подогрева паровых турбин является выбор схемы включения. Основными схемами являются гравитационная (Рис.3), в которой группа смешивающих подогревателей располагается на различных высотах относительно друг друга и последовательная, с перекачивающими насосами (Рис.4). Рекомендации по выбору схем включения и расположения вспомогательного оборудования представлены в [3, 4].

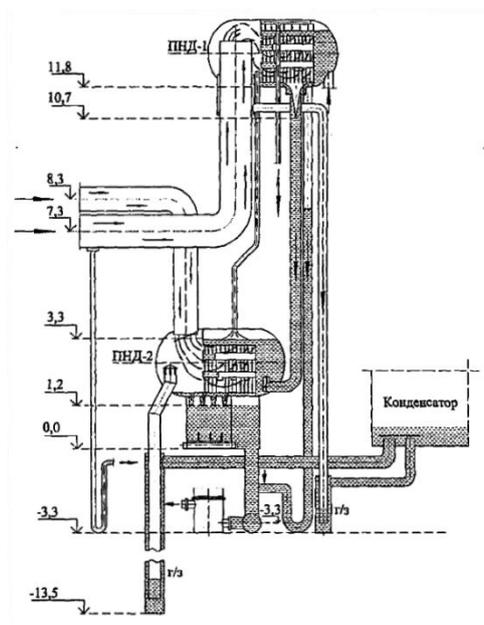


Рис. 3. Гравитационная схема включения группы смешивающих подогревателей низкого давления

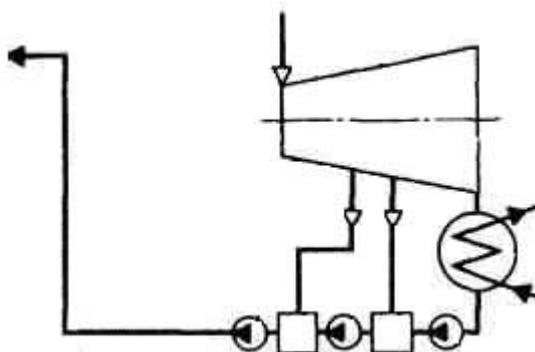


Рис. 4. Последовательная схема включения группы смешивающих подогревателей низкого давления

Одним из главных недостатков контактной системы регенеративного подогрева является возможность заброса конденсата в проточную часть паровой турбины при несовершенной системе защиты и автоматики. Данная проблема подробно рассмотрена в [2, 8]. Попадание влаги в проточную часть обусловлено наличием обратного потока пара, возникающего при вскипании конденсата, вследствие сброса нагрузки паровой турбины. Это приводит к разгону ротора выше номинальных частот вращения. Вопросы набухания уровня, а также перспективные решения по системе защиты подробно освещены в [8].

В настоящее время изучением вопросов, связанных со смешивающими подогревателями низкого давления ведется в следующих организациях: ПАО «НПО ЦКТИ», ПАО «ВТИ им. Дзержинского», ПАО «ЛМЗ».

Несмотря на простоту рассматриваемых теплообменных устройств, физические процессы, протекающие в них, остаются до сих пор актуальной задачей исследования, поэтому их проектирование представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Зачастую, обобщенные закономерности теплообмена при конденсации пара на струях жидкости получены эмпирическим путем. При проектировании же конкретных устройств, требуется рассмотрение частных случаев, а, следовательно, требуется и оптимизация методик расчета, основанных на обобщенных эмпирических законах.

Основной трудностью является составление корректной методики теплового и гидравлического расчета смешивающих подогревателей низкого давления.

В настоящее время, совместно, специалистами КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана и ПАО «Калужский турбинный завод» рассматривается возможность создания методики теплового и гидравлического расчета смешивающих подогревателей низкого давления для тепловых схем паротурбинных установок средней мощности.

