

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

# **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  
НЗ4

### **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. Мальшев; 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*

НЗ4      **Научные** технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 24–26 ноября 2015 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 232 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, 2015  
© Калужский филиал МГТУ  
им. Н. Э. Баумана  
© Издательство МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, 2015

## **СЕКЦИЯ 1.**

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 621.9.06

А.С. Свитка, И.Д. Соколова

## **АНАЛИЗ АМЕРИКАНСКОГО ПОДХОДА К МОДЕРНИЗАЦИИ СТАНКОВ**

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

На сегодня огромное количество компаний, в основе производства которых лежат станки, предпочитают не покупать новые станки, а ремонтировать старые. Это позволяет им не только сэкономить деньги, но также и сэкономить время: на закупку нового станка тратится больше времени, чем на ремонт старого. Следует отметить, что подобная тенденция замечена не только в странах постсоветского пространства, но также и в странах ближнего и дальнего зарубежья.

Многие станки, особенно крупногабаритные, выпускаемые сейчас в ограниченных количествах, например, расточные и карусельные, а также шлифовальные, и не всегда имеющие постоянную загрузку, выгоднее модернизировать и использовать на собственном предприятии, принимая заказы от других фирм. Рынок подержанных станков в мире постоянно расширяется и охватывает уже не только действительно бедные фирмы, но и вполне платежеспособные. Объем этого рынка достигает уже несколько миллиардов долларов. В этой связи представляет интерес подход американских фирм к ремонту, восстановлению и модернизации станочного оборудования, в частности шлифовальных станков.

Производители шлифовальных станков продолжают совершенствовать выпускаемое ими оборудование в направлении повышения его производительности и уровня автоматизации. Однако некоторые шлифовальные станки, в частности плоскошлифовальные, выпускаются в России в ограниченном количестве или практически не выпускаются. Тем не менее, потребность в таких станках на заводах существует, и это делает особенно актуальным американский опыт их восстановления, переделки и модернизации.

Одна из американских машиностроительных фирм покупает на заводах старые плоскошлифовальные станки разорившейся в настоящее время фирмы Mattison с прямоугольным и круглым столами и восстанавливает их с помощью специализированной фирмы Dial Industries, на которой работают многие специалисты фирмы Mattison. [1] При восстановлении одни станки оснащают всеми функциями УЧПУ (устройство числового программного управления), другим оставляют ручное управление или обеспечивают только частью функций УЧПУ.

При поиске станка – кандидата на восстановление или модернизацию американские потребители часто выбирают старый плоскошлифовальный станок, который уже много лет работал на их заводе. Однако идеальным

для этих целей является все-таки длительное время (чем дольше, тем лучше) неработающий станок, давно стоящий на складе дилера.

Перед пользователями шлифовальных станков стоит задача выбора метода его усовершенствования – восстановления, модернизации или, наконец, ремонта с частичной переделкой. Хотя эти процессы во многом схожи, между ними существуют значительные различия. Оптимальными кандидатами на восстановление являются станки возрастом не более 12 лет с надежными УЧПУ.

Восстанавливаемый станок, полностью разбирают, его механические части очищают от грязи и ржавчины, промывают, проверяют их функциональное состояние и затем собирают вновь, используя новые или повторно обработанные детали. При этом направляющие скольжения очищают от ржавчины, тщательно осматривают на предмет обнаружения у них задиров и проверяют твердость. У большинства новых направляющих средняя твердость составляет 50 HRC на глубину 0,23 - 3,2 мм. При восстановлении их следует отшлифовать вручную (если глубина царапин превышает 1,25 мм) или перешлифовать с получением плоскостности не хуже 5 мкм и шероховатости  $R_a = 0,8$  мкм. Съёмные направляющие окончательно шлифуют, сняв со станка, а затем (после установки) шлифуют по месту. [2]

Обычно все работы по восстановлению шлифовальных станков проводятся на одном заводе и кроме пескоструивания, заполнения стекловолоконном, грунтовки и окраски литой станины включают, как правило, установку новых электронных компонентов, замену гидросистем электродвигателями, что увеличивает точность станка, а также электродвигателей постоянного тока, служащих для врезания круга в заготовку, и установку векторных приводов на двигатели переменного тока, служащие для быстрого отвода и врезания круга. Предусматривается ручное шабрение направляющих стола и станины, как более точный, чем шлифование, процесс, продлевающий срок их службы, а также выверка этих направляющих. Кроме того, производят перепрограммирование УЧПУ и устанавливают частотно-регулируемые приводы, позволяющие согласовывать частоты вращения круга с характеристиками обрабатываемых материалов и размерами заготовок. [3]

Сборку восстановленного станка начинают с выверки по уровню его станины. При установке на нее крупных узлов (стола, шпинделя, стойки и т.д.) возникают определенные точностные погрешности, избежать которых можно путем повторной выверки станины после установки на нее каждого такого узла. После сборки станка производят его статическую (с помощью гранитного угольника и электронных уровней) и динамическую (путем компьютерного анализа точности станка при холостых перемещениях его узлов) проверку. Проверка с помощью датчика с шариковым измерительным наконечником обеспечивает соответствующую выверку отдельных осей координат и правильное соотношение между ними при перемещении узлов. Для восстановления крупного плоскошлифовального станка требуется 22 – 24 недели. Стоимость восстановленного станка составляет примерно

60 % нового. Однако производительность такого станка практически не уступает производительности нового. При модернизации обычно устанавливают новое УЧПУ или заменяют существующее на более современное.

Типовую модернизацию станка, включая его систему управления, серводвигатели и приводы главного движения, проводят в США за 4 – 8 недель, восстановление в зависимости от степени повреждений и изношенности 12 – 16 недель. Ремонт станка вместе с его частичной переделкой занимает 5 – 7 месяцев.

Хотя количество заказов на ремонт и модернизацию станков, отработавших 5 лет и более, в США постоянно растет, возможности исполнения этих заказов в значительной степени ограничены дефицитом в первую очередь квалифицированных специалистов, выполняющих ручные операции, например, шабрение, а также опытных слесарей-сборщиков, способных разобраться в незнакомом сложном оборудовании, тем более что на него иногда отсутствуют документация и чертежи. Одна из причин этого явления – практическое отсутствие системы подготовки на американских предприятиях рабочих наиболее распространенных специальностей – станочников на станки с ручным управлением, которых на заводах США значительно больше, чем станков с ЧПУ, слесарей, сборщиков и т.д.

Американский подход к модернизации, восстановлению и ремонту станков, в частности шлифовальных, представляет немалый интерес для российских специалистов, поскольку позволяет им сравнить, насколько эффективно проводятся эти операции в России. Такой метод восстановления старых станков позволяет не только сэкономить денежные средства, но также и усовершенствовать работу на предприятии, так как американский метод восстановления станков позволяет также увеличить объемы производства.

### Список литературы

1. [Электронный ресурс] Ремонт, восстановление и модернизация станков. Американский подход [http://stanki-katalog.ru/st\\_3.htm](http://stanki-katalog.ru/st_3.htm)(дата обращения 07.10.2015 г.)
2. [Электронный ресурс] Капитальный ремонт и модернизация станков с ЧПУ <http://www.izhtec.ru/remchpu.html>(дата обращения 07.10.2015 г.)
3. [Электронный ресурс] Модернизация шлифовальных станков <http://www.stroyazbuka.com/stanki/stanki.php?nn=102&tt=68>(дата обращения 07.10.2015 г.)

**Свитка Анастасия Сергеевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [svitka1993@yandex.ru](mailto:svitka1993@yandex.ru).

**Соколова Ирина Дмитриевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [sokolovairinadm@rambler.ru](mailto:sokolovairinadm@rambler.ru).

А.Г. Вяткин, Д.И. Бычков

## **АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ.**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Приспособлениями в машиностроении называют дополнительные устройства к технологическому оборудованию, применяемые при выполнении технологических операций (обработка заготовок, сборка изделий, контроль). За счет использования приспособлений устраняется необходимость разметки заготовок, расширяются технологические возможности металлообрабатывающего оборудования, возрастает производительность труда, повышаются точность обработки и качество изделий. Используя приспособления, можно сократить основное технологическое время за счет совмещения обработки нескольких заготовок и различных поверхностей одной заготовки; увеличение числа одновременно работающих инструментов, повышения параметров режимов обработки. В общем объеме средств технологического оснащения примерно 50 % составляют станочные приспособления.

В условиях машиностроительного производства, отличающегося нестабильностью номенклатуры и объемов выпуска продукции, при обработке деталей на станках с ЧПУ актуальным является рациональный выбор технологической оснастки и применение переналаживаемых приспособлений.

Переналаживаемые станочные приспособления характеризуются самой высокой степенью гибкости, так как при переходе от обработки одной группы деталей к другой они не требуют перекомпоновки приспособлений, регулирование выполняется с помощью установочно-зажимных элементов (безналадочные приспособления) или заменой сменных наладок (наладочные приспособления), а это занимает значительно меньше времени. В среднем стоимость сменной наладки в 4 - 5 раз ниже стоимости заменяемого ею специального приспособления. Как правило, на один базовый агрегат приходится 7-10 наладок. Следовательно, применение переналаживаемого приспособления с комплектом сменных наладок может заменить до 10 специальных приспособлений, необходимых для обработки различных деталей. Применение универсально-наладочных приспособлений (УНП) и специализированных наладочных приспособлений (СНП) позволяет получить 8 - 9-й качества точности обработки поверхностей деталей [1, 2]. Классификация переналаживаемых станочных приспособлений выполняется по следующим признакам:

- по степени специализации: универсальные и специализированные;
- по наличию сменных наладок: наладочные и безналадочные;

- по типу переналадки: нерегулируемая насадка, регулируемая насадка, установочные элементы, зажимные элементы и функциональные модули;
- по способу переналадки: замена, регулирование и комбинация способов;
- по степени автоматизации переналадки: вручную, механизировано и автоматизировано;
- по типу области переналадки; совокупность фиксированных положений, любые положения в пределах заданной траектории, любые положения в пределах заданной плоскости и любые положения в пределах заданного пространства;
- по схеме базирования: по трем плоскостям, по двум плоскостям и отверстию, по плоскости и двум отверстиям, по двум цилиндрическим наружным поверхностям и торцу, по двум цилиндрическим внутренним поверхностям и торцу, по двум плоскостям и центральному выступу, и др.;
- по степени автоматизации зажима заготовок: вручную, механизировано и автоматизировано;
- по типу источника энергии привода зажима: пневматический, гидравлический, электромеханический, электромагнитный, магнитный, вакуумный и от подвижных частей станка;
- по количеству одновременно устанавливаемых заготовок: одна и несколько.

Учитывая опыт применения сборных станочных приспособлений, рациональнее компоновать такие приспособления из унифицированных деталей и сборочных единиц, входящих в соответствующий комплект. Таким образом, целесообразно разработать систему станочного приспособления, сочетающую преимущества, как сборных, так и переналаживаемых приспособлений, т. е. систему универсально-сборных переналаживаемых приспособлений (УСПП) [3].

Основой УСПП является базовая плита, представляющая собой аналог гидравлических блоков сборных приспособлений с встроенными гидроцилиндрами и магистралями подвода масла к ним. На базовой плите устанавливают остальные детали и сборочные единицы.

Базирующий модуль — сборочная единица, которая устанавливается на базовую плиту и в совокупности с деталями и сборочными единицами, входящими в его состав, обеспечивает базирование заготовки.

Установочные элементы станочного приспособления обеспечивают реализацию теоретической схемы базирования заготовки, а также достаточную устойчивость при обработке.

Зажимной элемент (ЗЭ) — деталь или группа деталей станочного приспособления, которые находятся в непосредственном контакте с объектом



обработки при закреплении, прижимая заготовку к УЭ приспособления и обеспечивая неизменность ее положения в процессе формообразования.

Зажимной модуль – сборочная единица, состоящая из деталей, которые в совокупности создают силовой импульс, передаваемый на ЗЭ.

В зависимости от конструкции приспособлений и обрабатываемых в них деталей переналадка выполняется одним из следующих методов:

1) путем перемещения (регулировки) постоянных установочных элементов (пневматические тиски, патроны и другие приспособления с винтами для установочных перемещений губок, кулачков и т. п.);

2) путем перестановки и перезакрепления постоянных установочных элементов (некоторые конструкции тисков, патронов и других приспособлений);

3) полной или частичной заменой установочных и других сменных элементов (скальчатые кондукторы, оправки и патроны со сменными цангами, приспособления со сменными кассетами и т. п.);

4) одновременно путем замены и перемещения (регулировки) установочных элементов (тиски и патроны со сменными губками и т. п.).

Первые две группы приспособлений используются для деталей, имеющих подобные по форме, но различные по размерам базовые поверхности и требуют минимальных затрат средств и времени на переналадку. Кроме кулачковых патронов и тисков, к этим группам можно отнести десятки других конструкций.

Вторые две группы приспособлений используются для деталей, разнообразных (в определенных границах) по форме и размерам; основным объединяющим началом в этом случае является общность групповой операции [4].

Таким образом, применение переналаживаемой оснастки позволяет сократить время на переналадку, что повышает технико-экономические показатели производства.

### Список литературы

1. Черпаков Б. И. Технологическая оснастка. М.: Академия, 2003. 288 с.
2. Н. Д. Жолткевич, И. Я. Мовшович, А. С. Кобзев и др. Обратимая технологическая оснастка для ГПС Киев: Техшка, 1992. 216 с.
3. В. А. Богуслаев, В. А. Леховицер, А. С. Смирнов. Станочные приспособления Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2000. 461 с.
4. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений в машиностроении. М.: Машиностроение, 1971. -288 с.114. 1.12. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. М.: Машиностроение, 1978.

**Вяткин Андрей Геннадьевич**— доцент, канд. техн. наук 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.

З.В. Тягунова

## **АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ФОРМ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ.**

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

Область применения пластических масс весьма разнообразна: детали машиностроения, приборостроения, радиоаппаратуры, изделия народного потребления и др. Конструкция пластмассового изделия существенно влияет на конструкцию формы (зависящую от технологичности изделия) и качественные показатели изделия, которые, в свою очередь, зависят как от технологии его изготовления, так и от его конструкции. В связи с этим изделие следует конструировать одновременно с анализом его технологичности.

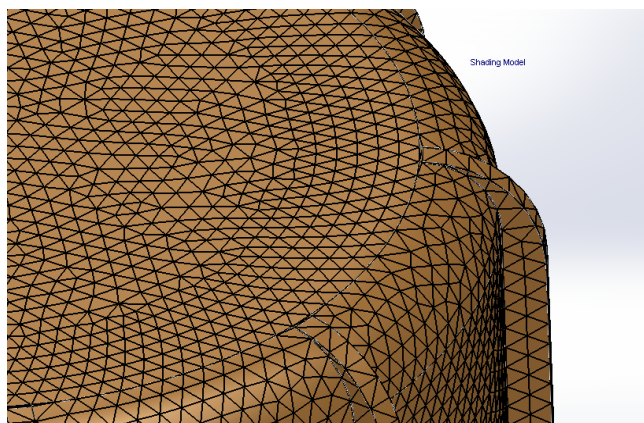
Необходимо учитывать, что в ряде случаев ошибки, заложенные при разработке изделия, невозможно исправить выбором конструкции формы. Типичной ошибкой является механический перенос конструктивных элементов деталей, изготовленных из металла, на пластмассовые детали, что, как правило, приводит к ухудшению технологических и конструктивных свойств пластмассовых изделий. При конструировании пластмассовых изделий необходимо стремиться к обеспечению рациональных условий течения материала в форме, повышению точности изготовления, уменьшению внутренних напряжений, коробления, цикла изготовления [1].

Важным этапом является отработка отливок на технологичность – анализ качества и возможности заполнения пресс-формы, поиск и устранение линий холодного спая, доработка исходной модели для устранения возможных утяжин. Традиционный метод анализа подразумевает последовательное изготовление деталей-прототипов с дальнейшим устранением ошибок [2]. Сегодня подобные задачи должны максимально полно решаться еще на этапе проектирования модели с использованием расчетных модулей. На начальном этапе изготовления пресс-формы все существующие идеи, чертежи переносятся на компьютер, на котором с помощью определенных программ осуществляется проектирование пресс-форм. При разработке пресс-форм применяются CAD/CAM системы, автоматизированного, сквозного проектирования.

Программный комплекс SolidWorks является эффективным инструментом для решения сложных инженерных задач в области проектирования пресс-форм. SolidWorks Plastics входит в состав программного комплекса SolidWorks и предназначается для моделирования и оптимизации процесса литья деталей из пластмасс. В состав программы входят модули расчета параметров проливаемости и выдержки изготавливаемых отливок.

В SolidWorks Plastics для выполнения моделирования задается ряд исходных параметров и определяются граничные условия моделирования. Для работы программы необходима трехмерная модель детали. Так как программный комплекс SolidWorks позволяет работать с самыми различными форматами трехмерной геометрии, для выполнения расчетов можно использовать геометрию, импортированную из других CAD систем [3]. Моделирование процесса литья происходит с использованием метода конечных элементов. Одной из важных задач является создание сетки конечных элементов из исходной модели детали. Для этого SolidWorks Plastics позволяет использовать различные методы разбиения геометрии детали.

При использовании гибридного метода разбиения внутренняя часть тела детали формируется из тетраэдров, а на поверхности строятся два слоя плоских элементов. Пример подобного разбиения представлен на рис.1.



*Рис.1. Гибридный метод разбиения геометрии*

После построения расчетной сетки, для выполнения расчетов необходимо задать тип используемого материала и станка.

Процесс моделирования заполнения пресс-формы расплавленным полимером позволяет выполнять два вида расчетов: расчет параметров проливаемости материала и моделирование процесса выдержки пресс-формы под давлением. После окончания расчетов пользователь получает доступ к набору параметров, позволяющих оценить технологичность изготовления детали.

К таким параметрам расчета проливаемости относятся:

- разнообразные температурные поля внутри и на поверхности пресс-формы;
- распределение давления в отливке;
- зоны застывания;
- величина объемной усадки и т.д.

При моделировании фазы выдержки пресс-формы под давлением проектировщик, помимо вышеописанных параметров, получает свое распоряжение следующие данные:

- время охлаждения;
- остаточное напряжение;
- местоположение утяжин, их величина и т.д.

Для повышения наглядности получаемых результатов SolidWorks Plastics встроен модуль генерации отчетов, сводящий все результаты моделирования в единый файл, содержащий в себе таблицы значений, графики, иллюстрации и рекомендации.

Таким образом, можно сделать вывод, что функционал SolidWorks Plastics позволяет достаточно полно описать процесс отливки деталей из пластмасс и рассчитать его технологичность, что особенно важно на начальной стадии проектирования пресс-форм.

### **Список литературы**

1. А.П. Пантелеев, Ю.М. Шевцов, И.А. Горячев Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. – М.: Машиностроение, 1986. 399с.
2. В.М. Владимиров Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений. – М.:Высшая школа,1974.431с.
3. SolidWorks Plastics — анализ технологичности проектирования пресс-форм. – САПР и графика. 2013, №11.

**Тягунова З.В.** –ст. преп КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kalugakf@yandex.ru.

Ю.А. Савина, М.В. Мусохранов

## **ВЛИЯНИЕ ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕТАЛЕЙ**

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

Долговечность деталей машин и механизмов в большинстве случаев определяется эксплуатационными показателями (такими как износостойкость, выносливость, теплостойкость и др.) которые, в свою очередь, зависят от структуры поверхностного слоя детали. Преимущественно эти микроструктуры формируются на финишных этапах механической обработки, чаще всего это различные виды абразивной обработки. По этой причине исследования формирования структуры поверхностного слоя при окончательной абразивной обработке являются актуальными.

Отделочная обработка - группа окончательных финишных операций, вследствие которых повышается качество поверхности, точность размеров и форма детали [1]. При доводочной обработке используют всевозможные типы влияния на обрабатываемую поверхность: механическое, электрохимическое и электрофизическое. Чаще всего в качестве окончательной обработки резанием используют такие операции как суперфиниширование, доводка, полирование, алмазное выглаживание, хонингование, и др. Рассмотрим некоторые из них.

Доводка - вид окончательной обработки, задача которой - получение высокой точности и достаточно низкой шероховатости поверхности [4]. Часто доводку используют для притирки деталей, работающих в паре.

После доводки точность геометрических форм и размеров деталей снижается до десятых долей микрона (0,1...0,5 мкм). При доводке на обрабатываемых поверхностях появляются окисные пленки и адсорбированные слои, которые негативно влияют на качество поверхностного слоя, а именно: снижают прочность и его сопротивляемость к разрушению. Если доводку проводить с использованием различных абразивных паст или суспензий, то время доводки значительно сократится.

Следующим общеизвестным методом окончательной обработки является полирование. Полирование - это отделочная обработка деталей, при которой производится выглаживание микронеровностей на поверхности, главным образом за счет их пластического деформирования и в меньшей степени за счет срезания выступов микронеровностей [2].

При полировании можно достичь низких значений шероховатости, она составляет  $R_a=1,6...0,1$  мкм. После полирования точность детали значительно не изменяется и остается приблизительно такой же, как и была до проведения операции. В основном, полирование применяют для придания поверхности детали зеркального блеска, т.е. для декоративной обработки.

При том после полирования происходит уменьшение коэффициента трения, повышается коррозионная стойкость и усталостная прочность.

Кроме простого полирования на современных предприятиях также применяется и гидрополирование. Сущность этого способа полирования заключается в том, что струя рабочей жидкости (чаще всего воды) совместно с абразивным порошком подается под давлением 4...6 кг/мм<sup>2</sup> с высокой скоростью (50...70 м/с) на обрабатываемую поверхность и полирует ее. В результате, после обработки поверхность становится матовой и образуется наклепанный слой, вследствие чего деталь становится надежнее. Достижимая шероховатость - Ra=2,5...0,32 мкм, а размеры детали практически не меняются.