Таким образом применение смешивающих подогревателей низкого давления в системе регенерации паротурбинных установок является акту-

альным направлением при реконструкции, модернизации или введении тепловых электростанций, но требует тщательного изучения методик расчета таких теплообменных аппаратов, выбора схемы включения, а также проработки системы защиты и автоматики, для исключения создания аварийной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

[1] *Тарасов Е.В., Жинов А.А.* Перспективные способы повышения КПД паротурбинных установок // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы всероссийской научно-технической конференции, 24-26 ноября 2015 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

[2] *Сухоруков Ю.Г., Ермолов В.Ф., Трифонов Н.Н.* Некоторые вопросы повышения экономичности системы регенерации низкого давления паровых турбин. Теплоэнергетика, №12, 2008, с.62–65

[3] *Ермолов В.Ф., Пермяков В.А., Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л.* Смешивающие подогреватели паровых турбин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.

[4] *Ефимочкин Г.И.* Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.

[5] *Мороков В.Ф.* Тепловой расчет систем контактной регенерации паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 136 с.

[6] *Сухоруков Ю.Г., Трифонов Н.Н., Ермолов В.Ф., Коваленко Е.В.* Бездеаэрационные тепловые схемы: выбор решений. Энергетика и промышленность России, №19, 2008, с.17

[7] *Тарасов Е.В., Жинов А.А.* Исследование эффективности бездеаэрационных схем ПТУ со смешивающими подогревателями // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 19-21 апреля 2016 г. Т.1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – с. 130-134.

[8] *Сухоруков Ю.Г., Ермолов В.Ф., Трифонов Н.Н.* Методика расчета набухания уровня воды и защитных средств, исключаяющих ее попадание в проточную часть турбины с обратным потоком пара из смешивающих подогревателей. Теплоэнергетика, №2, 2008, с.72–77

Тарасов Евгений Витальевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: tarasovevgeniy@outlook.com

Жинов Андрей Александрович - д-р техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

С.В. Ибрагимов, В.Ю. Ильичев

УСИЛИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ОПОРЫ ТУРБИН И МЕТОДЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Опорные подшипники фиксируют положение ротора относительно статора, воспринимая статическую нагрузку от веса ротора и паровые (аэродинамические) усилия, действующие на ротор в ступенях с парциальным подводом пара.

При поперечных колебаниях ротора на подшипник действуют дополнительные переменные усилия.

Паровые статические усилия состоят из двух составляющих: неуравновешенных сил в парциальных ступенях и поперечных сил, возникающих в надбандажных уплотнениях вала при статическом смещении вала или колеса по отношению к центру расточки уплотнения. Усилия в парциальной ступени при сопловом регулировании зависят по величине и направлению от последовательности открытия клапанов и режима работы (мощности) турбины. Усилия в уплотнениях пропорциональны смещению центра вала по отношению к центру расточки уплотнения. При центральном расположении вала (колеса) эти усилия равны нулю.

Основная составляющая нагрузки подшипника определяется, как правило, весом ротора, приходящегося на подшипник. Для многоопорных роторов на многих подшипниках реакции в опорах являются статически неопределимыми величинами и их значения в процессе эксплуатации меняются вследствие взаимных смещений ступеней подшипников, вызываемых тепловыми удлинениями элементов корпуса и фундамента машины. При монтаже машины стремятся обеспечить такие условия работы, при которых каждый подшипник воспринимает усилие лишь от веса ротора, отсоединенного от других роторов, т.е. при опоре каждого ротора на собственные два подшипника. [1]

Упорные подшипники воспринимают статические обусловленные давлением рабочей среды осевые усилия, приходящиеся на диски, рабочие венцы и уступы ротора.

Важнейшей задачей при проектировании турбины является снижение осевого усилия, причинами возникновения которого являются:

- статическая разность давлений по обе стороны рабочих лопаток;
- статическая разность давлений по обе стороны дисков;
- разности осевых составляющих скоростей пара на входе и выходе рабочих лопаток;
- статические разности давлений, действующих на уступы ротора;
- наклон оси ротора;
- наличие различного рода дополнительных нагрузок, обусловленных конструктивными особенностями турбин, а также дефектами монтажа.

Осевое усилие, воспринимаемое подшипником при жестком сочленении роторов, является алгебраической суммой больших по абсолютной величине усилий, возникающих на отдельных участках каждого ротора. При установившемся или медленно изменяющемся режиме работы осевое усилие, как правило, небольшое, но даже малые отклонения от монтажных величин зазоров в диафрагменных уплотнениях, зазоров между диафрагмой и диском, проходных сечений сопел и лопаток могут вызвать существенные изменения нагрузки на осевой подшипник.

Усилия, возникающие при быстропереходных режимах работы, не всегда могут быть определены при проектировании турбин. При быстропереходных режимах суммарная осевая нагрузка, воспринимаемая подшипником, зависит от скорости и соответствия изменения расходов пара по цилиндрам. Вследствие этого осевое усилие в одном из цилиндров может резко измениться, а в другом остаться прежним, что обусловит существенный рост нагрузки на подшипник.

В многоступенчатой турбине осевые усилия являются в основном результатом усилий, действующих на рабочие лопатки, диски, уступы ротора и гребни лабиринтных уплотнений. Суммарные осевые усилия зависят от расхода, начальных параметров пара и его конечного давления, состояния диафрагменных и концевых уплотнений и чистоты проточной части турбины. [3]

Составляющая осевого усилия, действующего на рабочие лопатки при полном подводе пара, определяется как сумма усилий, вызванных статической разностью давлений по обе стороны лопаток и изменения количества движения пара в осевом направлении.

Вследствие разности давлений по сторонам диска последний также испытывает осевое усилие. Абсолютное значение и направление составляющей осевого усилия зависит от давления в камере перед диском. Последнее неравномерно по высоте диска и определяется количеством пара, проходящего через осевой зазор между диафрагмой и диском у корня лопаток, радиальный в диафрагменном уплотнении и через разгрузочные отверстия.

Если же суммарное усилие на роторе оказывается значительным, то с целью уменьшения нагрузки на подшипник применяют разгрузочный поршень (думмис). Для этого увеличивают диаметр переднего концевого уплотнения, создавая уравнивающее усилие, направленное навстречу осевому усилию, которое возникает при расширении пара в проточной части.

Еще одним вариантом снижения осевого усилия является двухпоточное исполнение цилиндра. В этом случае осевое усилие на роторе может возникнуть лишь в результате различных технологических отклонений размеров при изготовлении элементов проточных частей отдельных потоков, а также при изменении проходных сечений в процессе эксплуатации.

Поиск новых путей решения данной проблемы ведется и в настоящее время, поскольку данный вопрос остается актуальным как для паровых турбин, так и для газовых. Например, группой российских и украинских инженеров было разработано устройство для двухсторонней передачи осевого усилия. Данное изобретение относится к паротурбостроению и предназначено для совершенствования турбин, находящихся в эксплуатации.

Устройство для двухсторонней передачи осевого усилия связывает корпус турбины и опору корпуса, расположено вблизи плоскости скольжения опоры по фундаментной раме и в продольной плоскости симметрии турбины, включает выступ на корпусе, поперечный зацеп и захват, при этом зацеп приварен под выступом на корпусе, захват выполнен в виде скобы, установленной на опоре корпуса и охватывающей снизу зацеп на выступе корпуса, а по обе стороны зацепа между ним и скобой установлены горизонтальные толкающая и тянущая вставки. Данная разработка была выполнена на базе уже известного устройства. Недостатками устройства, принятого за аналог, является то, что усилие, передаваемое с корпуса на опору, создает момент с силой трения на плоскости скольжения опоры по фундаментной раме; момент стремится опрокинуть опору, увеличивая локальное давление на плоскость скольжения и саму силу трения, вызывая заедание трущихся поверхностей и, в конечном счете, расцентровку и вибрацию ротора. Кроме того, разнесение шпонок в поперечном направлении при наличии разности температур между правым и левым фланцами корпуса турбины приводит к развороту опоры в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, что вызывает заклинивание осевой (продольной) шпонки между опорой и фундаментной рамой.

Для устранения этих недостатков целесообразно уже при изготовлении турбины расположить указанное устройство вблизи плоскости скольжения опоры по фундаментной раме и в продольной плоскости симметрии турбины.