Далее рассмотрим метод суперфиниширования. Суперфиниширование – это отделка поверхностей абразивными мелкозернистыми колеблющимися брусками с малым удельным давлением [4]. Этот способ используется для финишной обработки деталей после шлифования. Главная задача суперфиниширования-значительно увеличить эксплуатационные свойства детали вследствие получения очень малой шероховатости Ra=0,6...0,05 мкм. После суперфиниширования значительно повышается качество поверхностного слоя детали за счет существенного уменьшения остроты, волнистости, дефектного поверхностного слоя металла, который образовался на предшествующих этапах обработки.

Суперфиниширование обеспечивает упрочнение поверхностного слоя детали без значительных структурных изменений, а это важно для деталей, работающих в условиях трения скольжения или качения, так как сохранение микроструктуры существенно повышает эксплуатационные свойства деталей. Вдобавок суперфиниширование дает возможность получить необходимое направление и форму микронеровностей, оказывается действенным методом отделочной обработки ответственных деталей.

Кроме уже перечисленных методов окончательной обработки, для улучшения качества поверхностного слоя и повышения эксплуатационных свойств используют алмазное выглаживание. Этим способом можно обрабатывать детали из разных видов материалов различной твердости. Алмазное выглаживание это способ пластического деформирования исходного микропрофиля под действием усилия, приложенного к алмазу (или другому сверхтвердому материалу) [3].

После выглаживания средняя шероховатость составляет Ra=0,32...0,08 мкм, кроме того на поверхности детали образуется наклепанный слой, глубина залегания которого может достигать до нескольких десятых миллиметров, в то время как упрочнение приобретает значение от 40 до 200 %. После проведения операции в упрочненном слое образуются сжимающие остаточные напряжения величиной около 700-900 МПа.

После выглаживания микроструктура поверхности значительно улучшается - увеличивается твердость, образуются остаточные сжимаю-

щие напряжения, благоприятный микрорельеф, все эти качественные показатели сопутствуют повышению износостойкости, выносливости и усталостной прочности деталей.

Одним из самых эффективных методов финишной абразивной обработки высокоточных деталей, позволяющим достичь высокое качество поверхности, является процесс хонингования. Хонингование - это одна из форм тонкой абразивной обработки резанием для получения точных деталей. Хонингование применяют для достижения заданной шероховатости, структуры поверхности или супер гладких поверхностей. Если сравнивать хонингование с другими отделочными операциями, то его достоинствами являются высокая производительность и постоянство технологического процесса.

Кроме того, характерным отличием процесса хонингования является большая площадь соприкосновения режущих брусков с обрабатываемой поверхностью и низкая скорость резания (0,3...1,0 см/м), поэтому силовые и температурные напряжения, образующиеся при хонинговании, ничтожно малы. По этой причине появляются достаточно малые остаточные напряжения и отсутствуют фазовые и структурные превращения. Из-за этого в поверхностном слое не образуются дефекты, как при шлифовании.

Таким образом, можно сделать вывод, что высокие эксплуатационные свойства деталей машин обеспечиваются при подборе оптимальных финишных операций, а управление микрорельефом, формой микронеровностей поверхности - в настоящее время одна из самых актуальных проблем тонкой финишной обработки.

### Список литературы

1. Бишутин С.Г., Формирование тонких поверхностных структур при финишной абразивной обработке. Вестник БГТУ, 2009, №3(23), с. 45-48.
2. Ящерицын П.И., Зайцев А.Г. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. - Минск: Наука и техника, 1976. – 328 с.
3. Алмазное выглаживание. URL: <http://studopedia.org/4-161142.html> (дата обращения 19.10.2015).
4. Отделочные операции обработки валов. Суперфиниширование. Притирка. Полирование. Накатывание рифлений. URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=20045> (дата обращения 19.10.2015).

**Савина Юлия Александровна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [ulia1158@yandex.ru](mailto:ulia1158@yandex.ru).

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

Л.А. Санова

## **ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕСС-ФОРМ**

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

Важное значение в процессе изготовления пресс-форм имеет, наряду с выбором оборудования, определения гнездности и других факторов, подбор материалов для их изготовления. Все эти факторы оказывают решающее влияние на экономические показатели процесса производства деталей из пластмасс.

При выборе материала для пресс-формы необходимо стремиться обеспечить не максимально возможный, а требуемый срок службы пресс-формы, который, как правило, определяется стойкостью формообразующих деталей (ФОД) пресс-формы.

ФОД можно изготавливать из различных материалов. Если требуется обеспечить высокие стойкость, точность, качество поверхности, то применяют стали различных марок. При изготовлении небольшой партии деталей методом литья под давлением можно использовать сплавы на основе меди, цинка, алюминия. В опытном производстве, когда требуется изготовить небольшое число отливок, можно использовать металлопластмассовые композиции. В особых случаях, когда необходимо изготовление ФОД с глубокими полостями и сложной конфигурацией, используют метод гальванопластики. Этот метод позволяет изготовить ФОД с высокими точностью, микротвердостью и малой шероховатостью поверхности. Иногда для изготовления отливок со сложными полостями, которые невозможно получить другими способами, используют эластичные ФОД [1].

Наиболее ответственные детали штампов и пресс-форм, форм для литья металлов под давлением изготавливают из углеродистых и легированных инструментальных сталей определенных марок, выделенных в особую категорию – штамповые стали [2]. Из материалов этой группы выпускаются ключевые, важнейшие с точки зрения предназначения, детали штампа или пресс-формы. С обработкой таких материалов связаны специфические потребности пресс-штампового производства.

Для изготовления ФОД пресс-форм применяют стали: цементируемые, азотируемые, объемно закаливаемые (в состоянии закалки или улучшения), коррозионно-стойкие [3].

Цементируемые стали наиболее полно соответствуют требованиям, предъявляемым к ФОД. Особое преимущество этих сталей заключается в том, что, имея высокую поверхностную твердость и вязкую прочную сердцевину, они обладают высокой стойкостью к изнашиванию и воздействию переменных и ударных нагрузок. Цементируемые стали можно применять в условиях, при которых объемно закаливаемые стали разрушаются. Дру-



гое важное преимущество цементируемых сталей — пониженная деформация по сравнению с инструментальными углеродистыми сталями. Вследствие этого они допускают минимальные припуски (0,05—0,15 мм) на доработку после термообработки, однако предъявляют высокие требования к технологии термической обработки.

Толщину цементированного слоя выбирают от 0,5 до 1,2 мм. Во избежание сквозной прокаливаемости не рекомендуется изготавливать из этих сталей ФОД с ребрами толщиной менее 4 мм. Из этого класса наиболее часто применяют стали 10 и 20 (ГОСТ 1050-88), 20Х, 12ХНЗА, 18ХГТ (ГОСТ 4543-71).

Азотируемые стали отличаются тем, что без последующей термообработки имеют весьма высокую твердость поверхностного слоя. Изготовленные из этих сталей детали почти не деформируются. В отличие от процессов цементации, азотированию подвергают ФОД, прошедшие термообработку улучшением и доведённые до окончательных размеров. Рекомендуемая глубина азотируемого слоя 0,15-0,20 мм. Наиболее часто применяемые из этого класса стали - 5ХГМ, 4ХМФС, 4Х5МФС (ГОСТ 5950-73).

Объёмно закаливаемые стали имеют высокую твёрдость и, как следствие, хорошую износостойкость, хорошо полируются и обрабатываются электроэрозионным методом. Но эти стали имеют пониженную вязкость, более склонны к деформациям, короблению и образованию трещин по сравнению с цементируемыми или улучшенными сталями. Стали этого класса в основном используют для изготовления ФОД простой формы и небольших размеров. Наиболее применяемые стали; У8А (ГОСТ 1435-99), Х12М (ГОСТ 5950-73), 4Х5МФС (ГОСТ 5950-2000).

Для изготовления крупногабаритных ФОД сложной конфигурации с высокой износостойкостью применяют стали Х12Ф1, Х12М (ГОСТ 5950—73). Эти стали отличаются высокой прокаливаемостью и воспринимают закалку не только в масле, но и на воздухе, претерпевая при этом минимальные объёмные изменения. Сталь Х12Ф1 несколько превосходит сталь Х12М по пластичности и вязкости, но немного уступает ей по твёрдости.

Для повышения износостойкости и коррозионной стойкости ФОД часто подвергают хромированию. Если срок службы лимитируется качеством и толщиной хромового покрытия, то применяют коррозионно-стойкие стали 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 95Х18 (ГОСТ 5632-72). Это необходимо при переработке химически агрессивных пластмасс, оказывающих коррозионное воздействие на ФОД, а также при необходимости получения сложных рельефов с узкими пазами, когда невозможно получить равномерное покрытие.

В отдельных случаях для упрощения и удешевления изготовления средне- и крупногабаритных пресс-форм, особенно в мелкосерийном производстве, используют улучшаемые стали 45 (ГОСТ 1050-88), 5ХГМ, 4ХМФС, 4Х5МФС (ГОСТ 5950-2000). Недостатками этих сталей являются

меньшие износостойкость, прочность, худшая полируемость. В крупносерийном и массовом производстве эти недостатки можно уменьшить азотированием и хромированием.

Никель-кобальтовые материалы используют для изготовления ФОД методом гальванопластики. Этот метод позволяет достичь 7-9 качества при шероховатости Ra 0,2-0,05 мкм и исключить дополнительную механическую доработку формообразующих поверхностей, термообработку и хромирование. Изготовление ФОД таким методом применяют при литье термопластов, когда получение их другим методом неэффективно.

Использование цветных сплавов в мелкосерийном и единичном производстве позволяет уменьшить затраты на проектирование, изготовление и последующую доводку формообразующих деталей сложных изделий. При литье таких ФОД удается получить формообразующие поверхности с малой шероховатостью, отсутствием окалины, низкой адгезией к материалам мастер-модели и оснастки, что является неоспоримым преимуществом. Для получения деталей с жесткими допусками, при изготовлении относительно больших партий деталей следует применять медь (ГОСТ 859-2001) и медные, цинковые (ГОСТ 25140-93) или алюминиевые (ГОСТ 1583-93) сплавы. ФОД для небольших партий деталей изготавливают из свинцовых или оловянистых сплавов

При выборе материалов для изготовления ФОД пресс-форм следует учитывать и методы их обработки. Помимо традиционных методов механической обработки все более широко для изготовления стальных ФОД применяют методы холодного и полугорячего выдавливания, электроэрозионной обработки. Для рационального выбора сталей необходимо знать основные особенности этих методов.

Методом холодного выдавливания, т.е. пластическим деформированием без предварительного нагрева, заготовкам придают заданную форму. Метод позволяет получать матрицы высокой точности (в пределах 9-11-го качества) и малой шероховатости ( $Ra = 0,1$  мкм). Максимально достижимая относительная глубина выдавливания  $\delta = h/d$ , где  $h$  и  $d$  — глубина и приведенный диаметр выдавливаемой полости.

При использовании метода холодного выдавливания матрицы многогнездных форм следует выполнять в отдельных вставках, а не в цельных плитах. Полости выполняют без поднутрений, так как их невозможно создать мастер-пуансом. Для предотвращения образования трещин при термообработке мастер-пуансов и улучшения условий течения металла в процессе выдавливания все острые кромки и места переходов в полостях следует скруглять [1].

Используя метод полугорячего выдавливания, деформируемую заготовку предварительно нагревают, при этом скорость деформации 2-8 мм/с. Этим способом можно получить глубокие и точные полости в ФОД из труднодеформируемых сталей (40Х, 12ХН3А, 12Х13, 20Х13, 40Х13, Х12М,

4Х5МФС, У8А и др.). Стойкость ФОД, полученных этим методом, возрастает в 1,5-2 раза по сравнению с предыдущим, максимально допустимая относительная глубина выдавливания  $\delta = 1,0 \dots 1,2$ .

Метод электроэрозионной обработки позволяет изготавливать ФОД для пресс-форм из любых сталей. Этот метод широко применяется при обработке высокопрочных, труднообрабатываемых сталей, допускает при необходимости обрабатывать предварительно закаленные до высокой твердости заготовки, обеспечивая получение деталей высокой точности без деформаций и коробления.

### **Список литературы**

1. А.П.Пантелеев, Ю.М.Шевцов, И.А.Горячев. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. – М.: Машиностроение, 1986. 399с.
2. В.М.Владимиров. Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений. – М.: Высшая школа, 1974. 431с.
3. Л.А.Поздняк, Ю.М.Скрынченко, С.И.Тишаев. Штамповые стали. – М.: Металлургия, 1980. 244с.

**Санова Л.А.** – ст. преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kalugakf@yandex.ru.

А.А. Вяткин, В.А. Вяткин

## ВЫБОР СПОСОБА НАСТРОЙКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На высотный размер поковок, штампуемых на гидравлических прессах, оказывает влияние значительные количества факторов, которые можно разделить на случайные неконтролируемые и систематические постоянные. К систематическим постоянным факторам можно отнести погрешность, связанную с наладкой (настройкой) технологической системы (ТС), которая оказывает влияние на точность штамповки [1].

Подобно процессам механической обработки наладка технологических систем на основе прессов сводится к установлению основного параметра ТС таким образом, чтобы придать такое положение мгновенному полю рассеяния размеров относительно границ поля допуска, при котором все поковки оказались бы годными. Основным параметром, подлежащим регулированию в процессе наладки гидравлических прессов, является величина силы пресса ( $P$ ) при установленном пределе давления. Регулирование этого параметра неизбежно сопровождается погрешностью  $\square P$ , которая оказывает влияние на точность высотных размеров поковки.

Величина погрешности высотных размеров поковок ( $\square h$ ) зависит от того, на какую силу был настроен гидравлический пресс – на максимальную ( $P_{max}$ ) или минимальную ( $P_{min}$ ). Вероятно, что для каждого случая величина погрешности высоты поковок будет разной.

Для ответа на этот вопрос был реализован полнофакторный эксперимент ПФЭ  $2^2$ , по известной методике [2], где исследовалось влияние способа настройки (на  $P_{max}$  или  $P_{min}$ ) и относительных размеров поковок  $d/h$ , характеризующих при прочих равных условиях их жесткость, на погрешность их высоты ( $\square h$ ). Факторы устанавливались на двух уровнях: сила деформирования –  $P_{max} = P_{ном} + 10\%P_{ном}$  (+) и  $P_{min} = P_{ном} - 10\%P_{ном}$  (-); относительные размеры поковок –  $d/h=3,0$  (+) и  $d/h=1,5$  (-). Осаживались поковки из сплава АД1 со степенью деформации исходных заготовок по высоте  $\square=0,2$  без применения смазки. Диаметр поковок –  $d=32$ мм.

Таблица 1. Матрица планирования и результаты ПФЭ  $2^2$

№	$d/h$	$P$	$\bar{y}(\delta h, \%)$	$S_i^2$
1	+	+	9,36	0,856
2	-	+	11,94	0,806
3	+	-	10,91	0,210
4	-	-	12,88	0,004

При статистической обработке результатов [3] ПФЭ  $2^2$  получена адекватная модель в виде уравнения регрессии в кодированном масштабе уровней факторов:

$$\bar{y}(\delta h, \%) = 11,27 - 1,14 \cdot \frac{d}{h} - 0,62 \cdot P \quad (1)$$

Из анализа (1) следует, что увеличение силы  $P$  способствует уменьшению погрешности высоты поковок ( $\square h$ ), об этом свидетельствует знак минус при соответствующем коэффициенте регрессии. Отсюда следует вывод, что настройка гидравлического пресса на  $P_{max}$ , соответствующей поковке с максимальными положительными погрешностями, позволяет повысить точность штамповки на гидравлическом прессе.

### Список литературы

1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 564с., ил.
2. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 336с.
3. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение. София: Техника, 1980. – 304с.

**Вяткин Андрей Андреевич**— ассистент кафедры "Детали машин и подъемно-транспортное оборудование" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a-vyatkin@inbox.ru.

**Вяткин Виктор Андреевич**— студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vik-viatkn@mail.ru.

А.В. Волков, И.К. Устинов

## **ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ОБЩЕГО ВИДА МОДЕЛИ ВОЛОЧЕНИЯ МИКРОПРОВОЛОКИ**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Ранее на основе теоретических положений И.Л. Перлина, и М.З. Ерманка [1], а также практического опыта авторов, разработана и реализована в среде Mathcad математическая модель процесса многократного волочения микропроволоки со скольжением [2-4]. Общая схема алгоритма состоит из ряда математических модулей. Модули алгоритма, реализованные в универсальной программной среде представлены в предыдущих работах [5-9].

Здесь решали задачу последовательного анализа составляющих модели с точки зрения применимости для решения различных прикладных задач, связанных как с анализом процессов разработки новых материалов, - проектированием переходов волок для конкретного волочильного оборудования и техпроцессов, так и с разработкой сквозных техпроцессов получения микропроволоки методом волочения, реализуемых непосредственно из прутковой заготовки и включающих ряд промежуточных термообработок полуфабрикатов.

Уравнения 1 и 1а модели реализуют «триггер относительных обжатий» и в общем виде являются универсальными практически для любых вариантов применения модели [5-7].

Уравнения 2 и 2а представляют собой зависимости изменения сечения микропроволоки от относительного обжатия по переходам и также универсальны [5-7].

Уравнения 3 и 3а содержат частную зависимость упрочнения микропроволоки из алюминий-кремниевого сплава на предельных степенях деформации [5-7]. При необходимости они могут видоизменяться в зависимости от химического состава материала, степени его деформации, вида термообработки. Отсутствуют серьёзные ограничения для использования других зависимостей в качестве замены этих уравнений в теле модели. Требуется лишь их определимость и пригодность для организации циклических вычислений. Для этого удобно использовать имеющиеся в справочниках зависимости деформационного упрочнения материалов при волочении в координатах напряжение – деформация [1].

Уравнения 4 и 4а [5-7] реализуют формулы определения тангенса приведённого угла по И.Л. Перлину и действительны для всех реальных случаев использования модели.

Уравнения 5 и 5а [5-7] являются упрощением формулы напряжения волочения Перлина при малых значениях угла  $\alpha$  и коэффициента трения

$f_n$ [1]. Данная формула включена в модель с учётом её минимальных отклонений от экспериментальных данных, которые были получены при измерении усилий волочения микропровода из алюминий-кремниевых сплавов. Формально она является частной, но действует в широком диапазоне реальных процессов волочения микропровода из различных материалов, протекающих при использовании качественных смазок. Потому и рекомендуется нами для широкого использования в рамках модели.

Уравнения 6 и 6а [5-7] связывают произведения скоростей движения проволоки после выхода её из волок на выходные сечения проволоки по переходам, т.е. являются условиями постоянства объёма и, соответственно, универсальны.

Уравнения 7 и 7а [5-7] реализуют изменения скоростей тяговых шайб по переходам в зависимости от машинной вытяжки и также универсальны.

Уравнения 8 и 8а [5-7] введены для расчёта коэффициентов запаса при волочении и носят универсальный характер.

Условия 9 и 9а - 12, 12а [8] являются фундаментальными для процесса многократного волочения со скольжением [1] и универсальны.

Условия 13 и 13а [8] – характеризующие критерий снижения усилия волочения по ходу процесса, не являются универсальными, однако их соблюдение в процессе волочения микропровода весьма желательно.

Результирующие матрицы критериев 14 - 18 определяются в рамках модели аналогично соответствующим им условиям 9, 9а - 13, 13а [8,9].

Уравнения окончательного расчёта переходов 19 - 21 и 19а - 21а [9] определены в рамках теории волочения [1] и носят универсальный характер.

Таким образом, ограничениями для применения модели с точки зрения теоретических основ процесса волочения [1] являются лишь малые значения угла  $\alpha$ , коэффициента трения  $f_n$ , а также средние и низкие скорости волочения (до 10 м/с), что делает использование разработанной модели возможным в значительном числе практических случаев.

Фактически условиями применения модели являются - малые значения рабочего угла волок  $\alpha$ , коэффициента трения по нормальному давлению  $f_n$ , а также средние и низкие скорости волочения. Небольшое число ограничений делает разработанную модель широко применимой на практике.

В результате работы получен общий вид алгоритма в математической нотации (аналитическое описание модели), процесса многократного волочения со скольжением микропровода из алюминиевых сплавов с соответствующими ограничениями, пригодный для использования в универсальной программной среде, например, в свободной среде SciLab с MEPL-подобным интерфейсом.

### Список литературы

[1] Перлин И.Л., Ерманок М.З. *Теория волочения*. 2-е изд. Москва, Изд-во Металлургия, 1971, 2-е изд., 448 с.

[2] Волков А.В., Бондаренко Г.Г. Разработка и реализация модели процесса многократного волочения микропроволоки. *Москва, Научно-технологические исследования*, №5, 2002, т. 3, стр. 19-23.

[3] Волков А.В., Бондаренко Г.Г. Совершенствование модели волочения микропроволоки. Часть I. *Москва, Научно-технологические исследования*, №1, 2004, т. 1, стр. 14-18.

[4] Волков А.В., Бондаренко Г.Г. Совершенствование модели волочения микропроволоки. Часть II. *Москва, Научно-технологические исследования*, №3-4, 2005, стр. 34-38.

[5] Волков А.В. Методика построения и анализа дискретных математических моделей. Научно-технологические исследования в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 17-18 декабря 2009 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 г. С. 27-28.

[6] Волков А.В. Методическая особенность математической модели волочения. Научно-технологические исследования в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 7-9 декабря 2010 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010 г., С. 11-12.