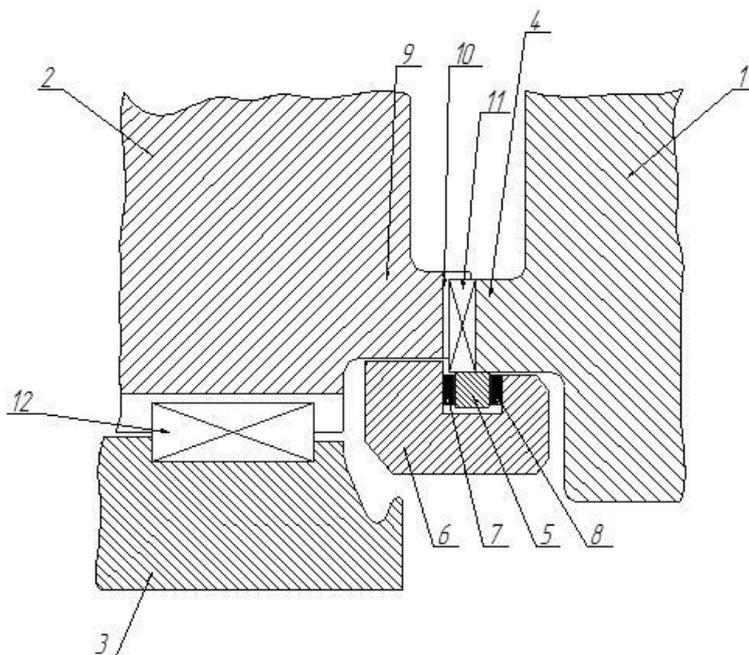


Рис. 1 Устройство для двухсторонней передачи осевого усилия

Устройство для двухсторонней передачи осевого усилия (вариант 2) связывает корпус 1 турбины и опору 2 корпуса. Устройство расположено

вблизи плоскости скольжения опоры 2 по фундаментной раме 3 и в продольной плоскости симметрии турбины. Устройство включает выступ 4, поперечный зацеп 5 и захват 6. Зацеп 5 установлен на опоре 2 корпуса 1, захват 6 выполнен в виде скобы, приваренной под выступом 4 на корпусе 1 и охватывающей снизу зацеп 5 на опоре 2 корпуса 1. По обе стороны зацепа 5 между ним и скобой-захватом 6 установлены горизонтальная толкающая 7 и тянущая 8 вставки. Для стопорения вставки 7 и 8 могут быть загнуты на зацеп 5 (не показано). В приливе 9 опоры 2 выполнен паз 10, в который входит вертикальная центрирующая шпонка 11, являющаяся частью выступа 4. Между опорой 2 и фундаментной рамой 3 установлена осевая (продольная) шпонка 12. [2]

Устройство работает следующим образом. При работе турбины есть периоды нагрева (пуск) или охлаждения (остановка) корпуса 1. Он соответственно удлиняется или укорачивается, а толкающее или тянущее усилие передается на опору 2, скользящую по фундаментной раме 3 вдоль осевой шпонки 12.

Как уже было сказано выше, данная проблема является актуальной и по сей день ведется поиск ее решения. Появляется множество достаточно перспективных вариантов модернизаций уже известных конструкций и устройств, предназначенных для передачи и уменьшения осевых усилий.

Список литературы

[1] *Костюк А.Г.* Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов – 3-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.: ил.

[2] *Орлик В.Г., Вайнштейн Л.Л., Филаретов М.А., Чернышов В.Г., Матюшин А.В., Гнездилов Ю.И., Зинченко А.Н.* Устройство для двухсторонней передачи осевого усилия. Пат. № 2227213 Российская Федерация, опубл. 20.04.2004.

[3] *Сережкина Л.П., Зарецкий Е.И.* Осевые подшипники мощных паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.: ил.

[4] *Смоленский А.Н.* Конструкция и расчет деталей паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1964. – 467 с.

[5] *Трухний А.Д.* Стационарные паровые турбины. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.: ил.

Ибрагимов Станислав Валерьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ibragish94@gmail.com

Ильичев Владимир Юрьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

А.А. Сидоров, А.С. Голиков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДАВЛЕНИЯ В ВЫХЛОПНОМ ОСЕРАДИАЛЬНОМ ПАТРУБКЕ ТУРБИН НА ВИБРАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Эффективность и надежность турбоустановки существенно зависит от особенностей совместной работы последней ступени турбины и выхлопного патрубка. Наиболее сильно это сказывается для приводных турбин конденсационного типа с переменной частотой вращения и развитой проточной частью.

По конструктивным соображениям пар в конденсатор отводится с помощью осерадиальных патрубков, то есть под прямым углом к оси вращения. В таких каналах наблюдается большая неоднородность статического давления по периметру проходного сечения, вызванная переменным по окружности аэродинамическим сопротивлением. Эта ситуация сохраняется независимо от конструкции патрубка. Помимо этого, неоднородность потока вызывается также наличием ребер, качеством монтажа патрубка и другими факторами.

Данное явление отмечено в литературе [1, 2, 3]. Однако, его влияние на вибрационные характеристики лопаток последних ступеней, недостаточно изучено.

Для определения степени влияния этого явления была создана экспериментальная установка, на которой и будет произведена серия опытов с различными сериями профилей рабочих лопаток.

Основными узлами установки (рис.1) являются, решетка профилей турбинных лопаток с подпружиненным профилем 1, и генератор неравномерности (рис.2), расположенный под решеткой профилей, создающий перепад давления, полученный экспериментально при продувке модели выхлопного патрубка (рис.3).

При вращении генератора с переменной частотой через отверстие на выходе создается волна возмущения, которая воздействует на подпружиненный профиль и при определенных условиях, возбуждающая колебания с повышенной амплитудой, регистрируемой с помощью измерительной аппаратуры.