[7] Волков А.В. Общий вид модели волочения микропроволоки. Научно-технологические исследования в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 30 ноября - 2 декабря 2011 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011 г. С. 4.

[8] Волков А.В. Критериальный модуль модели волочения. Научно-технологические исследования в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 4-6 декабря 2012 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012 г. С. 4 - 5.

[9] Волков А.В., И.К. Устинов. Модули логического сравнения и расчёта переходов модели волочения. Научно-технологические исследования в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 25-27 ноября 2014 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г. С. 50 - 52.

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

**Устинов Игорь Кириллович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru.



В.К. Шаталов, С.П. Сорокин, А.О. Штокал

## **ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС ПРИ ТОРЦОВОМ ТРЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОЛОДКИ, ВЫРЕЗАННОЙ ИЗ НАПЛАВКИ ВТ6СВ ПО НАПЛАВКЕ ИЗ ДИБОРИДА ТИТАНА.**

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

Надёжность работы запорной арматуры изделий судостроения определяется в первую очередь состоянием уплотнительных поверхностей узла затвора. Расширяющееся применение титановых сплавов для изготовления запорной арматуры, обуславливает разработку новых технологий улучшения антифрикционных свойств, способов упрочнения путем нанесения специальных покрытий, поверхностного легирования, напыления и др.

Такая технология может быть создана на базе процессов электрохимического формирования оксидных покрытий на поверхности титановых сплавов микродуговым оксидированием (МДО). В качестве кислородсодержащего материала, упрочняющего сплав предложено использовать тонкий поверхностный оксидный слой наплавочных прутков [1]. 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 наплавочных 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 0,75%вес) и обеспечивать химическую однородность наплавленного слоя сплава.

В настоящей работе рассматриваются присадочные материалы из титановой сварочной проволоки композиций Ti–Al–V, марка сплава ВТ6св (ГОСТ 27265-87), подвергнутые микродуговому оксидированию в электролите специального состава [2].

Было принято решение провести сравнительные испытания образцов наплавочных полученных с использованием прутков, обработанных в электролите с тринатрийфосфатом  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (режим 2-2); в электролите из  $\text{NaAlO}_2$  и  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (режим 3-2); а также прутками, подготовленными по действующей технологии – в исходном состоянии (режим 1-2).

Сравнительные испытания на истирание проводили на опорном подшипнике, предназначенном для работы в морской среде. Опорная поверх-

ность подшипника из сплава 5В наплавлена слоем диборида титана толщиной 4 мм. Твердость наплавленного слоя 890 HV<sub>10</sub>. Рабочий диаметр подшипника 40 мм. Шероховатость поверхности трения подшипника Ra 0,12.

Для сравнительных испытаний были выбраны образцы №№ 1–2, 2–2 и 3–2, имеющие более высокую твердость из образцов, обработанных по соответствующим режимам МДО. Износ проводили при торцовом трении по диску подшипника на образцах диаметром 9 мм вырезанных из наплавки оксидированными прутками ВТ6св. Схема испытания приведена на рис.1.



Рис.1. Схема испытания по наплавке из диборида титана

В зону трения подавалась вода (4% NaCl) с расходом 2 л/мин. Частота вращения 315 об/мин, скорость скольжения 39,56 м/мин. Усилие прижатия образца к диску  $F = 30$  кгс. (давление  $P = 4,7$  МПа). Пройденный путь образца 593,5 м (время движения – 15 мин).

При проведении испытаний выявлено, что изнашивается образец-колонка, износ поверхности подшипника незначителен и по снижению веса выявить трудно. В результате износа пары трения шероховатость поверхности опорного подшипника увеличилась незначительно – до Ra 0,32. Весовые и линейные результаты износа образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Износ образцов из наплавки по дибориду титана

Образец	Твердость, HV	Исходн. образец, г.	Масса за 10 минут трения, г.	Масса за 15 минут трения, г.	Износ за 15 мин., г.	Износ, мм
1 – 2	351	4,6896	4,5929	4,4719	0,2177	0,92
2 – 2	421	5,2944	5,1686	5,1229	0,17	0,68

					15	
3 – 2	421	5,3675	5,2656	5,1915	0,17 60	0,7

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о высокой износостойкости наплавки из диборида титана и возможности применения для изготовления опорных подшипников работающих в водной среде.

Выводы:

1. В результате проведенных сравнительных экспериментов выявлено, что высшие механические свойства и износостойкость имеют образцы, изготовленные из наплавки полученных аргонодуговым способом с неплавящимся вольфрамовым электродом присадочными прутками диаметром 4 и длиной 400 мм обработанными МДО в растворе тринатрийфосфата, при напряжении 280В и времени экспозиции 30 мин.

2. Можно предположить, что предлагаемые способы МДО прутков на основе титана позволяют значительно повысить износостойкость изделий

### Литература

1. 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, 20. 09. 2009 г.

2. 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. 77-30569/38372105, 2012. 4с.

**Шаталов Валерий Константинович** — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Технологии обработки материалов» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkshatalov@yandex.ru.

**Сорокин Сергей Павлович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorokin994@mail.ru.

**Штокал А.О.** — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Суау-themoc1@yandex.ru.

Т.В. Попова, А.Г. Вяткин

## **КОНТАКТНОЕ (ПЛАСТИЧЕСКОЕ) ТРЕНИЕ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ.**

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

На сегодняшний день холодная объёмная штамповка, несмотря на свою достаточно давнюю историю, является одним из наиболее прогрессивных способов изготовления деталей. Это связано с достаточно малой трудоёмкостью, экономичностью использования материала, высокой точностью, изменением свойств материала после обработки (увеличивается прочность). Однако у данного способа изготовления деталей, по сравнению с горячим деформированием, есть серьёзный недостаток – усилие деформирования при холодной объёмной штамповке должно быть гораздо больше. Одним из ключевых факторов, влияющих на величину необходимого усилия деформирования, является контактное трение (контактное трение является причиной неравномерности деформации, для преодоления которой необходимо увеличивать деформирующее усилие). Влияние контактного трения минимально для холодной объёмной штамповки по сравнению с другими способами деформирования, и существует необходимость более подробного изучения этого явления для поиска возможных способов уменьшения влияния контактного трения на формообразование при холодной объёмной штамповке [1].

Поверхности инструмента и обрабатываемого металла, внешне гладкие, на самом деле имеют сложный рельеф с большим количеством микро- и макровыступов и неровностей, что можно увидеть, если посмотреть на поверхности под увеличением. В результате механического взаимодействия выступов и неровностей инструмента и заготовки появляется контактное трение. Это усугубляется адгезией (взаимодействием поверхностей обрабатываемого тела и инструмента на молекулярном уровне) на поверхности контакта. На начальных стадиях деформирования поверхность контакта гораздо меньше, чем на более поздних стадиях, когда увеличивается нагрузка и шероховатость.

Много внимания отличиям контактного трения от машинного уделял И.М. Павлов в своих трудах [2]. Он обратил внимание на следующие факторы: при контактном трении обрабатываемая поверхность пластически деформирована и постепенно принимает форму обрабатывающего инструмента, что увеличивает контактирующую поверхность; во время пластической деформации из глубины металла на контактирующую поверхность непрерывно поступают новые частицы металла, вследствие чего поверхность контактирующего металла непрерывно «обновляется»; из-за контактного трения при холодной деформации происходит значительный нагрев контактирующих поверхностей; движение частиц поверхностно деформируемого тела по поверхности контакта в общем случае направлено в разные стороны,

- все это факторы не свойственны непластическому трению, и показывают, насколько разными являются контактное и непластическое трение.

На элементарные силы контактного трения влияют следующие факторы: состояние поверхности давящего инструмента, состояние поверхности деформируемой детали, химический состав обрабатываемого материала, температура, скорость деформирования, характер приложения нагрузки. Рассмотрим каждый фактор.

1) Шероховатость поверхности давящего инструмента, контактирующей с деформируемым телом.

Влияние этого фактора неоспоримо и настолько велико, что не ограничивается влиянием качества поверхностей (неоспоримо, что чем меньше шероховатость поверхностей, тем меньшее значение имеют силы трения при прочих равных условиях).

И.М.Павлов исследовал тот факт, что величина сил трения различается в зависимости от направления скольжения металла по отношению к направлению обработки и назвал это явление анизотропией трения. В.П.Северденко и А.П.Степаненко продолжили изучение анизотропии трения и установили, что при обработке грубо обработанным инструментом анизотропия трения достигает 65% [2].

2) Вид обработки контактной поверхности деформируемой детали

Е.П.Унксов считал, что этот фактор имеет значение лишь в момент, когда начинается деформация. Качество поверхности изменяется при дальнейшей обработке, высота микронеровностей уменьшается.

3) Физико-химическое состояние поверхности

Если при холодной деформации тщательно очистить контактную поверхность деформируемых тел от окисных пленок и загрязнений, трение достигнет такой величины, что на поверхностях металлов может произойти схватывание. Минимального значения сил трения можно достигнуть, оставив на поверхности металла окисную пленку определенной, достаточно малой, толщины, при увеличении толщины окислов трение увеличится.

4) Температура деформации

При холодной деформации трение наименьшее. С увеличением температуры во время деформирования контактное трение увеличивается, достигая максимума в некотором интервале.

Если увеличить скорость скольжения металла по поверхности инструмента, т.е. увеличить скорость деформации, контактное трение несколько снизится. Это показывают исследования С.И. Губкина, М.В. Врацкого, И.М. Павлова [2].

5) Характер нагрузки

При применении вибрационной нагрузки деформирующее усилие при осадке может снижаться в 1,5-2 раза, неравномерность деформации уменьшается, что свидетельствует о существенном уменьшении контактного трения.

О влиянии контактного трения на обработку металлов давлением (ОМД) известно давно, многие ученые занимались данной проблемой. М.В.Сторожев, Е.А.Попов пишут о том, что в большинстве случаев трение

играет негативную роль при ОМД (кроме операций, которые без него не осуществимы, например, прокатка, вальцовка и т.д.). Негативное влияние трения обусловлено следующими факторами [3]:

1) Контактное трение является причиной появления или усиления (если неравномерная деформация обусловлена характером операции) неоднородности деформации. Это происходит потому, что в каждой точке контактирующей поверхности появляются касательные силы трения, которые являются причиной появления касательных напряжений на контактирующих поверхностях обрабатываемого тела. Такие напряжения по направлению противоположны направлению скольжения металла относительно поверхности обрабатывающего инструмента в каждой точке. Следствием этого может являться и изменение самой схемы напряженного состояния. Действие трения от контактирующих поверхностей распространяется вглубь обрабатываемого материала, из-за чего появляются зоны, в которых деформация затруднена. Из-за неоднородности деформации появляется неравномерность процессов упрочнения и разупрочнения в обрабатываемом материале. Такое явление приводит к неоднородности структуры обрабатываемого тела.

2) Контактное трение преодолевают с помощью активной нагрузки, поэтому для того, чтобы преодолеть контактное трение, необходимо увеличить деформирующее усилие и работу деформации, причем в некоторых случаях увеличить весьма значительно.

3) Из-за контактного трения увеличивается износ поверхности инструмента. Износ вызван не только трением, но и продолжительным нагревом контактирующей поверхности, а также увеличением деформирующего усилия.

4) Для уменьшения контактного трения применяют технологические смазки, что усложняет технологический процесс и иногда требует дополнительной обработки деформируемой поверхности.

Исследование контактного трения для различных условий холодного деформирования и для различных материалов является актуальной задачей для современного машиностроения, решение которой поможет расширить область применения холодной объемной штамповки.

### Список литературы

[1] Билибин К.И. Холодная штамповка. Москва, Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2010, 68с.

[2]Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. 4-е изд. Москва, Машиностроение, 1977, 423с.

[3]Голенков В.А., Дмитриков А.М., ред. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. Москва, Машиностроение, 2004, 464с.

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

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

И.К. Устинов, И.Ю. Филимонов

## **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ.**

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

В настоящее время вопрос о контроле качества износостойких покрытий стоит на одном из первых мест в металлообработке. На многих предприятиях контроль износостойкого покрытия ограничивают внешним осмотром покрытия инструмента, либо измерением микротвердости покрытия. Иногда контролируют еще и толщину покрытия, также используют так называемый метод царапин[1]. В лабораториях кафедры мы изучали и опробовали так называемый метод оперативного контроля качества адгезии износостойких покрытий, основа этих экспериментов заключалась в том, что поверхность (площадь) инструмента, покрытого износостойким покрытием [2](нитрид титана TiN), а сам инструмент из P6M5 подвергалась вдавливанием алмазного конуса с использованием твердомера Роквелла. После чего проводились работы определения величины скола в зоне вдавливания алмазного конуса, а качество адгезии покрытия на инструменте из быстрорежущих сталей SRC можно определять по отношению площади скола покрытия в зоне отпечатков твердости по Роквеллу ( $S_{ск}$ ) к площади отпечатка в плоскости покрытия ( $S_{отп}$ ) при нагрузке на индентор 1470Н. Тогда формула может иметь следующий вид:

$$SRC = (S_{ск} / S_{отп}) \cdot 100\%$$

Предоставленный метод широко используется в современной инструментальной технике[3]. Одним из главных недостатков данного метода, является трудность проведения замеров на фасонном и сложно-профильном инструменте, где приходится готовить дублиеры-образцы, что приводит, как правило, к большим издержкам в производстве и не дает точного ответа на качество износостойкого покрытия.

### **Список литературы**

1. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий/А.Д. Зимон.-М.: Химия,1977. - 352с.
2. Мацевитый В.М. Способ контроля качества адгезии износостойких покрытий / В.М. Мацевитый, Л.М. Романова, В.М. Береснев // Тез. докл. научно-техн. конф. «Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов». - Краснодар (Россия).- 1983. -С.92-93.

3. Мойсеенко О.И. Инструментальные материалы: Учеб. пособие / О.И. Мойсеенко, О.Н. Чкалова. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 196 с.

**Устинов Игорь Кириллович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru.

**Филимонов Илья Юрьевич** – заведующий лабораториями КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: M4KF-Kafedra@rambler.ru.



А.Н. Прохоров, Е.Н. Малышев

## **ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ВАРИАНТА ОБРАБОТКИ СЛОЖНОЙ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ**

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

Деталь представляет собой корпус сложной пространственной формы, принадлежащий устройству для распределения жидкостей. Заготовку получают литьем по выплавляемым моделям, после чего происходит механическая обработка согласно данным чертежа.

Со всех шести сторон детали имеются торцы и исполнительные и крепежные отверстия, которые необходимо обработать. С четырех сторон деталь имеет поверхности для обработки под номерами 1 – 4 (рис.1). Оставшиеся две стороны находятся друг на против друга и имеют поверхности для обработки 5 – 13 и 14 – 20 соответственно (рис.1).

Шесть торцевых поверхностей детали: 1 (4 штуки), 5 и 14, имеют сложную геометрическую форму, поэтому лучше их обрабатывать на фрезерном станке, нежели на токарном, так как такая сложная форма будет способствовать прерывистому резанию резца, что плохо скажется на его стойкости. Также следует учесть требование перпендикулярности торца 1 относительно оси отверстия 4 согласно чертежу детали (такое требование предъявлено к каждому из этих четырех торцов). К торцу 14 также предъявлено требование перпендикулярности относительно цилиндрической поверхности 19. Если говорить о шероховатости, то согласно чертежу, у поверхностей 9 и 14 она должна быть Ra 6.3, что означает необходимость только в черновой обработке. У поверхностей 1 шероховатость должна быть Ra 3.2, т.е. необходима чистовая обработка, а у торца 5 этот показатель равен Ra 1.6, что требует шлифования (также для торцов 17 и 8). К торцу 18 не предъявляется каких-либо требований по обработке, и он получается сразу же после литья.

Помимо торцевых поверхностей у данной детали присутствует множество отверстий. Отверстия 2 (по 6 штук на каждом из соответствующих торцов 1), 6 (4 штуки) и 15 (4 штуки) являются резьбовыми. Для их обработки необходимо сверление с последующим нарезанием резьбы. Соответствующие фаски 3, 7 и 16 получают зенковкой. Отверстие 12 получается расверливанием с последующим зенкерованием, так как оно имеет 8 квалитет точности. Также к этому отверстию предъявляется требование соосности относительно отверстия 19. Данное требование может быть соблюдено, если использовать при обработке отверстия 8 в качестве базы отверстие 19.

Четыре отверстия 4 можно обработать различными способами: растачиванием, фрезерованием, долблением. Окончательная обработка этих отверстий требует шлифования, так как показатель шероховатости этих поверхностей, согласно чертежу, Ra 1.6 и выполняются они по 7 квалитету точности. Тоже самое относится к отверстию 19, которое имеет 8 квалитет точности, и к отверстию 20. Отверстие 10 можно получить теми же метода-

ми, но оно выполняется по 14 качеству точности, что соответствует черновой обработке, либо обработки этого отверстия может и не потребоваться, так как оно имеет достаточно небольшую глубину и может быть получено после литья. Фаска 11 и фаска на отверстии 19 может быть получена резцом.

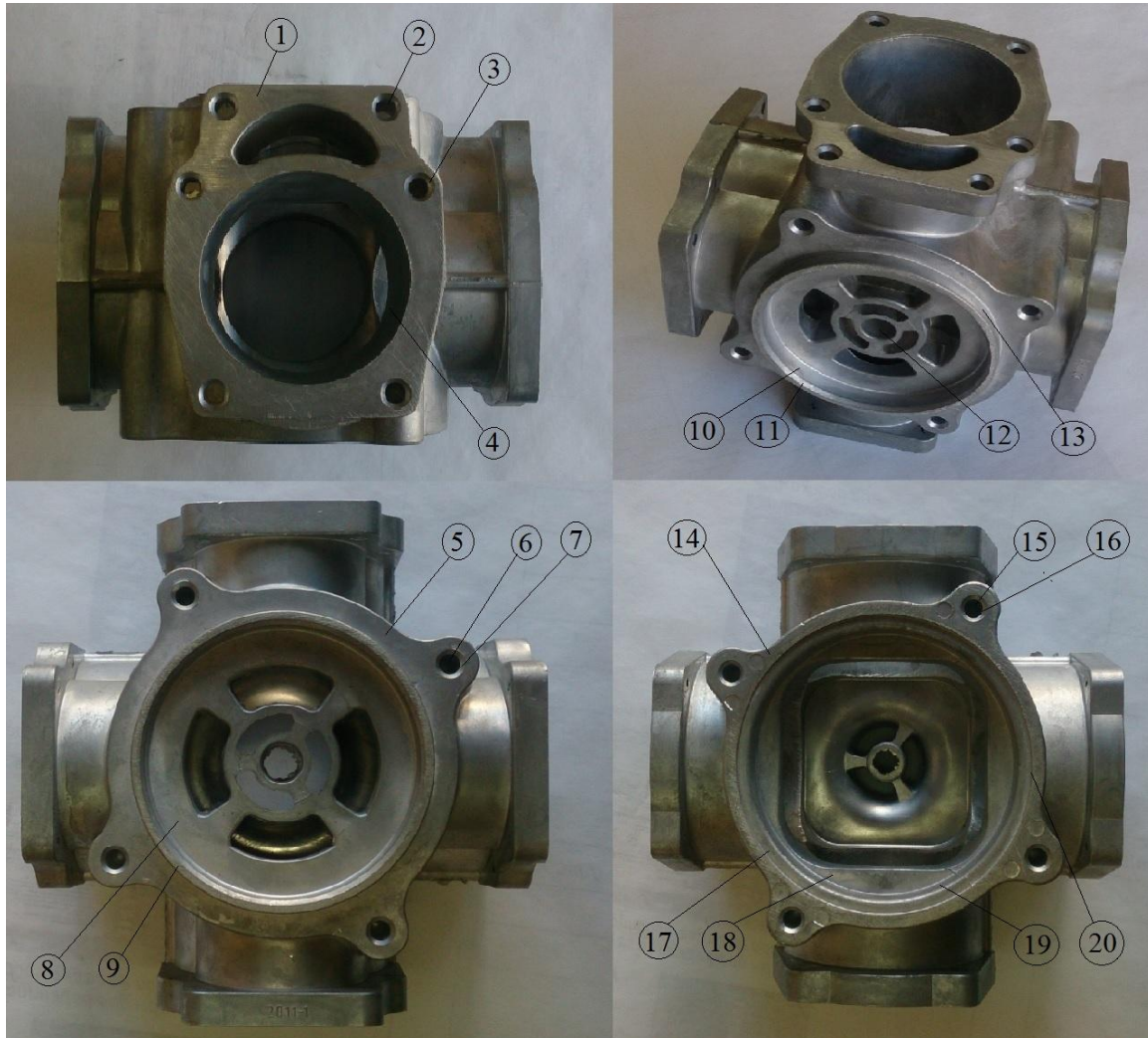


Рис. 1. Корпус

Все поверхности данной детали можно обработать различными методами в зависимости от имеющегося на предприятии оборудования, однако необходимо учитывать возможные трудности при проектировании и изготовлении оснастки для обработки на тех или иных станках. Производительность различных методов также отличается друг от друга, что тоже является весомым аргументом при проектировании последовательности обработки.

**Прохоров Алексей Николаевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: P-r-o-l-e-X@yandex.ru.

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

В.В. Савосто, И.Н. Зыбин

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ СБОРКИ И СВАРКИ УЗЛОВ ДЕРЖАТЕЛЯ ПЕРЕДНЕЙ ПАНЕЛИ АВТОМОБИЛЯ**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одними из основных задач при разработке технологических процессов являются повышение качества производимой продукции, сокращение трудовых и материальных затрат на изготовление изделий, увеличение производительности труда [1, 2].

Для разработки технологического процесса изготовления изделия требуется предварительно изучить его конструкцию и выполняемые функции, проанализировать технологичность конструкции. При анализе технологичности конструкции может быть выявлена возможность внесения в имеющийся технологический процесс изменений, не влияющих на параметры качества изделия, но облегчающих его изготовление [1, 2].