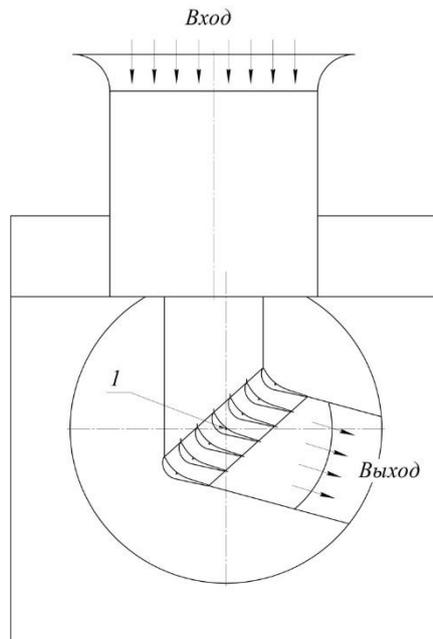


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

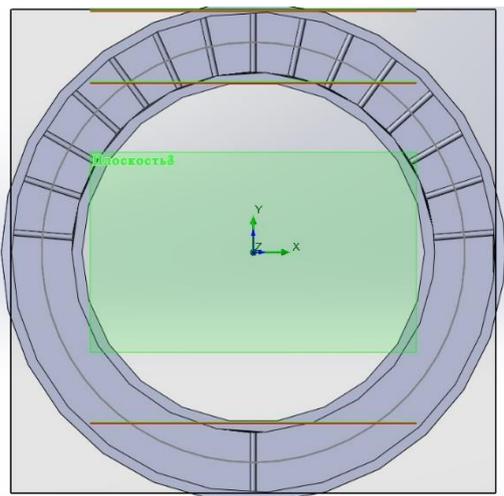


Рис. 2. Генератор неравномерности

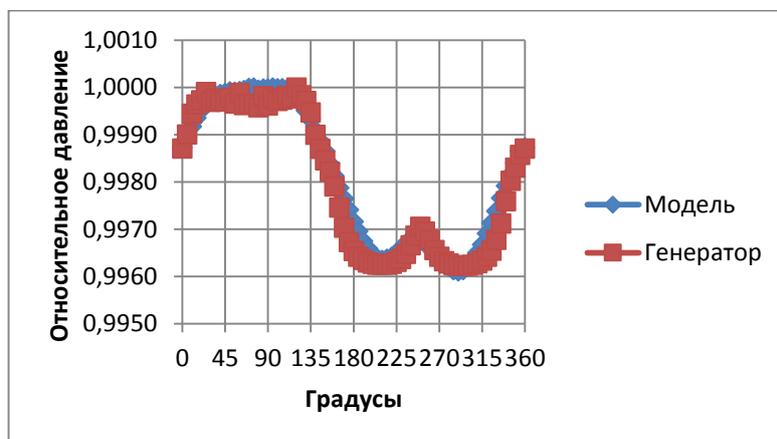


Рис. 3. Сравнение неоднородности давления, возбуждаемого генератором и полученной в выхлопном патрубке

По итогам экспериментов будут получены зависимости, которые позволят определить степень влияния эффекта неравномерности давления на входе в патрубок и учесть его при проектировании новых рабочих лопаток или ремонте старых.

Список литературы

[1] *Дейч М.Е., Зарянкин А.Е.* Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин, М.: Энергия, 1970- 332 с.

[2] *Голиков А. А., Сидоров А.А.* Экспериментальные исследования неоднородности давления в модели выходного патрубка паровой турбины малой мощности, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение», 2014. - №5. - с. 25-32

[3] *Голиков А. А., Сидоров А.А., Полникова Т.В.* Влияние диффузора на окружающую неравномерность давления газа в выходном патрубке турбины, Известия высших учебных заведений. Машиностроение 2015. - №6. - с. 20-25

Сидоров Альберт Александрович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sidpol1@rambler.ru

Голиков Андрей Сергеевич – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: golickov.an.kfmgtu@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В МАШИНОСТРОЕНИИ..... 3

Крюков М.В., Попков В.В.

Автоматизация проектирования технологических процессов листовой
штамповки..... 4

Попков В.М., Воронин В.К.

Актуальные проблемы Российского машиностроения 7

Соколова И.Д., Свитка А.С.

Анализ методов контроля состояния режущего инструмента 10

Агеев Б.Н., Малышев Е.Н.

Анализ формообразующих систем..... 15

Зудин С.В.

Влияние конструктивных параметров резьбы на ее прочность 19

Карабахина Т.Ю., Карабахин В.Г.

Выбор материала упругого элемента для закрепления труб
теплообменных аппаратов методом прессовой раздачи 21

Демин Ю.С., Устинов И.К.

Выбор современных средств измерения для инструментальных систем ... 23

Потемкин В.Ю., Санова Л.А.

Изготовление матриц пресс-форм методом гальванопластики 25

Зенкин Н.В., Варичкин И.А.

Исследование влияния различных видов СОЖ на шероховатость
поверхности при фрезеровании 30

Бысов С.А., Юхимец Р.М.

Концентрация операций обработки и сборки как расширение
технологических возможностей оборудования 34

Исаков И.Н.

Метод смещения координат на токарных автоматах продольного
точения с ЧПУ 38

Мусохранов М.В., Савина Ю.А.

Методика проведения эксперимента для анализа факторов влияющих
на качество поверхности 40

Андросов А.Ю., Хайченко В.Е.