С целью сокращения трудовых и материальных затрат на изготовление изделия и повышения производительности труда целесообразно изменить технологический процесс производства держателя передней панели автомобиля VW Jetta, изготавливаемого ООО «Шердель-Калуга».

Держатель передней панели предназначен для крепления деталей рулевой колонки, панели приборов, подушек безопасности, кронштейна вещевого ящика, элементов аудио- и климатической системы, декоративных накладок. Общий вид держателя передней панели представлен на рис. 1.

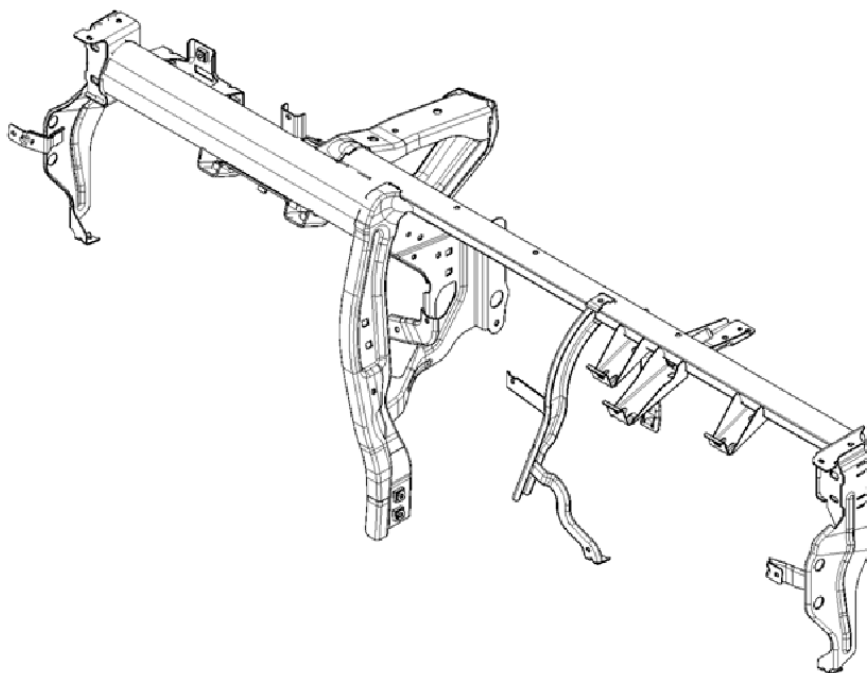


Рис. 1. Держатель передней панели

Годовая программа выпуска держателя передней панели составляет 80000 шт. Для обеспечения высокой производительности процесса производства и стабильности параметров, определяющих качество продукции, при изготовлении держателя передней панели применяется роботизированная дуговая сварка в смеси защитных газов. При роботизированной сварке изделия для сборки используются быстродействующие зажимные приспособления с пневматическим приводом.

Действующий в настоящее время на предприятии технологический процесс сборки и сварки держателя передней панели включает 4 сборочно-сварочные операции:

- 1) сборка и сварка боковых крепежных узлов;
- 2) сборка и сварка узла основания и навесных элементов;
- 3) приварка боковых крепежных узлов к основанию;
- 4) приварка навесных элементов.

Боковые крепежные узлы имеют замкнутый профиль, что делает их полную сборку за один установ практически невыполнимой из-за невозможности закрепления боковых пластин и закладных элементов, обеспечивающих жесткость сваренного узла. Поэтому на вышеуказанном предприятии эта операция выполняется за два установа. Боковые крепежные узлы конструктивно схожи между собой, конструкция левого крепежного узла представлена на рис. 2.

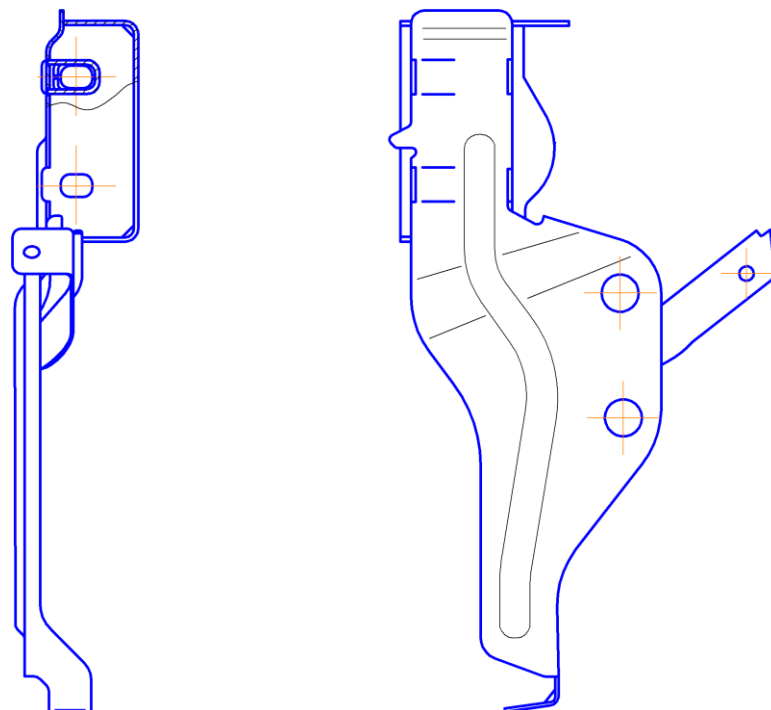


Рис. 2. Крепежный узел

Для осуществления полной сборки боковых крепежных узлов держателя передней панели за один установ предлагается перераспределить детали между боковыми крепежными узлами и основанием, что позволит со-

кратить затраты времени на установку и снятие деталей, уменьшить количество применяемых сборочно-сварочных приспособлений.

Предлагаемые изменения технологического процесса заключаются в исключении из конструкции боковых крепежных узлов деталей, присоединяемых к основанию и включению их в состав узла основания. Этим достигается возможность сборки и сварки боковых крепежных узлов в одном приспособлении без переустановки. Таким образом исключаются затраты времени на снятие и установку элементов боковых крепежных узлов, уменьшается количество применяемых сборочно-сварочных приспособлений.

Изменение конструкции указанных элементов приводит к необходимости разработки сборочно-сварочной оснастки для их производства, а также для изготовления несущего узла. Такая оснастка может быть разработана на основе уже имеющейся на предприятии.

Основными элементами приспособлений для сборки и сварки узлов держателя передней панели могут являться кондукторы, предназначенные для совместного закрепления деталей. Эти кондукторы включают в себя постели, образующие опорные установочные поверхности, копирующие форму устанавливаемых деталей; постоянные упоры, применяемые для фиксации деталей по боковым сторонам; призмы для установки деталей цилиндрической формы, а также направляющие штифты и зажимные приспособления [3, 4].

Таким образом, для рассматриваемого изделия предложено изменение технологического процесса производства с целью сокращения трудовых и материальных затрат на его изготовление, уменьшения количества используемых сборочно-сварочных приспособлений.

#### **Список литературы:**

1. Справочник технолога – машиностроителя / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. Москва, Машиностроение, 1986, Т.1, 656 с.
2. Маталин А. А. Технология машиностроения. Ленинград, Машиностроение, 1985, 496 с.
3. Таубер Б. А. Сборочно-сварочные приспособления и механизмы. Москва, ГНТИ Машиностроительной литературы, 1951, 410 с.
4. Зубарев Ю.М. Расчет и проектирование приспособлений в машиностроении. URL: [http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_id=61360](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=61360) (дата обращения 28.10.2015).

**Савосто Владимир Витальевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vitaliy9533166022@yandex.ru.

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

Е.Н. Малышев, С.А. Бысов

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ И СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ**

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

Как показывают исследования [1], при традиционной организации машиностроительного производства предметы труда находятся в цехах только 1% всего времени создания и производства (от задания на проектирование до выхода готовой продукции), при этом на технологическом оборудовании – всего 5% времени от нахождения деталей в цехах, остальное время приходится на дополнительные операции и перерывы, в том числе пролеживание.

Сборочные операции являются составной частью подавляющего числа технологических процессов изготовления изделий в машиностроении. Примерно 35...40% соединений деталей осуществляется по гладким цилиндрическим поверхностям, примерно треть из них – продольно-прессовые соединения, образованные запрессовкой различного вида втулок. Эти втулки выполняют роль подшипников скольжения, направляющих элементов, усиливают (армируют) несущие поверхности, улучшают ремонтпригодность изделия (являются сменными). Наиболее распространенными представителями сборочных единиц с запрессованными втулками являются корпуса, кондукторы, рычаги и шатуны.

Возникающие при запрессовке деформации тем или иным образом изменяют форму и размеры исполнительных поверхностей соединенных деталей, в ряде случаев значительно по сравнению с изначальными значениями. Для обеспечения требуемой точности осуществляется механической обработка деталей в сборе с целью устранения негативного влияния сборочной взаимосвязи, а также технологических погрешностей. Технология производства таких изделий включает обработку базовых и сопрягаемых поверхностей деталей на металлорежущих станках, соединение деталей на прессах или другом сборочном оборудовании, обработку деталей в сборе на металлорежущих станках.

При установке сборочной единицы на станок для соответствующей обработки деталей в сборе проявляются все погрешности, свойственные механической обработке, доминирующей из которых, как правило, оказывается погрешность установки.

При исследовании механосборочных производств большое внимание уделяется оценке простоев и нахождению условий повышения эффективности использования основного оборудования [2]. Время, связанное с перемещением деталей на сборку и возвратное перемещение сборочных еди-

ниц на станок для обработки в сборе, является непроизводительно затраченным и может достигать нескольких часов. Устранить указанные недостатки традиционной технологии можно посредством концентрации процессов сборки и обработки в единой технологической системе.

Производственный цикл характеризуется его длительностью и структурой. Длительность производственного цикла — календарный промежуток времени между началом и окончанием производственного процесса изготовления одного изделия или партии этих изделий. Структура производственного цикла, складывается из двух основных элементов — времени производства и перерывов в работе.

В производственной практике сокращение длительности производственного цикла осуществляется как за счет сокращения времени производства, так и приведения к минимуму различного рода перерывов.

Сокращение времени производства достигается совершенствованием технологических процессов, внедрением более производительного оборудования, комплексной механизации и автоматизации производства, совершенствованием конструктивно-технологических параметров изделия.

Время перерывов в производственном процессе обусловлено режимом труда, межоперационным пролеживанием деталей и недостатками в организации труда и производства.

Межоперационные перерывы обусловлены временем партионности и ожидания и зависят от характера обработки партии деталей на операциях. Перерывы партионности связаны с особенностями обработки предметов труда партиями. Перерывы партионности происходят потому, что каждая деталь, поступая на рабочее место в составе партии аналогичных деталей, пролеживает до начала обработки и по окончании обработки, ожидая пока вся партия не пройдет через данную операцию. Перерывы ожидания возникают в тех случаях, когда предыдущая операция заканчивается раньше, чем освобождается рабочее место, предназначенное для выполнения следующей операции. Междусменные перерывы обуславливаются принятым на предприятии режимом работы. К ним относятся выходные и праздничные дни, перерывы между сменами и обеденные перерывы.

В ходе проведенных исследований авторами выявлены организационно-технологические факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на величину сокращения длительности производственного цикла  $\Delta\theta$ , т.е. инструменты направленного воздействия (управления) на организацию производственного процесса:  $\Delta_{уст}$  - погрешность установки сборочной единицы на станок;  $\tau_{mp}$  - время транспортировки;  $t^*$  - эффективная глубина резания при обработке деталей в сборе;  $N_{mp}$  - величина транспортной партии.

Одним из наиболее эффективных инструментов исследования, кото-

рый основан на системном подходе, является метод планирования и реализации факторных экспериментов [3].

При проведении численного полнофакторного эксперимента (ПФЭ) для исследования организационно-технологических факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на величину сокращения длительности производственного цикла в качестве таких факторов приняты:  $N_{mp}$ ,  $\Delta_{уст}$ ,  $\tau_{mp}$  и  $t^*$ . Факторы устанавливались на двух уровнях, то есть имеет место полный факторный эксперимент  $2^4$ .

Уровни факторов в натуральном и безразмерном масштабах представлены в таблице.

Уровни факторов в натуральном и безразмерном масштабах

Факторы	Уровни факторов			Интервалы
	+1	0	-1	
$N_{mp}$	35	25	15	10
$\Delta_{уст}$	0,5	0,25	0	0,25
$\tau_{mp}$	20	16	12	4
$t^*$	0,4	0,25	0,1	0,15

Получена регрессионная модель в кодированном масштабе уровней факторов:

$$y(\Delta\theta) = 46,24 + 5,7N_{mp} + 11,49\Delta_{уст} + 8,0\tau_{mp} - 4,92t^*.$$

Величина и знак коэффициентов в уравнении регрессии (2) говорят о силе и характере влияния исследуемых факторов на величину сокращения длительности производственного цикла при внедрении предлагаемых организационно технологических мероприятий (концентрации операций).

Так из анализа модели следует, что сила влияния погрешности установки сборочной единицы на станок  $\Delta_{уст}$  в два раза больше влияния  $N_{mp}$ .

Второе по величине влияние оказывает время транспортировки  $\tau_{mp}$ . Коэффициент при  $t^*$  в уравнении регрессии отрицательный, это значит, что с увеличением  $t^*$  экономия длительности производственного цикла уменьшается, то есть при увеличении глубины резания сокращается количество ходов и соответственно время обработки.

Доминирующими параметрами, оказывающими влияние на сокращение длительности производственного цикла изготовления изделий на основе концентрации сборочных и обрабатывающих процессов, являются погрешность установки сборочной единицы для обработки деталей в сборе



$\Delta_{уст}$  и время перемещения транспортной партии между операциями  $\tau_{тр}$ .

Внедрение концентрации обработки и сборки наиболее эффективно при обработке непрочных соединений, когда значение величины эффективной глубины резания при обработке деталей в сборе  $t^*$  – наименьшее.

#### **Список литературы**

1. Шишмарев, В.Ю. Машиностроительное производство / В.Ю. Шишмарев, Т.И. Каспина. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 352с.

2. Кoryтов, В.Н. Повышение эффективности механообрабатывающего производства на основе комплексного анализа технологических и организационных факторов. Дисс. ... канд.техн.наук. Гаврилов-Ям, 2004. 136с.

3. Боровиков, С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности / С.М. Боровиков. Мн.: Дизайн ПРО, 1998. 336с.

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

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

В.В. Калмыков, М.В. Мусохранов, К.Н. Юсупова

## **ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МЕТАЛЛА**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На состояние поверхностных слоев деталей влияют следующие факторы:

1. местные напряжения возникают при контакте поверхностей в области касания микронеровностей;

2. местные концентрации напряжений, возникающие в областях с резкими изменениями формы поверхности. При этом концентраторами напряжений являются не только галтели, отверстия и канавки, но и риски, трещины, впадины микрорельефа поверхностей. Это приводит к зарождению процессов усталостного разрушения [1];

3. образование внутренних остаточных напряжений.

Формируемые в процессе изготовления деталей остаточные напряжения оказывают важное значение на эксплуатационные характеристики изделий. В зависимости от причин возникновения остаточные напряжения делятся на механические, термические, химические усадочные, диффузионные, ионообменные и кристаллизационные. По характеру бывают нормальные (напряжения сжатия или растяжения) и касательные остаточные напряжения. Также их классифицируют по протяженности силового поля. Данная классификация была впервые сформулирована Н.Н. Давиденковым и имеет вид:

1. Напряжения 1-го рода — макронапряжения. Они охватывают области, соизмеримые с размерами детали, и имеют ориентацию, связанную с формой детали.

2. Напряжения 2-го рода — микронапряжения, распространяющиеся на отдельные зерна металла или на группу зерен.

3. Напряжения 3-го рода — субмикроскопические, относящиеся к искажениям атомной решетки кристалла [2].

Основные методы определения остаточных напряжений можно разделить на 3 группы (Рис. 1).

Наиболее распространены механические методы определения остаточных напряжений. Это связано, как с простотой использования, так и с аналогией представлений о напряжениях в расчетах деталей на прочность, жесткость и устойчивость. Эти методы основаны на предположении о том, что при удалении части поверхности с остаточными напряжениями у оставшейся части формируются эквивалентные напряжения, но обратные по знаку удаленным. Эти обратные напряжения вызывают деформацию детали. По измерению возникающих деформаций определяют остаточные напряжения.

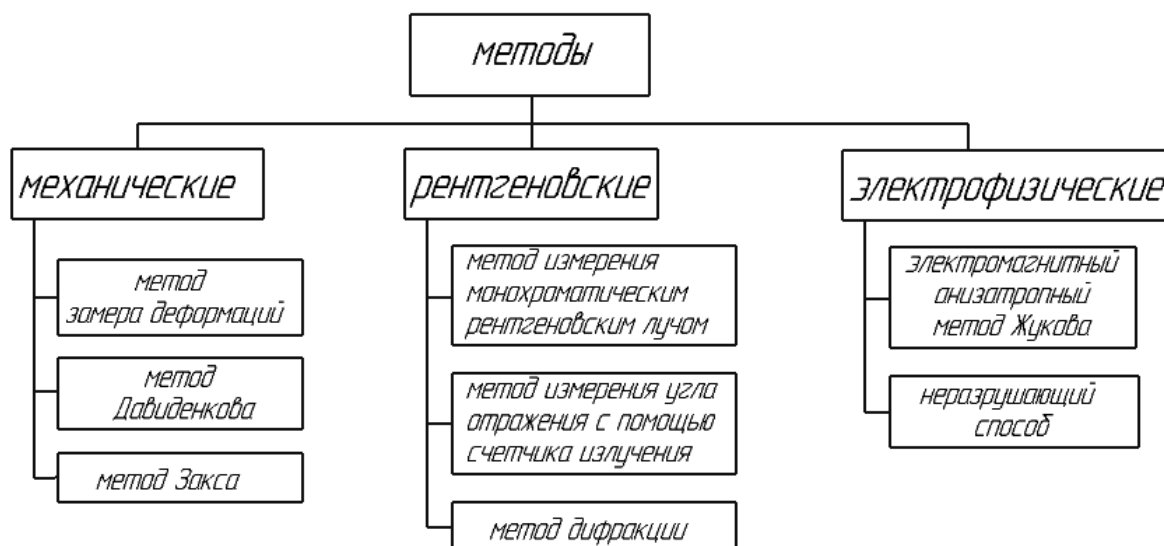


Рис.1. Методы определения остаточных напряжений

К механическим методам относятся:

1. *Метод замера деформаций.* Измерения осуществляется с помощью тензодатчиков. [3]

2. *Метод Давиденкова.* Предложен в 1931 году Н.Н. Давиденковым. Применяется при исследовании напряжений на тонкостенных цилиндрах. Для определения остаточных напряжений участок тонкостенного цилиндра разрезается по образующей и последовательно травлением снимаются цилиндрические слои. [3]

3. *Метод Закса.* Для определения остаточных напряжений из детали вырезается цилиндрический образец и засверливается [3].

Рентгеновским методом исследуются микронапряжения. Этот метод определения остаточных напряжений позволяет непосредственно измерять деформации кристаллической решетки при воздействии напряжений.

Главным преимуществом является сохранение целостности детали во время ее контроля. К недостаткам можно отнести невысокую точность измерений. Однако возможность определения остаточных напряжений без разрушения детали делает рентгеновский метод чрезвычайно перспективным.

Рентгеновский метод заключается в определении расстояния между кристаллографическими плоскостями с помощью измерения угла отражения луча. При таком рассеянии происходит интерференция лучей, в результате которой увеличивается и ослабляется интенсивность лучей.

К основным рентгеновским методам относят:

1. *Метод измерения монохроматическим рентгеновским лучом.* Его действие основано на направлении узкого пучка на исследуемую поверхность металла и фиксировании отраженных лучей на рентгеновской пленке в виде кольцевого затемненного следа.

2. *Метод измерения угла отражения с помощью счетчика излучения.* Заключается в отражении рентгеновского луча от поверхности металла. Интенсивность излучения фиксируется в камере счетчика, совершающего периодическое колебательное движение [4].

3. *Метод дифракции.* Основан на получении с поверхности металла детали двух рентгенограмм, снятых при различных углах падения первичного рентгеновского луча [4].

Весьма перспективными для промышленного применения являются электрофизические методы, при которых остаточные напряжения определяются по изменению электромагнитных свойств поверхностного слоя. К электрофизическому методу относят:

1. *Электромагнитный магнитоанизотропный метод Жукова (эффект Э.Виллари).* Основан на магнитной анизотропии ферромагнитных материалов [5].

2. *Неразрушающий способ* определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов с различными электромагнитными свойствами. Способ основан на явлении скин-эффекта в проводнике. Проводящее изделие послойно исследуют путем подачи в него электромагнитного поля различной частоты и измерения характеристик сигнала-отклика изделия. [5].

Проведенный обзор позволяет прогнозировать наибольшую перспективу для определения остаточных напряжений электрофизическими методами контроля.

#### **Список литературы**

1. Подзея А.В., ред. *Технологические остаточные напряжения.* Москва, Машиностроение, 1999, 216 с.

2. Дальский А.М., ред. *Технологическая наследственность в машиностроительном производстве.* Москва, МАИ, 2000, 363 с.

3. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М., ред. *Поверхностные силы,* Москва, Наука, 2003, 400 с.

4. Фелдман Л, Майер Основы анализа поверхности и тонких плеток, Москва, Наука, 2005, 343 с.