Моделирование операций технологического процесса
в литейном производстве..... 43

<i>Волков А.В., Устинов И.К.</i> О критериях оценки погрешностей определения усилия резания	48
<i>Левин А.Д., Вяткин А.Г.</i> Обзор методов выполнения разделительных операций листового материала.....	53
<i>Зенкин Н.В., Барков А.В.</i> Обзор методов определения жесткости технологической системы	57
<i>Соколова И.Д., Болдычев К.В.</i> Обзор современных систем автоматизированного проектирования, используемых в машиностроении	60
<i>Демин Ю.С., Соколова И.Д.</i> Обзор станкоинструментальной отрасли в России	64
<i>Калмыков В.В., Кузнецов И.В., Барина Д.А.</i> Оптимизация вспомогательного времени при обработке заготовок на станках с ЧПУ	67
<i>Попова Т.В., Вяткин А.Г.</i> Особенности определения контактного трения при обработке давлением	69
<i>Кузнецов И.В., Барина Д.А., Антонюк Ф.И.</i> Оценка погрешности диаметра цилиндрической заготовки при холодной осадке	71
<i>Иванченко Е.С., Вяткин А.Г.</i> Повышение точности выполнения операций с использованием технологической оснастки	74
<i>Лепченков А.В., Калмыков В.В.</i> Показатели качества поверхностного слоя деталей машин	77
<i>Мусохранов М.В., Смирнов О.О.</i> Показатели качества поверхностного слоя сопрягаемых деталей	79
<i>Сафронов Н.М., Калмыков В.В.</i> Преимущества повременно-премиальной формы оплаты труда в бережливом производстве	82
<i>Мкртчян А.Б., Антонюк Ф.И.</i> Применение статистических методов анализа к оценке изменения диаметра цилиндра при холодной осадке.....	84
<i>Исаков И.Н.</i> Сокращение подготовительно-заключительного времени обработки за счет группирования деталей по используемому инструменту	86
<i>Филиппова И.А., Хайченко В.Е.</i> Состояние и перспективы развития литейного производства в России.....	89

<i>Калмыков В.В., Федорова О.С.</i> Статистическое оценивание точности и шероховатости поверхности в результате точения	93
<i>Вяткин А.Г., Бычков Д.И.</i> Экспериментальное исследование влияния факторов на упругие деформации при установке алюминиевых заготовок на плоские опоры....	96
СЕКЦИЯ 2. ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГОПРОИЗВОДСТВА	99
<i>Кухто А.В., Чернова Т.Г.</i> Анализ особенностей изготовления тонкостенных сварных конструкций из стали 30ХГСА.....	100
<i>Федоренко Г.В., Зыбин И.Н.</i> Восстановление детали “стакан” способом электроконтактной наварки проволокой.....	102
<i>Орлик Г.В., Орлик А.Г., Нестеров А.В.</i> Использование гибких шнуровых материалов при наплавке слоев стойких к износу	105
<i>Савосто В.В., Зыбин И.Н.</i> Особенности геометрии единичной площадки металла при электрокон- тактной наварке проволоки с разворотом электрода	109
<i>Сорокин П.С., Соловьев Н.И., Иванова П.М.</i> Остаточные напряжения и деформации в сварных конструкциях	112
<i>Осипова Ю.М., Чернова Т.Г.</i> Повышение износостойкости поршня	117
<i>Шаталов В.К., Лысенко Л.В., Головачева Ю.Г.</i> Получение наплавки присадочными прутками обработанными микродуговым оксидированием	120
<i>Орлик А.Г., Орлик Г.В., Сапожников А.Ю.</i> Применение роботизированного комплекса для изготовления теплообменных аппаратов.....	126
<i>Егоров Д.И., Труханов К.Ю.</i> Ремонт сваркой (наплавкой) дефектов магистрального газопровода	129
<i>Керимов С.С., Труханов К.Ю., Филиппов И.В.</i> Система управления приводами автоматической установки сварки (наплавки)	132
<i>Бохан Д.Е., Максимов Н.Н.</i> Совершенствование технологии сварки крупногабаритных конструкций из титановых сплавов.....	135

Парамонов С.С., Максимов Н.Н.

Технологические особенности точечной контактной сварки жаровой трубы газотурбинного двигателя 137

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ..... 141

Максимов И.В., Андреев В.В., Столяров А.А.

Защита микросхем изготовленных по КМОП-технологии от воздействия статического электричества 142

Блатов А.А.

Исследование поверхности излома сплава Al - 1,65 % Cu 147

Коржавый А.П., Прасицкий Г.В., Прасицкий В.В.

Исследование процесса инфильтрации пористых каркасов, применяемых для производства вольфрамово-медных и молибденово-медных псевдосплавов 153

Йе Еунт Ко Ко, Твердова С.М.