5. Иванов Сергей Юрьевич, Васильков Дмитрий Витальевич, Гутнер Александр Борисович, Васильков Сергей Дмитриевич, Бураков Александр Иванович. *Неразрушающий способ определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов.* Пат. №2327124 Российская Федерация, опубл. 20.06.2008, бюл. №17, 19 с.

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

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

**Юсупова К.Н.** — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: larylya9206@mail.ru.

Е.Н. Малышев, В.В. Калмыков, М.В. Мусохранов

## **ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕТАЛЕЙ**

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

Детали современных машин и механизмов должны обеспечивать надежную работоспособность в условиях длительной эксплуатации. Износ сопрягающихся поверхностей деталей является причиной выхода из строя более 80% изделий машиностроения [1]. Повышению износостойкости контактирующих поверхностей посвящено огромное количество исследований. Среди них есть ряд работ, посвящённых положительному влиянию сжимающих остаточных напряжений на долговечность деталей. Остаточные напряжения как правило рассматриваются как результат механической обработки. Известно, что разрушению поверхности предшествует образование микротрещин. Согласно существующей теории, трещинообразование в кристаллах сопутствует снятию напряжений. Данный процесс возможен при условии снижения уровня энергии металла. Механизм образования трещин в кристаллах протекает, когда величина упругой деформации настолько велика, что высвобождаемая при появлении трещины энергия, превышает величину поверхностной энергии. Логично предположить, что уровень поверхностной энергии препятствует образованию усталостных трещин в деталях. Накопленная энергия поверхностей зависит от величины остаточных напряжений в результате механической обработки. При остаточных напряжениях сжатия, накопленной энергии больше, чем при остаточных напряжениях растяжения, так как растягивающие напряжения способствуют трещинообразованию, высвобождая поверхностную энергию. Поэтому накопив достаточный запас энергии в поверхности формируя механической обработкой напряжения сжатия можно повысить усталостную прочность деталей.

Для образования поверхностей требуется совершить необратимую работу затрачивая механическую энергию, большая часть которой переходит в тепло [2]. Количество выделившегося тепла всегда меньше затраченной механической энергии. От 10 до 25% поглощается кристаллической решеткой.

Накопленная энергия в металле представляет собой потенциальную энергию упругого смещения атомов из их равновесного положения в кристаллической решетке, а силы, стремящиеся вернуть смещенные атомы в исходное устойчивое положение порождают напряжения. Таким образом энергия, расходуемая на механическую обработку, аккумулируется в металле в форме остаточных напряжений [2]. Величина накопленной энергии взаимосвязана с величиной остаточных напряжений.

При оценке влияния остаточных напряжений на прочность и деформацию деталей учитывается действие макронапряжений, то есть напряжений второго рода по классификации Давиденкова Н. Н. Проникающие в поверхностные слои деталей молекулы окружающей среды создают усло-

вия для возникновения эффекта Ребиндера. Он заключается в изменении механических свойств твёрдых тел вследствие физико-химических процессов, которые приводят к уменьшению поверхностной энергии. Эффект Ребиндера возможен в кристаллах с дефектной структурой, так как дефекты наряду с растягивающими остаточными напряжениями способствуют зарождению трещин.

Характер формируемых механической обработкой остаточных напряжений, зависит от выбора технологического процесса. Например, при точении углеродистых сталей резцом с положительным передним углом, в поверхностных слоях на глубине 50 – 100 мкм, в основном, образуются остаточные напряжения растяжения, а при использовании резца с отрицательным передним углом формируются напряжения сжатия [2]. А при точении стали 18ХНМА с теми же условиями, образуются остаточные напряжения сжатия. При обработки титанового сплава Ti6Al4V твердосплавным резцом с отрицательным передним углом формируются остаточные напряжения сжатия [3].

Значение переднего угла не всегда является основополагающим. В частности, при шлифовании, когда передний угол зерна абразива также отрицателен, создаются растягивающие напряжения. Это объясняется преобладающим воздействием температуры в зоне резания и при остывании приводят к растяжению поверхностного слоя со стороны внутренних слоев, т.е. к образованию в нем растягивающих остаточных напряжений.

Величина остаточных напряжений зависит от скорости резания, при увеличении которой она уменьшается.

Формируя выбором технологического процесса и условиями обработки остаточные напряжения сжатия можно накапливать поверхностную энергию для увеличения износостойкости деталей машин и механизмов.

### Литература

1. Браун Э.Д., Буяновский И.А., Воронин Н.А. и др. Современная трибология: Итоги и перспективы. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. Смит Мортон К. Основы физики металлов. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1959. – 456 с.
3. Gary Stygera, Rudolph F Laubscher, Gert A Oosthuizen Effect of constitutive modeling during finite element analysis of machining-induced residual stresses in Ti6Al4V Procedia CIRP, Volume 13, 2014, Pages 294-301.

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

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

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

Е.Н. Малышев, И.Е. Колков

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВСПЕНЕННОГО ПОЛИСТИРОЛА**

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

Вспененный полистирол получают путем вспенивания и спекания гранул полистирола. Гранулы накачивают пентаном (это конденсат природного газа) с одновременным подогреванием паром. Вследствие этого гранула увеличивается почти в 50 раз, превращаясь в шарик, наполненный воздухом. Этот шарик очень упругий и устойчивый, и обратного процесса, то есть «сдувания», не происходит. Полученные таким образом гранулы вспененного полистирола спекают с помощью пара. Получается однородный материал. Процессы вспенивания и спекания проходят одновременно.

В России производство полистирола происходит с использованием так называемого «метода суспензионной полимеризации стирола в присутствии парообразователя», тогда как мировая промышленность применяет метод непрерывной полимеризации в массе. Этот способ позволяет получать материал высокого качества с меньшими затратами. Вспененный полистирол практически на 100% состоит из воздуха. Он не содержит каких-то дополнительных химических веществ. Этот материал очень долговечен, он не разрушается под воздействием окружающей среды. Поэтому его активно применяют в строительстве. Так как полистирол имеет хорошую теплопроводность, он практически не пропускает влагу, неопасен для здоровья человека и окружающей среды.

Экструдированный пенополистирол (или экструзионный) — это материал нового поколения. Представляет собой листы или изделия определённой формы с равномерной структурой, которые состоят из мелких (до 0,2 мм) ячеек. Используется в особенности для теплоизоляции конструкций, которые постоянно испытывают нагрузки на сжатие, т.к. не изменяет своих геометрических размеров под действием больших нагрузок. Применяется в дорожном строительстве, теплоизоляции инверсионных кровель, балконов, лоджий, подземной части зданий и полов по грунту, а также в холодильных установках и теплицах. Также используется для изготовления изделий специальных форм, в частности для производства погонных профилей типа художественного и интерьерного багета.

Экструдированный пенополистирол (ЭПП) обладает рядом важных отличительных свойств, что объясняется особенностями технологии его производства. Она в корне отличается от методики изготовления обычного вспененного пенополистирола. Гранулы полистирола перемешиваются со вспенивающим веществом (диоксид углерода и смесь легких фреонов) при очень высоких температуре и давлении. Затем полученная масса вы-

давливается под напором из экструдера. После остывания этой спрессованной пеносмеси образуется плита с замкнуто-ячеистой структурой, либо профиль определённой формы, заданной формой фильера, названные по способу получения «экструдированными».

Возможности, которыми наделен экструдированный пенополистирол, совершили революцию в существовавших представлениях о теплоизоляции и способе получения изделий специальной формы. Они поистине безграничны:

- очень низкая теплопроводность — это основное свойство, за которое так ценится утеплитель ЭПП. Это позволяет использовать его в различных утепляющих целях;
- минимальные показатели водопоглощения и паропроницаемости, что происходит благодаря его низкой капиллярности. Экспериментально доказано, что небольшое поглощение воды происходит лишь на поверхности материала из-за наличия некоторого количества разрушенных ячеек, и составляет всего 0,2% всего объема за месяц полного погружения в жидкость. Внутрь же влага не попадает. Именно поэтому экструдированный пенополистирол применяется для теплоизоляции кровель, полов и фундаментов, не имеющих дополнительной гидроизоляции;
- высокая прочность при механическом сжатии. Причем чем толще лист, тем этот показатель выше. Предел прочности листа при статическом сгибе составляет примерно 0,5-0,7 МПа;
- широкий температурный диапазон использования материала. При температуре от  $-50^{\circ}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$  не изменяет своих технических и физических свойств;
- очень низкая горючесть. Антипеновые добавки, определяющие это свойство, позволяют использовать экструдированный пенополистирол в утеплении инверсионных кровель, фасадов и зон риска;
- устойчивость к проникновению плесени и грибковых образований;
- химическая стойкость (кроме органических растворителей, бензина и безводных кислот).

ЭПП находит широкое применение в строительстве и быту. Благодаря легкости, прочности и отличной теплоизоляции стало возможным изготовление из него контейнеров для хранения и транспортировки продуктов и других веществ, одноразовой посуды, а также ставших привычными визиток и даже игрушек. Широкое применение экструдированный пенополистирол нашёл в изготовлении багета при производстве рам для оформления художественных произведений. Тем не менее, основным назначением его по-прежнему является строительная теплоизоляция для условий повышенной влажности и механической нагрузки. В таком применении ему нет равных.



Анализ влияния различных факторов окружающей среды таких как, частые перепады температур, влажность, налет морской соли, загрязнение окружающей среды и т.д., рабочие нагрузки, которым подвержены конструкции из вспененного полистирола, показал удивительные и исключительные результаты, обусловленные особыми характеристиками материала. Было продемонстрировано, что пенополистирол может гарантировать на неограниченный период отличные эксплуатационные характеристики. Это доказано годами практического применения вспененного полистирола в мировом масштабе, в особенности благодаря многочисленным проверкам эксплуатационных характеристик зданий, которые эксплуатируются в мире более 50 лет, проведенным на мировом уровне в любых климатических условиях (холод или жара превышающие средне-сезонные).

Материал производится, используется и утилизируется без ущерба для окружающей среды и здоровья людей. ЭПП это наиболее чистый и безопасный материал. Это подтверждается фактом, что он используется и в качестве упаковочного материала для продуктов питания, в игрушках и т.п. Изделия из вспененного полистирола нетоксичны, не выделяют неприятных запахов, не содержат хлорфторуглеродов, гидрофторуглеродов, гидрохлорфторуглеродов, которые наносят вред озоновому слою земли. Упаковка или отходы ЭПП не загрязняют ни почву, ни воду, ни атмосферу. Вспененный полистирол на 100% может быть использован повторно. Он может быть смешан со вспененными гранулами для производства нового материала.

Спрос на экструдированный полистирол в России каждый год увеличивается приблизительно на тридцать процентов. Несложная технология производства полистирола делает возможным его изготовление на небольших производственных линиях.

Долгое время для производства художественного багета применялось в основном дерево, но стоимость этого материала с каждым годом растёт, а трудоёмкость такого метода изготовления достаточно велика. С появлением вспененного полистирола появилась возможность производить багет доступный для всех уровней потребителей из-за более приемлемой цены (дешевле более чем в два раза). Благодаря новому полимерному материалу стало возможным увеличить ассортимент багета и рам из него в десятки раз.

В России производства художественного багета из вспененного полистирола на настоящее время не существует. Наиболее известными в России зарубежными фирмами, занимающимися производством багета из вспененного полистирола и экспортирующими его в Россию, являются: «Эмафил» (Англия), «Минерва» (Англия), «Мига» (Ю. Корея), «Золотой дракон» (Китай), «Фотопластик» (Индия).

Для резки багета и последующей его сборки в конечное изделие – раму применяется специализированное оборудование: угловые станки, гиль-

отины различных типов, скрепляющие станки и т.п. Станки для резки и скрепления багета в раму в России не производятся. Это оборудование экспортируется из других стран, в частности из Франции (фирма «Cassese»), Италии («Alfamacchine») – станки для сборки рам. Наиболее известным оборудованием для резки багета являются «OMGA» (Италия), «Morso» (Дания), «Hansen» Нидерланды, «Logan» (США). Таким образом, работа в направлении развития этой области в России является достаточно перспективной.

### Литература

1. Зубарев, Г.Н. Конструкции из дерева и пластмасс / Г.Н. Зубарев, Ф.А. Бойтемиров, В.М. Головина, В.И. Ковликов, Э.М. Улицкая. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 304 с.
2. Павлов, В.А. Пенополистирол / В.А. Павлов. – М.: Химия, 1973. – 240с.
3. Александров, А.Я. Конструкции с заполнителями из пенопластов / А.Я.Александров, М.Я.Бородин, В.В. Павлов. - М.: Машиностроение, 1972. – 212с.

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

**Колков Игорь Евгеньевич** – заведующий лабораториями кафедры "Технологии машиностроения" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru.

В.В. Калмыков, А.А. Мазенков

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОПЕРАЦИЯМИ

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

Важнейшим аспектом повышения конкурентоспособности современного производства является изготовление деталей не только высокой точности, но и обладающих надежностью, долговечностью, безотказностью и другими эксплуатационными характеристиками. В большинстве случаев, эти характеристики зависят от качества поверхностного слоя детали.

Увеличить жизненный цикл деталей можно, предъявляя повышенные требования к проектированию технологических процессов их изготовления. Традиционно, для повышения износостойкости поверхностей применяется термообработка и пластическое деформирование. Известно, что прочность металлов определяется количеством дефектов и величиной кристаллов (рис.1)[1].

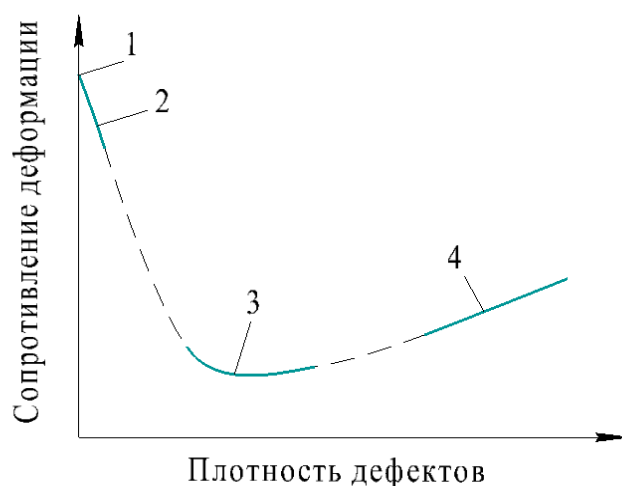


Рис.1. Зависимость прочности металлов от плотности дефектов:

- 1 – идеальные кристаллы без дефектов;
- 2 – бездефектные кристаллы «усы»; 3 – металлы после отжига;
- 4 – металлы с увеличенной плотностью дефектов после обработки;

Из рисунка видно, что прочность металлов можно повысить либо сокращением плотности дефектов, либо их увеличением. Создание бездефектной структуры является весьма сложной задачей, поэтому на практике для увеличения прочности стремятся повысить плотность дефектов.

Как известно, во время механической обработки поверхность заготовки подвергается пластической деформации, которая приводит к упрочнению. Происходит изменение микроструктуры, разрушение кристаллических зерен и изменение их формы. Тепло, которое выделяется в зоне реза-

ния, моментально нагревает поверхностный слой заготовки, а быстрое его охлаждение приводит к микрозакалке [2].

Как пластическая деформация поверхностного слоя, так и тепловые процессы являются причиной возникновения остаточных напряжений. Эти напряжения могут быть растягивающими или сжимающими, так как основная масса металла не подвергается ни пластической деформации, ни нагреву. Растягивающие напряжения существенно снижают прочность детали, а также способствуют возникновению микротрещин. Для устранения таких напряжений необходимо производить отжиг заготовок. Сжимающие напряжения повышают усталостную прочность металлов. Однако если направление нагрузки на деталь и напряжений совпадают, то это способствует интенсивному изнашиванию поверхности [3].

Известно, что термическая обработка позволяет получить необходимый комплекс свойств детали. С помощью закалки можно значительно повысить прочность детали, и, как следствие, износостойкость. Отжиг способствует частичному снижению прочности, однако при этом увеличивается пластичность и происходит снятие внутренних напряжений. Например, для деталей, работающих при динамических нагрузках, используется поверхностная закалка. Такой способ термообработки позволяет упрочнить только поверхностный слой. В результате, поверхность имеет высокую прочность, а сердцевина детали остается пластичной.

Помимо термообработки, повысить эксплуатационные свойства деталей машин можно с помощью поверхностного пластического деформирования (ППД). При данном методе происходит пластическое деформирование только поверхностного слоя. Благодаря этому улучшаются показатели микрогеометрии, повышается твердость, возникают сжимающие остаточные напряжения, что позволяет повысить износостойкость в 1,6-2,6 раза, увеличить усталостную прочность, сопротивление схватыванию, стойкость к коррозии и др. Способы поверхностного пластического деформирования разделяют статические и ударные. Статические способы характеризуется постоянной по величине силой воздействия на поверхностный слой детали. К ним относятся: алмазное выглаживание, обкатка шариком, обкатка роликом, дорнование и т.п. Ударные способы отличает многократное изменение величины силы воздействия на поверхностный слой. К ударным способам относят обработку дробью, гидроабразивное упрочнение [2].

Метод поверхностного пластического деформирования основан на способности металлов принимать остаточные деформации без нарушения цельности основного материала, то есть на их пластических свойствах. Важно, что после обработки способами ППД образуются только сжимающие напряжения, которые компенсируют растягивающие напряжения, возникающие в процессе эксплуатации.

Наиболее распространенным способом ППД является обкатка роликами и шариками. Операцию выполняют на универсальном оборудовании с использованием специальных приспособлений. Ролики или шарики давят на поверхность заготовки с помощью пружины или гидравлического ци-

линдра. Этим способом обрабатывают детали типа тел вращения, а иногда и детали, имеющие плоские поверхности.

Детали машин из сталей твердостью до HRC63...63 упрочняют с помощью алмазного выглаживания. Инструмент для алмазного выглаживания представляет собой цилиндрическую державку, оснащенную сферическим, конусообразным или трапециевидным наконечником. Рабочую часть инструмента выполняют из синтетических материалов, природных алмазов и других сверхтвердых материалов. Довольно часто алмазное выглаживание выполняют вместо шлифования, полирования, доводки поверхности. [2].

Сущность всех этих способов заключается в сообщении поверхностному слою напряжений, которые вызывают пластическое деформирование. Как известно, механизмом пластической деформации является движение дислокаций. Они легко перемещаются внутри кристаллитов, когда не встречаются препятствий – поверхностей кристаллитов. Пластическое деформирование всегда сопровождается дроблением кристаллитов и увеличением их суммарной площади поверхностей. С увеличением деформации количество дислокаций увеличивается, их движение затрудняется и сопротивление деформации возрастает. Это требует больших напряжений для дальнейшей пластической деформации. Кроме дробления зерен происходит также изменение их формы. Они вытягиваются, образуется так называемая волокнистая структура. Такая структура способствует повышению сопротивления нагрузкам [4].

Таким образом, правильное применение рассмотренных способов позволит повысить надежность детали, долговечность её работы, а также увеличить точность.

#### Список литературы

1. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И. и др. *Материаловедение: учебник для ВУЗов*, 8-е издание, Арзамасов Б.Н., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 648 с
2. Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием*, Москва, Машиностроение, 1987, 328с.
3. Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием деталей машин с закономерным изменением качества поверхностных слоев. *Вестник брянского государственного технического университета*, 2011, №1, с. 22-31.
4. Шнейдер Ю. Г. *Технология финишной обработки давлением: Справочник*. Санкт-Петербург, Политехника, 1998, 414 с.

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

**Мазенков Андрей Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mazenkov123@yandex.ru.

УДК 621.9.06

В.Ю. Потемкин, И.Д. Соколова

## **РАСЧЕТ ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В SOLIDWORKS**

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

Современный этап проектирования инструментов, оборудования, конструкций, производимой продукции характеризуется широким использованием разных программных пакетов автоматизированного конструирования (Computer-aided engineering-CAE). С помощью применения этих пакетов становится возможным проведение инженерного анализа компьютерных моделей, не прибегая к реальным экспериментам. Этот анализ представляет собой комплекс испытаний, предназначенных для определения способности оборудования, конструкций, а также производимой продукции выдерживать проектные нагрузки и бесперебойно функционировать при расчетных условиях эксплуатации.

Целью данной работы является рассмотрение возможностей применения метода конечных элементов, и моделирование напряженно-деформированного состояния резца в процессе точения с помощью специализированного модуля SolidWorks®. Программа SolidWorks® – это система автоматизированного проектирования (САПР), использующая привычный графический интерфейс пользователя Microsoft Windows®.

Для проектируемых трёхмерных деталей и сборок можно создавать двухмерные чертежи. Детали, сборки и чертежи являются связанными документами: при внесении любых изменений в детали или сборки документ чертежа изменяется. В состав данного продукта входит множество модулей, которые способны решать прикладные задачи.

Модуль *DriveWorksXpress* используется для автоматизации процесса проектирования, которая позволяет внедрить правила проектирования и повторно использовать проектную информацию в целях сохранения времени и средств. Модуль *COSMOSMotion* даёт возможность определить движение механизмов, моделировать его и анимировать результаты без выхода из среды SolidWorks, а также рассчитывать нагрузки, которые могут быть использованы для определения эпюр нагрузок в структурном анализе. Модуль *COSMOSXPress* позволяет провести статический анализ конструкции. Результаты расчета представляются в виде изображения на конструкции эквивалентных напряжений, запаса прочности и деформированного вида [1].

Более подробно рассмотрим возможности модуля *COSMOSXPress*, который использует методы конечно-элементного анализа.

В настоящее время область применения метода конечных элементов очень обширна и охватывает все физические задачи, которые могут быть

описаны дифференциальными уравнениями. Основная идея этого метода состоит в том, что любую непрерывную величину, такую, как температура, давление и перемещение, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей.