Катодно-подогревательный узел для элементов радиоэлектронной аппаратуры 158

Шагаев В.В., Тун Тун Лин

Метод повышения стабильности частот колебаний намагниченности в ферритовых плёнках 162

Андреев Д.В., Столяров А.А.

Моделирование изменения зарядового состояния МДП-сенсоров при воздействии ионизирующих излучений 168

Йе Еунт Ко Ко, Твердова С.М.

Особенности создания катодно-подогревательного узла на основе алюмонитридной керамики 172

Агу Е.Ю.

Перспективы применения холодных катодов в лазерах гироскопических датчиках..... 175

Андреев В.В., Андреев Д.В., Ахмелкин Д.М., Кузнецов В.В.

Повышения надежности и радиационной стойкости МДП-структур инжекционно-термической обработки наноразмерных диэлектрических пленок..... 178

Романов А.В.

Сенсор радиационных излучений на основе МДП-структур 183

Кондрашов П.В., Андреев В.В., Лоскутов С.А.

Установка для измерения параметров МДП-структур в условиях управляемого токового воздействия 188

СЕКЦИЯ 4.

ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ 191

Гридчин Н.В., Завальный Ф.Г.

Автоматизация расчета протечек через лабиринтные уплотнения
стационарных паровых и газовых турбин 192

Киселёв С.В., Сидоров А.А.

Влияние пленочного охлаждения сопловых лопаток
на аэродинамические следы 195

Липихин Е.Г., Шевелев Д.В.

Исследование влияния геометрии трубного пучка на параметры
газо-водяного теплообменного аппарата микро ТЭЦ 200

Сидоров П.М., Сидоров П.М., Шевелев Д.В.

К расчёту дополнительной теплоизоляции наружных ограничивающих
конструкций зданий и сооружений 204

Заричный А.Ф., Ильичев В.Ю.

Метод расчёта колебаний роторов, соединённых
резинопальцевыми муфтами 207

Сафонов А.И., Шевелев Д.В., Липихин Е.Г.

Обзор состояния рынка когенерационных установок малой мощности... 213

Юрик Е.А., Мусин Р.И.

Обзор энергетических установок применяемых на мини-ТЭЦ 219

Сидоров А.А., Сафронова Я.А.

Определение максимального значения тепловой нагрузки
теплофикационной турбины в составе ПГУ 226

Жинов А.А., Круглова Г.А.

Оптимизация режимных параметров и конструкции паровой турбины
для уменьшения осевых усилий на роторе 233

Гридчин Н.В., Афанасов Я.В.

Перевод КС малоразмерного ГТД на газообразное топливо 238

Гридчин Н.В., Мазунов А.С.

Повышение эффективности ГПА путем замены подшипников
скольжения нагнетателя магнитными подвесами 243

Тарасов Е.В., Жинов А.А.

Применение конденсатора смешивающего типа в паротурбинной
установке средней мощности 245

Шкилев В.Д., Митина И.В.

Применение криогенного теплоносителя для аккумулирования
электрической энергии 249

<i>Емельянов Н.Э., Карышев А.К.</i>	
Расчетно-теоретическое исследование параметров ГТУ с регулируемым сопловым аппаратом (РСА) в силовой турбине газоперекачивающего агрегата	253
<i>Тарасов Е.В., Жинов А.А.</i>	
Смешивающие подогреватели низкого давления	258
<i>Ибрагимов С.В., Ильичев В.Ю.</i>	
Усилия, действующие на опоры турбин и методы их снижения	263
<i>Сидоров А.А., Голиков А.С.</i>	
Экспериментальная установка для исследования влияния неравномерности давления в выхлопном осерадиальном патрубке турбин на вибрационное состояние рабочих лопаток последней ступени	267
СОДЕРЖАНИЕ	270

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ
И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ**

**Материалы
Всероссийской научно-технической конференции**

Том 1

Научное издание

Все работы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений

Подписано в печать 07.11.2016.
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 17,25. Усл. п. л. 16,04. Тираж 50 экз. Заказ № 172

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан в Редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87