Наиболее часто встречающимися трехмерными элементами являются тетраэдр и параллелепипед, на которые разбивается наша трехмерная модель. Данные элементы образуют множество подобластей, по которым мы строим нашу дискретную модель, отражающую изменение исходной непрерывной величины (давления, температуры, деформации) [2].

Проведем эксперимент в модуле *COSMOSXPress*. В процессе несвободного течения на переднюю и заднюю поверхности действуют нормальные силы. В программе задается материал режущей части, добавляются закрепления и действующие нагрузки (рис. 1).

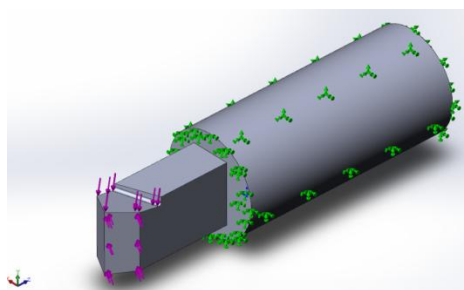


Рис. 1. Закрепление резца и добавление сил на переднюю и заднюю поверхности

Модуль генерирует конечно-элементную сетку (рис.2) и выдает результаты в виде шкал внутренних напряжений и деформаций.

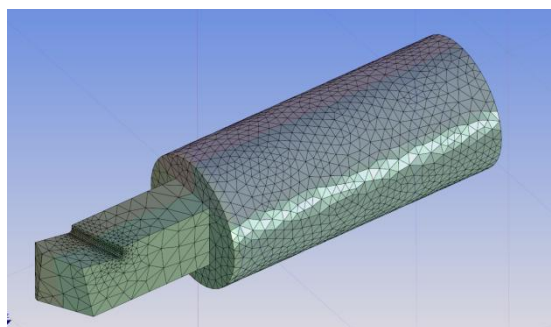


Рис.2. Конечно-элементная сетка

По этим шкалам мы можем судить о зонах с наибольшими напряжениями и деформациями (рис.3). Тогда мы можем прогнозировать наиболее опасные и нагруженные участки. Подобную картину мы получаем также для внутренних напряжений.

**Вывод.** Наиболее важными преимуществами метода конечных элементов, благодаря которым он широко используется, являются:

1. Свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет применить метод к телам, составленным из нескольких материалов.

2. Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов. Таким образом, методом можно пользоваться не только для областей с «хорошей» формой границы.

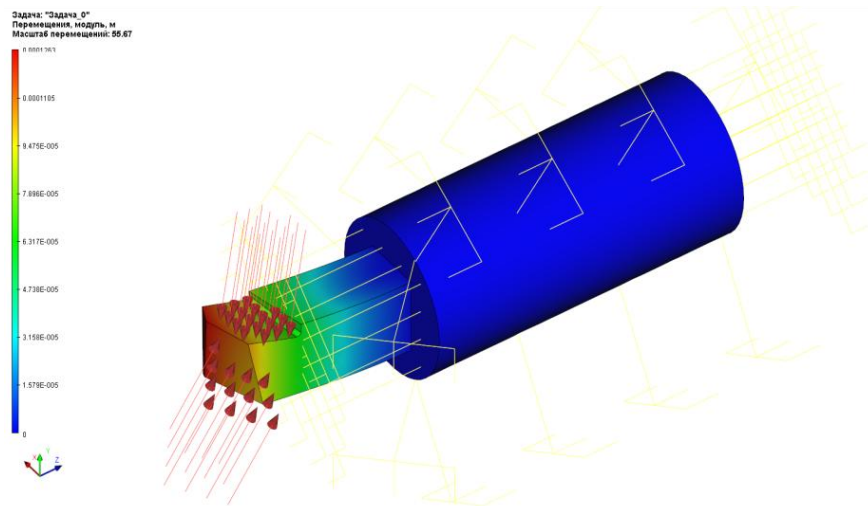


Рис.3. Анализ деформаций, перемещений

3. Размеры элементов могут быть переменными. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость.

4. С помощью метода конечных элементов не представляет труда рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий [3].

### Список литературы

1. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. – М.: Норма: НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 432с.

2. Лукина С.В., Крутякова М.В., Рыбакова М.Р. Моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния осевых режущих инструментов численным методом конечных элементов в CAD/CAM/CAE/PDM-системе SOLIDWORKS // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–11. – С. 2431-2435.

3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 389 с.

**Потемкин Виктор Юрьевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: vitya.potemkin.92@mail.ru.

**Соколова Ирина Дмитриевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru.



О.С. Федорова, В.В. Калмыков

## **РОЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Качество изделий в машино- и приборостроении является важнейшим фактором конкурентоспособности производства. Традиционно качество каждой детали устанавливается после ее изготовления, либо после каждой технологической операции. В этом случае, затраты на изготовление отбракованных службами технического контроля деталей включаются в себестоимость производства изделия в целом. Таким образом из-за дополнительных затрат стоимость готовой продукции может превысить стоимость аналогов конкурентов. Что может повлечь существенную потерю рынков.

Известно, что около 80% брака возникает по причине ошибок при проектировании технологического процесса. Следовательно, в современном производстве необходимо разрабатывать такие технологические процессы, которые априори будут определять изготовление годных деталей. Однако, и в большинстве случаев это является весьма нетривиальной задачей, особенно, если технология разрабатывается на новое изделие. Тогда возникает необходимость в совокупном решении экстремальных задач и задач описания [1].

Целью экстремальных задач является поиск оптимальных режимов обработки. Задачи описания заключаются в поиске закономерностей в процессе изготовления. Решение данных задач в совокупности может быть значительно упрощено, если для конкретного процесса удастся построить некую математическую модель.

Модели могут быть построены на основе знаний механизмов явлений, происходящих в процессе обработки. Такие модели могут быть использованы как для решения конкретной задачи, так и для многих подобных. В современном машиностроении постоянно внедряются новые материалы, инструменты, оборудование и т.п., при которых механизмы явлений и процессов на первых этапах исследованы недостаточно. Поэтому построить модели для конкретного случая основываясь только на теоретических соображениях невозможно. В подобных случаях эксперимент становится самым реалистичным путем получения математических моделей.

Сегодня, эксперимент стал одним из главных методов научного познания. В современном машиностроении обязательно проводятся эксперименты. Они помогают понять суть технологических процессов и дают их численное представление. Исследуя какой-то технологический процесс обязательно проводят измерения с последующей обработкой. Погрешности, возникающие при измерениях чаще всего, относятся к случайным ве-

личинам, поэтому приходится проводить расчеты на основе теории вероятностей.

Большой вклад в развитие техники эксперимента внесли Новицкий П.В., Зограф И.А., Новик, Арсов, Л. Закс, Ю.П. Адлер и многие другие.

Возникающие в результате испытаний погрешности, классифицируются следующим образом [2]:

- инструментальные – вызваны погрешностью инструмента;
- методические – появляются в зависимости от метода измерения;
- статистические – не зависят от скорости изменения измеряемой величины во времени;
- динамические – зависят от скорости изменения измеряемой величины во времени (при скорости близкой к нулю исчезают);
- систематические – не изменяются с течением времени;
- прогрессирующие – непредсказуемые погрешности, медленно изменяющиеся во времени;
- случайные – возникают в результате действия большого количества факторов или причин.

Измеряемые во время эксперимента величины не остаются постоянными, а имеют функциональную зависимость при изменении других величин  $y = f(x)$ , где

$x$  – независимая переменная (фактор),

$y$  – отклик, зависимая переменная.

Записать уравнение функции – значит найти её математическую модель, т.е. выполнить главную задачу эксперимента. К математической модели предъявляется ряд требований:

- удобность – достигается компактностью, нужно подобрать элементарные функции так, чтобы выражение не было слишком длинным и одновременно обеспечивало точность.
- содержательность – необходимо придать определённый смысл константам.

Отклик (зависимая переменная) должна удовлетворять ряду требований:

- его величина должна быть однозначной в статистическом смысле и единственной при определённом значении уровней факторов;
- его величина должна характеризоваться числом, однако допускается так же ранговая оценка;
- его величина должна иметь ясный физический смысл и отличаться статистической эффективностью, что означает определение величины отклика с наибольшей точностью (с минимальной дисперсией).

Так же ряд требований предъявляется к независимым переменным (факторам):

- факторы должны по предположению влиять на отклик;

- факторы должны быть либо независимы, либо слабозависимы друг от друга;

- факторы должны оцениваться как количественно, так и качественно;

- совокупность факторов должна быть совместима.

С помощью экспериментов, проводимых при неполных знания механизмов явлений и процессов, можно строить и анализировать математические модели, связывающие эти явления с качественными характеристиками технологических процессов.

### Список литературы

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

2. Новицкий П.В., Зограф И.А. *Оценка погрешностей результатов измерений*. 2-е изд. Ленинград, Энергоатомиздат, 1992, 304 с.

3. Закс Л. *Статистическое оценивание*. Москва, Статистика, 1976.

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

**Калмыков Вадим Владимирович**—ст. преп КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru.

Ю.Н. Скорская, Ю.В. Иванов

## ФРЕЗЕРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФРЕЗОЙ

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

В машиностроении важную роль играет определение и применение наиболее производительных методов обработки. Это позволяет значительно снизить затраты на изготовление продукции, а значит ее себестоимость, и в конечном счете цену. Отечественными учеными и инженерами разработано множество высокопроизводительных способов и методов обработки, однако их внедрение в производство происходит чрезвычайно медленно, либо вовсе не происходит.

Был проведен анализ методов и внесены некоторые предложения по применению фрезерования специальной фрезой торцевых поверхностей дисков [1]. В качестве обрабатываемых рассматривались поверхности деталей типа ступиц зубчатых колес при их фрезеровании с круговой подачей на всю глубину припуска.

Для обработки поверхностей заготовок типа дисков находят применение различные способы обработки [2]. Способ, рассматриваемый авторами, отличается от существующих тем, что позволяет обрабатывать одной фрезой различные поверхности. Схема обработки показана на рис.1.

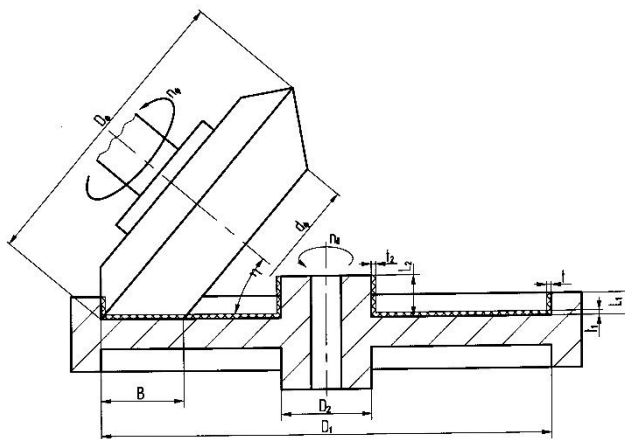


Рис.1 Схема обработки различных поверхностей одной фрезой.

Для анализа изменения параметров срезаемого слоя и сил резания в зависимости от диаметра фрезы и от угла поворота фрезы на основе выведенных зависимостей были разработаны программы их расчета.

На рис.2 представлены графики изменения средней и максимальной толщин срезаемого слоя в зависимости от изменения диаметра фрезы при обработке внутренней цилиндрической поверхности.

Как видно из графиков (рис. 2) при обработке цилиндрических поверхностей участки резкого изменения  $a_{cp}$  и  $a_{max}$  обуславливались тем, что врезание точек режущей кромки зуба происходило уже не в цилинд-

рическую поверхность, а в торец. На данном участке обработки происходило резкое уменьшение угла контакта и толщины срезаемого припуска, что сказывалось на величинах.

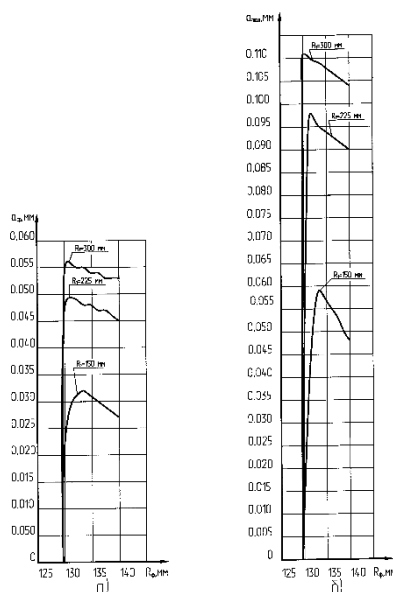


Рис.2 Графики изменения толщины срезаемого слоя

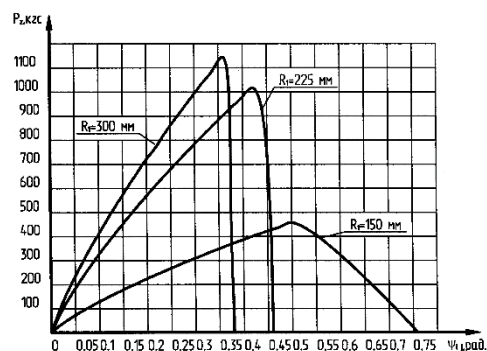


Рис.3 Графики изменения силы резания.

Для определения окружной силы резания использовались ранее полученные зависимости при обработке заготовок из титановых сплавов [3].

Изменение окружной составляющей силы резания показано на рис.3.

Сравнительный кинематический анализ [4] точения и фрезерования рассматриваемых поверхностей показал, что производительность фрезерования по сравнению с точением может быть выше от 1.34 до 1.85 раза по сравнению с точением, в зависимости от габаритов заготовки. Данный метод можно рекомендовать для обработки крупногабаритных заготовок.

### Список литературы

1. *Созинов А.И., Строщков А.Н.* Повышение эффективности черновой обработки заготовок из титановых сплавов. - М.: Металлургия, 1990. - 210с.
2. *Ермаков Ю. М.* Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. - М.: Машиностроение, 2003. - 272 с.
3. *Иванов Ю. В.* Исследование и разработка процесса фрезерования поверхностей вращения заготовок из титановых сплавов: Дис. канд. тех. наук. - Москва, 1993 г. - 280 с.
4. *Этин А. О.* Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. - М.: Машиностроение, 1964 г. - 324 с.

**Скорская Юлия Николаевна** – ст. преп. КФ МГТУ им Н.Э. Баумана  
E-mail: sun978@yandex.ru.

**Иванов Юрий Васильевич** — доцент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivanoff@yandex.ru.

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ TiN**

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

В настоящее время наиболее актуален вопрос о применении инструмента с повышенной степенью износостойкости, т.к. возникает роль вовлечения в современное производство инструментальных систем и комплексов с непрерывным циклом механической обработки. Для этого целесообразно применять быстрорежущие марки материалов, а в качестве упрочнения поверхности – тонкие износостойкие покрытия. Необходимо наносить их на ту поверхность, которая нуждается, в первую очередь, в защите от нежелательных факторов механической обработки [1].

В свою очередь инструменты, подлежащие износостойким покрытиям можно разделить условно на три группы:

1. Инструмент, который эксплуатируется при постоянных условиях резания в течении всего срока службы.
2. Инструмент, который эксплуатируется при различных условиях резания, но постоянных в течении одного периода стойкости.
3. Инструмент, который эксплуатируется в переменных условиях резания в течении одного периода стойкости.

По приведенным случаям можно сделать вывод, что для первой группы инструмента лучше всего применять марку материала типа P18 и ей подобные. Для второй и третьей группы, необходимо принять материал типа P6M5, а износостойкость инструмента можно повысить за счет применения износостойких покрытий [2].

При опытном исследовании инструмента имеющего износостойкое покрытие в виде TiN, нанесенного тонким износостойким покрытием на все элементы режущей части инструмента, зарекомендовало себя с лучшими техническими показателями. Кроме того, тонкие износостойкие покрытия существенно влияют на процесс наростообразования, т.к. в конечном результате это накладывается на температурно-силовую нагрузку всей режущей части инструмента.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что обработка в виде карбонитрации поверхности инструмента значительно повышает пластическую прочность инструмента, которая существенно влияет на стойкость инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс] Способ повышения износостойкости металлорежущего инструмента <http://www.findpatent.ru/patent/224/2244023.html> (дата обращения 17.09.2015 г.)

2. [Электронный ресурс] Повышение - износостойкость - режущий инструмент <http://www.ngpedia.ru/id268825p1.html> (дата обращения 17.09.2015 г.)

**Свитка Анастасия Сергеевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [svitka1993@yandex.ru](mailto:svitka1993@yandex.ru).

**Устинов Игорь Кириллович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [volkovkfmgtu@yandex.ru](mailto:volkovkfmgtu@yandex.ru).

**Базалиева Юлия Викторовна** – инженер КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [m4kf-kafedra@rambler.ru](mailto:m4kf-kafedra@rambler.ru).

З.В. Тягунова

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЧЕРВЯЧНЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

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

Одной из задач инструментальной промышленности является улучшение качества и конкурентоспособности инструментов при одновременном сокращении расхода быстрорежущей стали и экономии других вольфрамосодержащих материалов за счет замены цельных конструкций инструментов составными и сборными. Сборные и составные режущие инструменты получают, в основном, с помощью механических способов крепления, пайки, сварки и склеиванием. Применение клеевых соединений является одним из перспективных направлений в инструментальном производстве. Клеевые соединения обеспечивают повышенные эксплуатационные свойства инструмента благодаря сохранению исходных физико-механических свойств материалов, склеиваемых при низких температурах[1]. Условия эксплуатации и конструкции клеевых инструментов весьма разнообразны, так как в последние годы разработаны конструкционные клеи с повышенными физико-механическими и улучшенными технологическими свойствами.

Из зуборезного инструмента червячные фрезы – наиболее сложный и трудоемкий в изготовлении инструмент. Преимущества клеевых конструкций зуборезного инструмента заключаются в упрощении технологии производства отдельных элементов в связи с отсутствием необходимости в высокоточной обработке сопряженных поверхностей, например, в шлифовании, возможности соединения предварительно термообработанных (закаленных) деталей – зубчатых реек и корпуса, сокращения расхода быстрорежущей стали или твердого сплава по сравнению с инструментами цельной конструкции.

Червячные фрезы клеевой конструкции, оснащенные твердосплавными и быстрорежущими рейками, надежно работают до полного изнашивания при обеспечении требуемой точности обработки. Диапазон модулей фрез клеевой конструкции 0,3-18 мм, диаметры 25-300 мм. В корпусе фрезы из стали 40Х или 45 (HRCэ 40-42) профрезеровывают пазы под режущие пластины, устанавливаемые в пазы с зазором 0,1-0,15 мм. Перед склеиванием контактирующие поверхности подвергают дробеструйной обработке и обезжириванию. Для склеивания используют клеи ТКЛ-75 или ТКМ-75[2]. Режущие пластины из твердого сплава рекомендуется спекать, придавая им специальную форму с криволинейной, очерченной по радиусу поверхностью, которая при установке пластины в паз корпуса совпадает с затылком рейки, образуя необходимый спад.



Большой экономический эффект может быть достигнут при производстве клееных червячных фрез средних и крупных модулей в диапазоне 1-20 мм. В этом случае предварительно закаленные зубчатые рейки закрепляются в пазах корпуса с помощью клея и после склеивания проходят только финишную обработку. При изготовлении фрез данным способом не требуется высокой точности изготовления посадочных мест корпуса и реек, обеспечивается возможность комплектного изготовления зубчатых реек в специальных технологических корпусах и приспособлениях, исчезает необходимость в изготовлении деталей крепления реек в корпусе – винтов, крышек, колес[3].

Применение червячных твердосплавных фрез для фрезерования зубчатых колес позволяет сократить потребность в дорогостоящем оборудовании, уменьшить цикл изготовления колес и высвободить специалистов, занятых при их изготовлении.

Закаленные зубчатые колеса ( $HRC_{\Sigma} \geq 58$ ) обладают преимуществами по сравнению с термически не обработанными. Однако термообработка зубчатых колес затруднена, так как при этом возникают значительные тепловые деформации зубьев колеса. Для устранения погрешностей в форме и размерах зубьев приходится давать значительный технологический припуск на обработку и после проведения термообработки проводить окончательную обработку зубьев, снимая припуск 0,5-0,7 мм на сторону зуба. Такую обработку проводят, как правило, на зубошлифовальных станках. Черновое шлифование может длиться несколько суток, в связи с чем необходимо использовать большой парк зубошлифовальных станков и привлекать к работе рабочих-шлифовальщиков высокой квалификации.

Черновое зубошлифование колес можно заменить фрезерованием твердосплавной червячной фрезой с большим отрицательным передним углом. Такие фрезы изготавливают с помощью склеивания твердосплавных пластин и корпуса из обычной углеродистой стали. Для склеивания применяют эпоксидный клей УП-5-207. Опорные торцы пластин шлифуют. На ширину паза в корпусе фрезы устанавливают допуск +0,05 мм, на высоту пластины от -0,03 до -0,05 мм (в зависимости от модуля фрезы). Такая система допусков позволяет получить весьма малый зазор между пластиной и корпусом и обеспечить высокую прочность клеевого соединения, поскольку при больших зазорах клеевой шов становится пористым и имеет пониженную прочность. Поверхности, подлежащие склеиванию, подвергают дробеструйной обработке. Для фиксации пластин в пазах корпуса при склеивании используют специальное приспособление, состоящее из двух прижимных пластин (щек), вала со шпонкой и реек с винтами. Шаг отверстий под винты у реек равен шагу фрезы. Корпус фрезы надевают на вал, зажимают с обеих сторон щеками, на пазы корпуса и опорный торец и нижнюю часть пластины наносят клей, после чего пластины поджимают

винтами и проводят технологический процесс отверждения (в течение 140 мин при 140°C).

Твердосплавные червячные фрезы клееной конструкции используют для обработки зубчатых колес, поверхности зубьев которых (цементированные и закаленные) имеют твердость  $HRC \geq 58$ . Материал колес: стали 12Х2Н4МА, 18Х2Н4МА, 18ХНВА. Припуск на зубофрезерование составляет до 0,4 мм на сторону;  $v=25-30$  м/мин;  $s=1$  мм/об;  $t = 0,1-0,15$  мм на сторону. Припуск на окончательное шлифование 0,1-0,15 мм на сторону. При обработке пластинки разогреваются до температуры не выше 60°C. Стойкость фрезы до переточки – одна деталь (от 8 до 16 ч), износ фрезы составляет 0,1 мм (по средним зубьям). Стружка ломаная, мелкая[4].

Применение клея позволяет значительно упростить технологию производства твердосплавных червячных фрез, сократить трудоемкость их изготовления, что позволит получить определенный экономический эффект.

### Список литературы

1. Применение клеевых соединений в конструкциях режущего инструмента. – Вестник машиностроения. 1980, №6,7
2. А. П. Петрова, Ю.В. Коротков. Основные технологические и организационные рекомендации по применению клеев для склеивания инструментов. – М.:ВИМИ, 1975. 76с.
3. А. П. Петрова, Э.К.Кондрашов, Ю.В. Коротков. Склеивание инструмента и оснастки в машиностроении. - М.:Машиностроение, 1985. 184с.
4. Инструмент с вклеенными твердосплавными зубьями для обработки зубчатых колес - Вестник машиностроения. 1981, №1

**Тягунова З.В.** –ст. преп КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kalugakf@yandex.ru.

Ю.Н. Скорская, И.С.Святкин

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЯ**

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

Анализ принципов построения и функционирования гибких производственных систем показал, что эффективность проектирования гибких производственных систем напрямую связана с эффективностью проектирования составляющих подсистем, а рациональная организация подсистем является одним из решающих условий. Одной из важнейших подсистем является подсистема инструментального обеспечения, выполняющая функции по хранению и транспортировке инструмента, комплектованию инструментальных наладок, диагностике состояния инструмента. Данные об опыте эксплуатации гибких производственных систем зарубежными фирмами говорят о том, что за счет рациональной организации инструментального обеспечения эффективность всей системы повышается на 70 % [1].

Проектирование подсистемы инструментального обеспечения требует создания такой ее структуры, которая наилучшим образом реагировала бы на колебания номенклатуры выпускаемой продукции. Под структурой гибкой производственной системы понимается устойчивая взаимосвязь между элементами гибкой системы, которая определяет характер взаимодействия материальных потоков заготовок и готовых деталей с инструментом.

Характерны следующие варианты существующих структур подсистем инструментального обеспечения: с использованием многошпиндельных головок; с использованием индивидуального инструмента без инструментального обмена между станками во время обработки; с использованием для обработки индивидуального инструмента и с инструментальным обменом между станками также индивидуального инструмента; с использованием для обработки индивидуального инструмента и с инструментальным обменом группы инструментов и др. [2].

Выбор той или иной структуры подсистемы инструментального обеспечения определяется номенклатурой выпускаемых деталей, масштабом их выпуска, а также колебаниями фактического состава комплекта заготовок при запуске их в обработку.

В качестве критерия применимости той или иной структуры подсистемы инструментального обеспечения используются суммарные затраты на незавершенное производство, комплект инструмента и заработную плату, дифференцированные на некотором временном интервале [3].

Поиск рационального варианта структуры подсистемы инструментального обеспечения основывается на сравнительном анализе вариантов и выборе того, который обеспечивает минимальное значение критерия.

Наибольшей трудностью в этом случае является определение на этапе проектирования времени обработки комплекта запуска заготовок в гибких

производственных системах. Величина времени в общем случае является величиной случайной и зависит от значительного числа факторов, действующих в автоматизированном производстве: колебаниями масштаба выпуска деталей, отказов оборудования, отказов инструментов и др.

Синтез вариантов структуры в основном осуществляется с использованием аналитических моделей, которые характеризуются: ограниченным составом входных воздействий, не учитывают стохастический характер составляющих времени [4].

Однако на сегодняшний день для решения задачи в такой постановке существует метод, который позволяет учитывать разнообразие и характер действующих факторов автоматизированного производства. Метод основан на применении имитационного моделирования [5], представляющего собой процесс динамического отображения изменений состояния системы в течение некоторого периода времени, причем поведение элементов моделируемой системы и их взаимодействие в имитационной модели описывается набором алгоритмов. Имитационная модель строится на принципах системного подхода, агрегативности, событийности, строгой последовательности. Имитационная модель позволяет синтезировать производственный процесс при различных вариантах структур подсистемы инструментального обеспечения и определять выходные характеристики производственного процесса: длительность производственного цикла, загрузку оборудования, баланс потерь времени, необходимое количество применяемого инструмента и т.д.

### Список литературы

1. Гречишников В. А. Инструментальное обеспечение автоматизированного производства: учебник для вузов / В. А. Гречишников, А. Р. Маслов, Ю. М. Соломенцев, А. Г. Схиртладзе. – М.: Высшая школа, 2001. – 271 с.
2. Вороненко В. П. Организация системы инструментального обеспечения автоматизированных производств / В. П. Вороненко, В. Луцук // Вестник МГТУ «Станкин». — 2009. — №3 (7). — 23—25.
3. Медведев В.А., Брюханов В.Н. Технологические основы ГПС: Учебник для машиностроительных вузов / под ред. Ю.М. Соломенцева – М.: Машиностроение, 1991. – 239 с.
4. Пуховский Е.С. Технологические основы ГАП: Учебное пособие – К.: Высшая школа, 1989. – 240 с.
5. Капитанов А. В. Разработка имитационного моделирования для определения инструментальных комплектов в автоматизированной станочной системе / А. В. Капитанов // Творчество и эбсология. Науч.- информ. сб. вып. №005. — М.: ИЛИ ТИП-С, 2008. — 100—105.

**Скорская Юлия Николаевна** – ст. преп. КФ МГТУ им Н.Э. Баумана  
E-mail: sun978@yandex.ru.

**Святкин Игорь Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: afterlife9252@gmail.com.

## **СЕКЦИЯ 2.**

### **ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Д.И. Егоров, К.Ю. Труханов, А.В. Царьков

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ И РОБОТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЕ**

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

В настоящее время в нашем регионе активно развивается автомобильная промышленность. Высокие требования к локализации производства приводят к необходимости проведения различных исследований в области сварки. Несмотря на увеличение использования в автомобилестроении новых конструкционных материалов, ведущую роль в производстве продолжает играть тонкий листовой стальной прокат. Автомобили выпускаются в условиях крупносерийного и массового производства. Основные узлы автомобиля; силовые и несущие элементы кузова, подвеска, выхлопные системы изготавливаются на автоматических сварочных линиях. Эти линии представляют собой сложный комплекс сварочных машин и средств механизации, работающих в едином цикле.

Автомобильная промышленность предъявляет к стальным материалам очень высокие требования, поскольку в первую очередь она должна удовлетворять двум диаметрально противоположным критериям. С одной стороны, требование по снижению массы изделий предполагает использование высокопрочных материалов, с другой – рост требований по технологичности производства предполагает использование высокопластичных материалов [1]. Доля стандартных мягких сталей в кузове автомобиля составляет 31%, из них изготовлены особо сложные в штамповке элементы, а также внешние детали, поглощающие энергию при ударе. Высокопрочных сталей – более 44%, почти весь силовой каркас, защищающий пассажиров. Особо высокопрочных сталей – почти 15%. Ультравысокопрочных сталей – 10 %, это стали нового поколения, которые используются в наиболее ответственных участках.

Перед инженерами стоят важные задачи повышения качества сварочных швов через снижение коробления деталей при сварке и сборке узлов рамы кузова, увеличения прочности швов и долговечности, что является достаточно сложной задачей, особенно если эти элементы обладают сложной геометрией ребра, упоры, откосы. При механизации и автоматизации сварочного производства появляется возможность повышения производительности труда и качества продукции, сокращение численности рабочего персонала. Автоматизация сварки означает перевод сварочного оборудования на автоматический режим работы, внедрение в производство ряда устройств, действующих без участия человека.

Лазерная, дуговая (TIG, MIG, MAG) или контактная сварка (RWS) с использованием робота обеспечивает более высокое качество изделий по

сравнению с принятым сварочным процессом ручной или полуавтоматической сварки [2]. Дуговая сварка применяется для изготовления сложных частей в автомобилестроение и для сварки деталей, работающих в агрессивных средах. Контактная сварка позволяет приварить тонколистовые детали автомобиля к основной части каркаса с минимальными деформациями. Лазерная сварка позволяет получить косметически ровный шов, не требующий шлифовки на поверхности кузова автомобиля

Пример роботизации в сварке служит процесс дуговой сварки, в котором используются сварочные аппараты с постоянной и управляемой подачей сварочной проволоки. В нем механизирована подача электродной проволоки, перемещение электрода вдоль линии свариваемого стыка, подача флюса (защитного газа). Автоматизирован процесс регулировки напряжения дуги изменением по заданному закону скорости подачи электронной проволоки при отклонении напряжения дуги от номинального значения.

Сварочный аппарат может быть оснащен системой автоматического отслеживания сварного шва. В основу работы различных систем слежения положены разные принципы обнаружения поверхностей свариваемых деталей – от простого механического контакта и отслеживания величины сварочного напряжения до сканирования поверхности разделки контактным методом или с помощью лазерного сенсора. Основная разница между следящими и сканирующими системами при сварке до появления лазерных систем была в том, что требовалось 2 прохода сварочной головки по изделию. При первом проходе определялось положение разделки по отношению к сварочному роботу или автомату, при втором – сварка. Сейчас появились сканеры, позволяющие осуществлять сканирование и слежение за сварочным стыком одновременно с учетом расстояния между точкой сканирования и точкой сварки. Основной разницей в работе сканирующих и просто следящих систем является то, что сканирующие системы позволяют получать информацию об отклонениях объема разделки, отклонении величины зазора в корне шва – эти данные обрабатываются и в дальнейшем могут использоваться и для направления сварочной головки по стыку и для коррекции режима сварки в ходе процесса. Система слежения за стыком обеспечивает следование головки с учетом отклонений в расположении стыка с определенной точностью [3].

Таким образом, рассмотрение вопросов сварки сталей повышенной прочности, исследование путей повышения прочности сварных конструкций и автоматизации процесса сварки являются актуальной задачей.

### **Список литературы**

[1] Сварка в машиностроении: справочник. В 4-х т. Т.1, Т.2 / Под ред. Н.А. Олышанского. - М.: Машиностроение, 1978.

[2] Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Технология изготовления. Автоматизация производства и проектирование сварных конструкций: учеб. пособие / Г.А.Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высш. шк.,1982.

[3] Теория сварочных процессов: учебник для вузов / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; под ред. В.В. Фролова. – М.: Выс. шк., 1988.

**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: konstantin.truhanov@yandex.ru.

**Царьков Андрей Васильевич**— д-р техн. наук,заведующий кафедрой "Технологии сварки"КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.



А.Ю. Сапожников, Г.В. Орлик, В.В. Дьячук

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ТИПА ТРУБА-ТРУБНАЯ ДОСКА**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На сегодняшний день важным вопросом энергетики является изготовление газовых и паровых турбин. В их производстве значительное место занимают теплообменные аппараты, предназначенных для передачи тепла от одного теплоносителя к другому.

Номенклатура теплообменных аппаратов, используемых в энергетическом машиностроении, достаточно широка. При их изготовлении применяют трубы диаметром от 6 до 38 мм, с толщиной стенки от 0,2 до 2,5 мм из различных групп сталей и сплавов. Качество заварки трубок в трубной доске определяет работоспособность энергетической установки в целом. Пример соединения трубок с трубной доской представлен на рисунке 1.



Рис.1. Общий вид соединения трубок с трубной доской.

В процессе эксплуатации соединения трубок с трубной доской, испытывают высокие знакопеременные напряжения из-за перепада температур и давления. Потеря герметичности одного из таких соединений ведет к снижению работоспособности турбины.

Для получения качественного соединения трубки с трубной доской необходимо выполнить ряд условий перед сваркой: очищение сварочных поверхностей от загрязнений и устранение зазоров в сварном стыке. Эти требования обеспечиваются вальцовкой трубок: с применением методики использования энергии взрыва и механической развальцовкой трубок. Сущность первого метода заключается в следующем: концы трубок располагаются под углом к оси отверстия, а внутри трубки устанавливается разрывной заряд определенной мощности, как показано на рисунке 2.

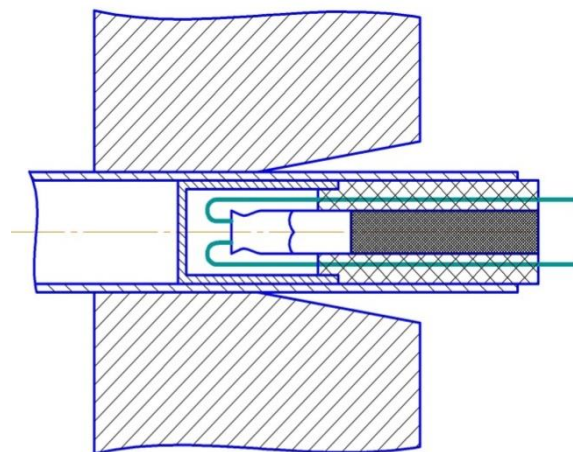


Рис.2. Метод вальцовки с использованием энергии взрыва.

При взрыве возникает сила радиального давления, в 10 раз превышающая предел текучести, вытесняющая воздух и все загрязнения из зоны сварки. Скорость перемещения точки соударения при этом не должна превышать скорости звука. [1] Данный метод обладает высокой производительностью и имеет потенциал для широкого применения в энергетическом машиностроении.

Механическая развальцовка трубок в трубной доске осуществляется при помощи специальных вальцовочных машинок. Наконечник машинки снабжен вальцами, которые при вращении создают достаточное радиальное давление для развальцовки трубок.

Для получения сварных соединений трубка - трубная доска применяют ряд методов. Одним из них является термодиффузионный метод. Отличительная особенность этого метода заключается в том, что сварочное давление создается за счет разности коэффициентов линейного расширения свариваемого металла и технологического стержня. При этом стержень должен обладать следующими свойствами: предел текучести стержня при сварке должен быть выше, чем у свариваемых материалов, как и коэффициент линейного расширения.

Качество сварного соединения и сохранение нужных прочностных свойств достигается выбором оптимальной температуры нагрева при сварке. Увеличение температуры нагрева при сварке приводит к увеличению роста зерна и деформации труб, изготовленных из аустенитной стали. Сварка производится в вакууме или в среде аргона. Преимуществом данного метода является получение сварного соединения без особого изменения структуры с заданным рабочим сечением трубки. Недостатком данного метода является возможность заклинивания технологических стержней в трубках вследствие колебания температур.

Для сварки трубок с трубной доской из высоколегированных сталей и сплавов применяют электронно-лучевую сварку. В процессе сварки весь теплообменный аппарат вакуумируют и выполняют сварной шов путем одностороннего или двойного отклонения электронного пучка при перемещении сварочной пушки. Преимущество данного способа сварки является получение более чистых и бездефектных сварных соединений. Для поддержания постоянной глубины проплавления используется электронная пушка на базе станка с ЧПУ (числовым программным управлением), обеспечивавшая точное совмещение электронного пучка со стыком и регулировку фокусного расстояния пучка в процессе сварки. К недостаткам данного метода можно отнести ограничение по толщине и диаметру ввариваемых трубок и дорогостоящее оборудование.

Еще одним методом получения соединения трубок с трубной доской является автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом. На рисунке 3 представлена сварочная головка TS-2000 фирмы «Polysoude», применяющаяся для сварки трубок диаметром от 10 до 60 мм с трубной доской.

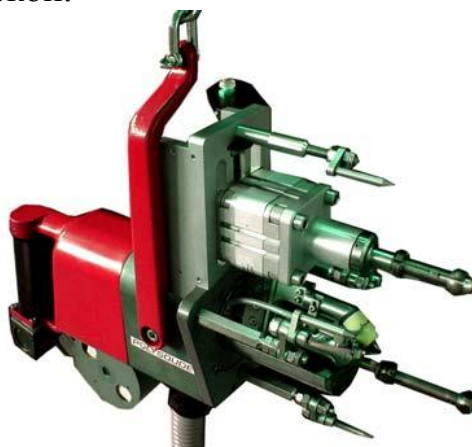


Рис.3. Сварочная головка фирмы «Polysoude» TS-2000.

Сварка трубок может осуществляться с выступом, утоплено и заподлицо с трубной доской. Фиксация положения головки относительно стыка производится при помощи центрирующей цанги (дорна). Привод постоянного тока в сочетании с замкнутым контуром управления дают высокую точность и стабильность скорости сварки. Сварочная головка подсоединена к инверторному источнику сварочного тока PS406, оснащенного системой AVC (автоматической системой регулирования напряжения дуги). Для повторяемости и результативности в аппарат встроена система запоминания и воспроизведения программ сварки, фиксирующая величины основных параметров сварки.

Инверторный источник питания имеет четыре режима работы: импульсного сварочного тока, термического импульса, металлургического импульса и термометаллургического импульса. При зажигании дуги, подающийся аргон обжимает ее со всех сторон, не давая блуждать, и процесс

сварки протекает стабильнее. Регулировка процессов проплавления и кристаллизации возможна за счет плавающей настройки режимов для импульсного тока. [2]

Предлагаемое оборудование позволяет сваривать трубки с трубными досками намного эффективнее, по сравнению с другими методами. Сложность обслуживания компенсируется высокой производительностью, точностью и безопасностью.

Из анализа представленных методик наиболее эффективна, применительно к сварке трубок с трубными досками из аустенитных сталей, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с применением оборудования фирмы «Polysoude». Представленный метод обеспечивает автоматизацию и повторяемость сварочного процесса.

### **Список использованной литературы**

1. Зимин С.А., Раевский В.А., Царьков А.В. Рекомендации по использованию энергии взрыва для развальцовки труб в трубных досках // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, т.1. – С.50-51.

2. Зимин С.А., Раевский В.А. Анализ состояния и перспективы развития сварки трубных досок теплообменных аппаратов на ОАО «Калужский турбинный завод» // Сварщик-профессионал. – 2005. – №5. – С.17-19.

**Сапожников Андрей Юрьевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sapozhnikov.andrei2016@yandex.ru.

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

**Дьячук Виктор Васильевич** – директор ООО "Энергопрогресс". E-mail: kalygenenergoprogress@yandex.ru.

Д.А. Ткачев, В.Н. Бойко

## **АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АТТЕСТАЦИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Сварка – один из наиболее часто применяемых и востребованных технологических процессов в промышленности. В настоящее время сварка заняла лидирующее место среди технологических процессов в изготовлении и сооружении большого числа металлоконструкций опасных производств, подконтрольных органам технического надзора. Магистральные трубопроводы для транспортирования нефти и газа, трубопроводы пара и горячей воды, котлы, работающие под высоким давлением, резервуары для хранения нефтепродуктов, колонны крекинга и синтеза, подъемно-транспортное оборудование; стальные строительные и мостостроительные конструкции и многое другое производится с применением современных способов сварки. Удельный вес процессов сварки в общем объеме работ составляет 35–40%.

На объектах, подконтрольных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, действует «Система аттестации сварочного производства» (САСв Ростехнадзора). Практическую реализацию аттестационных процедур осуществляет Национальное агентство контроля и сварки (НАКС). В настоящее время в России действует более 200 аттестационных центров НАКС. Публикация на сайте НАКС реестров аттестованного персонала, сварочных материалов, оборудования и технологий, необходимых справочных и нормативных документов способствует повышению эффективности работы надзорных органов, предотвращает возможность фальсификации предприятиями документов по оценке соответствия в сварочном производстве [1].

К настоящему времени аттестовано более 470 тыс. сварщиков и специалистов сварочного производства, около 60 тыс. единиц сварочного оборудования, 1500 видов (марок) сварочных материалов и около 9 тыс. технологий.

Такая большая выборка из всей отрасли может наглядно продемонстрировать существующие тенденции в современном сварочном производстве РФ.

Одним из показателей развития производства является уровень его механизации и автоматизации [2]. В качестве исходных данных решено было выбрать количество аттестаций сварщиков, т.к. количество основных рабочих, занятых непосредственно на производстве наиболее полно отражают состояние и динамику развития рассматриваемой области. Была рассмотрена

ситуация в России в целом, так и в Калужской области в частности (см. табл. 1).

Из представленных данных видно, что ручная дуговая сварка благодаря своей универсальности и малым капитальным затратам в настоящее время преобладает над другими способами сварки на территории России и составляет более 60% объема всех аттестаций. Однако стоит заметить, что относительный объем аттестаций сварщиков по автоматизированным способам сварки растет небольшими темпами (см. рис. 1).

Таблица 1. Количество аттестаций сварщиков в России и Калужской области

Способ сварки	Год			Год		
	По России			По Калужской области		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014
РД	59921	59959	58721	156	169	182
МП	8285	8328	8617	63	87	46
РАД	6160	6487	6457	19	40	31
Г	5121	4922	4497	62	48	60
ЗН	3531	3613	3673	51	49	51
НИ	3015	2961	3036	24	22	27
АФ	2370	2321	2494	2	11	2
МАДП	1727	1649	1666	3	2	3
МПС	993	1026	1125	0	0	0
АПГ	902	1066	1050	0	2	0
ААДП	725	687	962	0	0	0
Т	611	574	717	0	0	0
МПГ	392	727	774	0	0	0
РДН	225	224	233	0	1	0
АФПН	175	195	188	1	2	0
ААД	174	188	160	2	2	1
МФ	165	117	75	0	0	0
КСО	158	222	174	0	0	0
Автоматизированные	22612	23100	23994	146	177	130
Неавтоматизированные	72196	72388	70799	237	258	273
Суммарно	94808	95488	94793	383	435	403

Ситуация в Калужской области в целом схожа с общероссийской, но имеет свои особенности. Ручная дуговая сварка так же является наиболее часто встречающейся, но в гораздо меньшей степени, чем по всей стране. Положительным моментом можно считать гораздо более высокий уровень автоматизации сварочных процессов в Калужской области. Стоит отметить, что негативная экономическая обстановка в 2014 году мало сказалась

на объемах аттестации, но резко снизила процент механизированных и автоматизированных процессов в области.

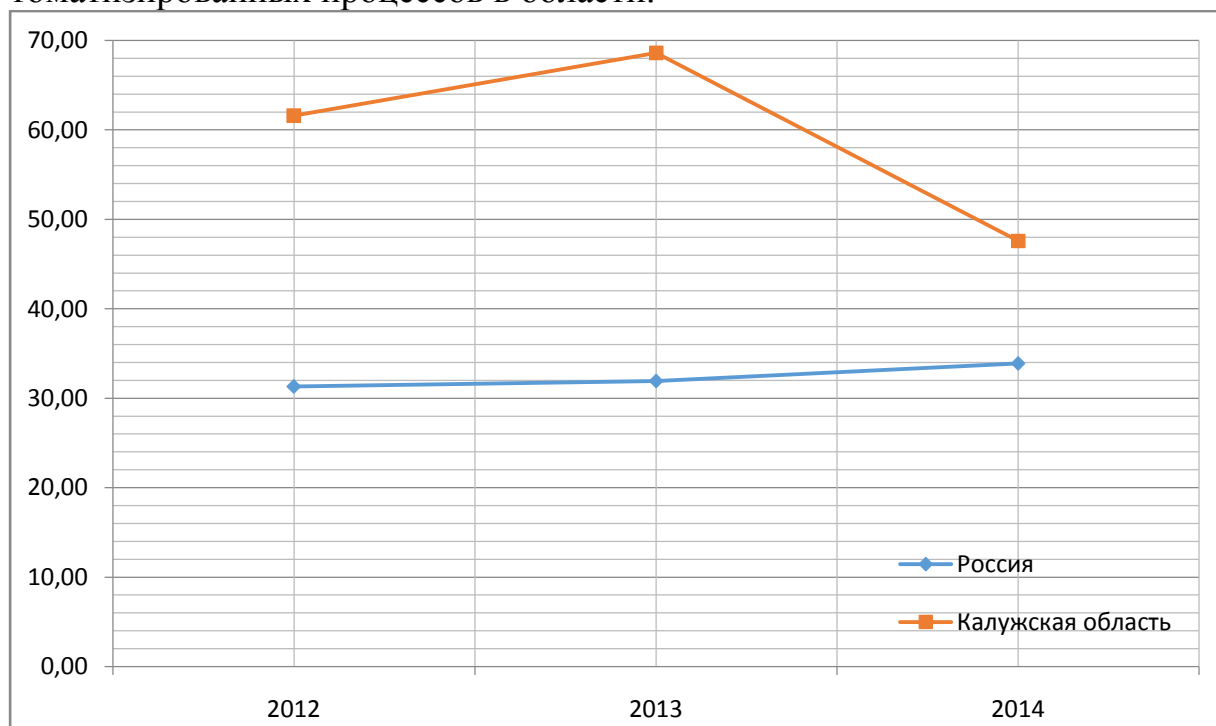


Рисунок 1. Динамика относительного количества аттестаций сварщиков на механизированные и автоматизированные способы сварки.

### Список литературы.

1. Подрез В. Л. *Аттестация как способ повышения организационно-технического уровня предприятия*. Сварка и Диагностика, 2010, №2, с 61-62.

2. Алёшин Н. П., Прилуцкий А. И. *Проблемы и задачи системы аттестации сварочного производства в условиях экономического кризиса*. Сварка и Диагностика, 2009, №1, с 2-3.

**Ткачев Дмитрий Анатольевич**— ассистент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tkachoff88@mail.ru.

**Бойко Владимир Никитович** –преп.КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: paramonov231992@gmail.com.

Н.И. Соловьев, К.Ю. Труханов

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА НА ПРОЦЕССЫ СВАРКИ**

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

Качество технологического процесса сварки может определяться устойчивостью операции. Существенное влияние на параметры устойчивости оказывает качество поверхности электрода. Микрогеометрия оказывает существенное влияние на такие параметры как работа выхода электрона, плотность тока, контактное сопротивление и другие параметры. Что в свою очередь влияет на формирование сварочной ванны, глубину проплавления, чистоту металла шва и другие свойства.

Электрическая дуга при сварке проходит по кратчайшему расстоянию между электродом и сварочной поверхностью. Для вырывания электрона с поверхности катода необходимо преодолеть силы притяжения электрона положительными зарядами. Для преодоления сил необходимо затратить определённое количество работы - работы выхода. Эта величина зависит от состояния поверхности (наличие окисных и других плёнок) и материала катода. При соприкосновении торца электрода с деталью происходит короткое замыкание. Поскольку плоскость торца имеет неровности, контакт осуществляется не по всей поверхности. Величина плотности тока в точках контакта достигает максимального значения.

Плотность тока может быть рассчитана по формуле [1]:

$$j = AT^2 e^{(-\varphi/kT)}$$

где  $j$  - плотность тока,  $\varphi$  - работа выхода поверхности,  $T$  - температура,  $k$  - постоянная Больцмана,  $A$  - постоянная материала.

При увеличении температуры плотность тока термоэлектронной эмиссии возрастает. При температуре равной температуре сварочной дуги устанавливается плотность термоэлектронной эмиссии, достаточной для поддержания устойчивого дугового разряда.

Одним из способов стабилизации дугового разряда является уменьшение работы выхода с поверхности электрода. Наличие на поверхности окисных плёнок работа выхода значительно уменьшается. Для повышения стабильности горения дуги при сварке вольфрамовыми электродами, часто в состав электрода вводятся добавки, такие как окислы лантана. При этом происходит уменьшение блуждания дуги.

В нашей стране предпринимались попытки повышения стабильности сварки путём снижения работы выхода электрона с поверхности плавящегося электрода. Для этих целей применяли проволоку, покрытую тонким слоем солей. Наилучший эффект оказывают соли цезия, обеспечивая низкий потенциал ионизации. При этом капли расплавленного металла уменьшают свои размеры.



Изменение распределения плотности тока в контакте электрод - деталь, при контактной точечной сварке, может повлиять на глубину проплавления. Для уменьшения величины вмятины, используют электрод с плоской поверхностью увеличенного размера, за счет этого падает плотность тока в контакте электрод-деталь. Однако, при этом уменьшается величина проплавления. Оптимального проплавления детали и небольшой вмятины можно достичь, используя электрод, на рабочей части которого расположено кольцо. Использование кольца увеличивает плотность тока в центре контакта и уменьшает отвод тепла из сварочной зоны [2].

Основные характеристики контакта - сопротивление и площадь. При контакте шероховатых поверхностей, первыми в контакт вступают микровыступы. В этих местах возникают контактные сопротивления. При уменьшении шероховатости поверхности увеличивается площадь касания контакта, а сопротивление уменьшается.

Согласно закону Джоуля - Ленца, сопротивление напрямую влияет на количество выделившейся теплоты. Для контакта деталь - деталь:

$$Q = I^2 R t$$

где  $I$  - сварочный ток,  $R$  - среднее сопротивление контакта,  $t$  - время [3]. Значительно повышают контактные сопротивления оксиды и разнообразные загрязнения на поверхности металла. Например, ржавчина на поверхности стали создает контактное сопротивление до 290 000 мкОм.

Площадь контакта деталь - деталь должна быть наиболее близка к площади контакта электрод-деталь, для поддержания оптимальной плотности тока в зоне сварки. В начальный период протекания тока наибольшее количество теплоты выделяется в контакте деталь - деталь, т.к. его сопротивление максимальное (из-за большого количества микронеровностей). Это приводит к интенсивному нагреву слоя металла в приконтактной зоне. Смятие микрошероховатостей и частичное разрушение оксидных пленок понижает контактное сопротивление, которое полностью исчезает при появлении в контакте жидкого металла.

Форма рабочей части электрода также влияет на распределение плотности тока. Используя электрод с удлиненной конусной рабочей частью, плотность тока в контакте электрод-деталь становится более равномерной, чем у электрода с цилиндрической рабочей частью. Сильное влияние на процессы сварки может оказать угол заточки вольфрамового электрода и его износ в процессе работы.

Выделяют три причины, приводящие к потере работоспособности неплавящихся электродов: 1) перенос металла детали на электрод, вызванный заниженным расстоянием до детали, 2) перегрев, оплавление, либо выгорание конусной части (характерно для углов  $\alpha = 15^\circ - 25^\circ$ ), 3) эрозия с образованием типичного «венчика» на конце конусной части (характерно для углов  $\alpha = 20^\circ - 40^\circ$ ) [4].

А.С. Селивановым был проведен эксперимент, в котором подготовка электрода заключалась в заточке рабочего торца на конус с углом, с притупле-

нием диаметром 0,5-0,8 мм. Изменяя угол заточки можно получить разную глубину провара при неизменном токе. Угол заточки менее 20° приводит к эрозии и разрушению конусной части электрода, резко уменьшается качество сварки (глубина проплавления и диаметр литого ядра) после нескольких сотен циклов сварки. При углах, больших 35°, ухудшается способность к поджигу.

У изношенного электрода наблюдаются изменение формы рабочей части: оплавление и скругление конца, эрозия рабочей поверхности электрода, образования нароста и кольцеобразной «короны», происходит выход с поверхности электрода легирующих присадок. Вследствие этих причин, на электродах с большим износом катодное пятно хаотично меняет положение, дуга начинает блуждать по рабочей поверхности и становится трудноуправляемой [5].

Сварочный ток протекает в основном в поверхностном слое электрода и зависит от качества поверхности. Царапины и следы шлифования оказывают большое влияние на проводимость электрода. Поэтому шлифование электрода необходимо обеспечить строго параллельно его оси. В электродах, шлифованных перпендикулярно к оси, ток протекает нестабильно, что может привести к загоранию дуги вне наконечника, блужданию дуги. При затачивании электрода на абразивном круге с крупным зерном или поперек оси электрода, образуются микронеровности (гребни царапин), которые могут расплавляться, тем самым вызывая загрязнение шва.

Проведенный анализ состояния вопроса показал, что, управляя геометрией электродов и изменяя чистоту его поверхности, можно оптимизировать технологические процессы сварки.

### Список литературы

1. Загубский А.А., Цыганенко Н.М., Чернова А.П. Детекторы излучения. Учебное пособие. СПб., 2007, 68с.
2. Климов А.С., Смирнов И.В., Кудинов А.К., Кудинова Г.Э. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки. Учебное пособие. Тольятти, ТГУ, 2007, 260 с.
3. Алешин Н.П., Чернышов Г.Г. Сварка. Резка. Контроль. Справочник в 2-х томах. Москва, Машиностроение, 2004, 480 с.
4. Стрельников И.В., Коновалов А.В. Определение оптимальной геометрии вольфрамового электрода при точечной сварке сжатой дугой. Известия вузов, Сер. Машиностроение, 2011, № 6, с. 53–57.
5. Селиванов А.С. Повышение стабильности проплавления при аргонодуговой сварке конструкций из коррозионностойких сталей. Автореф. дис. канд. тех. наук. Барнаул АлтГТУ, 2012, 19 с.

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

**Труханов Константин Юрьевич** — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

И.Н. Зыбин

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ШЛИЦЕВ ВАЛОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА**

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

Дуговую наплавку под слоем флюса целесообразно использовать для восстановления изношенных поверхностей крупногабаритных деталей, имеющих незначительную твердость (НВ 190...240) и большие износы (до 2...3 мм) [1].

С экономической точки зрения этот способ эффективен при больших объемах сварочных работ, например, при восстановлении шлицевых поверхностей таких деталей, как полуоси и карданные валы [1]. Следовательно, способ целесообразно применять на крупных ремонтных предприятиях, имеющих необходимое специализированное оборудование.

Мелкие шлицы восстанавливают наплавкой под слоем флюса продольными валиками. При этом электродную проволоку укладывают на середине впадины между шлицами. Смещение электродной проволоки к одной из боковых сторон может привести к образованию дуги между боковой поверхностью шлица и электродной проволокой и нарушению формирования наплавленного металла [2].

С целью предотвращения стекания металла при наплавке к торцевой поверхности вала закрепляют медную шайбу толщиной 3...5 мм, диаметром на 1...2 мм больше диаметра детали. Термически обработанные шлицевые валы, изготовленные из легированных сталей 18ХГТ, 40Х, наплавляют под слоем флюса электродной проволокой II класса или проволокой Нп-30ХГСА с последующей термической обработкой. Шлицевые валы, изготовленные из среднеуглеродистых сталей 30, 35, 45, наплавляют под флюсом электродной проволокой Нп-30ХГСА [2].

Упрочнение и улучшение качества наплавленного металла достигается применением легирующих добавок к флюсу, специальных флюсов, легированных марок обычной и порошковой проволоки, термической и термомеханической обработки восстанавливаемых деталей [1].

Изношенные шлицы на валах диаметром более 50 мм наплавляют дуговой наплавкой под слоем флюса вкруговую по винтовой линии проволокой Св-30ХГСА [3]. Хорошие результаты получены при наплавке мелко-модульных шлицев по винтовой линии [4]. При больших значениях модуля шлицев наплавка по винтовой линии становится экономически не целесообразной, т.к. повышаются затраты на электроэнергию, увеличивается расход дорогостоящей проволоки, возрастает деформация валов и трудоемкость наплавки, а также последующей механической обработки (в 2...3 раза по сравнению с продольной наплавкой [5]).

Механизированную наплавку при небольших объемах восстановления выполняют на токарных или наплавочных станках при продольном перемещении суппорта, на котором закрепляют наплавочную головку. При больших объемах восстановления на крупных предприятиях наплавку выполняют на автоматизированных установках.

Преимуществами способа являются [4]:

- а) высокая производительность, высокий к.п.д. дуги (0,86...0,9);
- б) хорошее качество наплавленного металла (чистота, плотность, пластичность, полное сплавление наплавленного металла с основным);
- в) возможность получения слоя наплавленного металла значительной толщины (от 1,5...2 мм до 6...8 мм) на сторону;
- г) равномерность слоя и небольшие припуски на последующую обработку;
- д) отсутствие излучающего действия дуги;
- е) стабильность процесса.

Недостаткам процесса являются значительное термическое влияние на основной металл, высокий и быстрый нагрев основного металла при наплавке, что затрудняет удержание ванны расплавленного металла и флюса на поверхности деталей небольшого диаметра (менее 30...40 мм) [4], целесообразность применения технологии для крупногабаритных шлицевых валов.

К одним из основных эксплуатационных показателей деталей машин, испытывающих знакопеременные нагрузки (к ним относятся и шлицевые валы) относится усталостная прочность, высокие показатели которой способствуют увеличению ресурса работы восстановленных валов. Однако данных, достаточных для проведения анализа усталостной прочности восстановленных рассмотренным способом валов, в настоящее время недостаточно. Вследствие этого целесообразно проведение исследований усталостной прочности шлицевых валов, восстановленных дуговой наплавкой под слоем флюса.

#### **Список литературы:**

1. Дюмин И.Е., Какуевич В.А., Силкин А.С. Современные методы организации и технологии ремонта автомобилей. Киев, Техніка, 1974, 520 с.
2. Черноиванов В.И., Андреев В.П. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин. Москва, Колос, 1983, 288 с.
3. Бабусенко С.М. Ремонт тракторов и автомобилей. Москва, Агропромиздат, 1987, 357 с.
4. Воловик Е.Л. Восстановление деталей и ремонт машин. Калуга, Малоярославецкий филиал ГОСНИТИ, 1975, 276 с.
5. Курчаткин В.В., Тельнов Н.Ф., ред. Надежность и ремонт машин. Москва, Колос, 2000, 776 с.

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

А.С. Коваленко, И.Н. Зыбин

## **ВЫБОР СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА КРОНШТЕЙНА**

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

Одним из самых трудозатратных работ в железнодорожном хозяйстве считается процедура укладки и смены пути. Благодаря механическому гайковёрту, машина путевого моторного гайковерта может заменить труд более 160 рабочих. Гайковерт трехшпindelный предназначен для установки в качестве рабочего органа на машину для закрепления и смазки клеммных и закладных болтов путевого моторного гайковерта. Одной из сборочных единиц гайковерта является кронштейн [1].

Кронштейн определяется как консольное опорное изделие или конструкция, служащая для крепления на вертикальной плоскости оси трехшпindelного гайковерта путевого машины. Кронштейны – высокопрочные изделия, изготавливаемые из сталей или других устойчивых к механическим нагрузкам и агрессивным химическим и температурным воздействиям материалов. Общий вид кронштейна представлен на рис. 1.

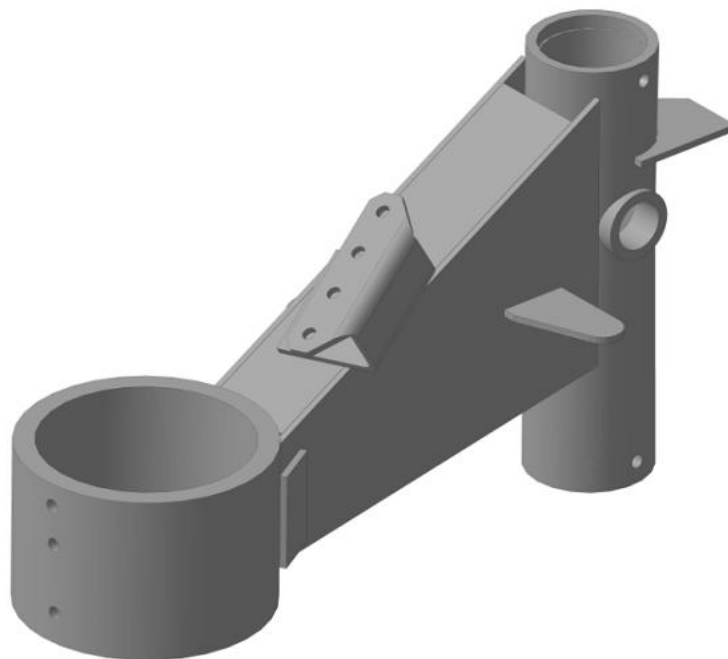


Рис. 1. Кронштейн

Самой нагружаемой деталью кронштейна является стакан, изготавливаемый из стали 45. К стакану привариваются пластины из стали 20 и СтЗсп. Сварка выполняется в полуавтоматическом режиме в среде защитного газа смеси аргона с углекислым газом. Сварка стакана с пластинами связана с трудностями, в связи с разными механическими и теплофизическими свойствами применяемых сталей.

Применение предварительного подогрева изделия в таких случаях позволяет регулировать скорость охлаждения с целью обеспечения получения качественного сварного соединения без дефектов [2].

Для возможности применения предварительного подогрева кронштейна при сварке стакана с пластинами были рассчитаны скорости охлаждения кронштейна в зависимости от температуры предварительного подогрева в диапазоне от 50 до 300 °С.

Скорость охлаждения изделия рассчитывалась в зависимости от параметров термического цикла, погонной энергии и режимов сварки: скорости сварки 18 м/ч, силы тока 240-260 А, напряжения 25-30 В, эффективного коэффициента полезного действия дуги 0,8. Для стали 45 скорость охлаждения должна находиться в пределах 2,5...3,7 °С/с [3]. Выполненные расчеты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов скорости охлаждения при различных значениях погонной энергии и температурах предварительного подогрева кронштейна

Погонная энергия, кДж/см	Температура предварительного подогрева, °С	Скорость охлаждения, °С/с
7,6	-	72
	50	63
	70	53
	100	50
	150	38
	200	28
	250	19
	300	10
11,9	-	46
	50	40
	70	37
	100	32
	150	24
	200	18
	250	12
	300	8
16,6	-	33
	50	29
	70	26
	100	22
	150	18
	200	12
	250	8
	300	3

Таким образом, анализ расчетных данных показал, что без подогрева кронштейна или при малых значениях его подогрева скорость охлаждения не попадает в вышеуказанный диапазон. При погонной энергии сварки 16,6 кДж/см и подогреве кронштейна на 300 °С скорость охлаждения составляет 3 °С/с и попадает в допустимый диапазон, что позволяет обеспечить получение качественного сварного соединения стакана с пластинами без дефектов.

#### **Список литературы:**

1. ООО “Путьсервис”. URL: <http://www.putsrv.ru/product/putins/html/keys/link/gt.htm> (дата обращения 30.10.2015).

2. Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки. Москва, Машиностроение, 2003, 560 с.

3. Коновалов А.В., Куркин А.С., Неровный В.М. Теория сварочных процессов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 752 с.

**Коваленко Антон Сергеевич** — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: anton1kovalenko@yandex.ru.

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

В.А. Дубровский, А.В. Потапов, А.Ю.Амеличева

## ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ДЕТАЛЯХ ТИПА «ВТУЛКА»

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для восстановления (ремонта) наружных поверхностей в деталях типа «втулка» применяются различные технологии (способы)[1,2]. В зависимости от применяемых технологий ремонта, материалов, размеров восстанавливаемых деталей (наружного диаметра  $D$  и толщины стенки  $h$ ) и толщины нанесенного слоя  $h_1$ , могут происходить формоизменения (перемещения) линейных (продольных)  $L$  и радиальных (поперечных) размеров  $d$ .

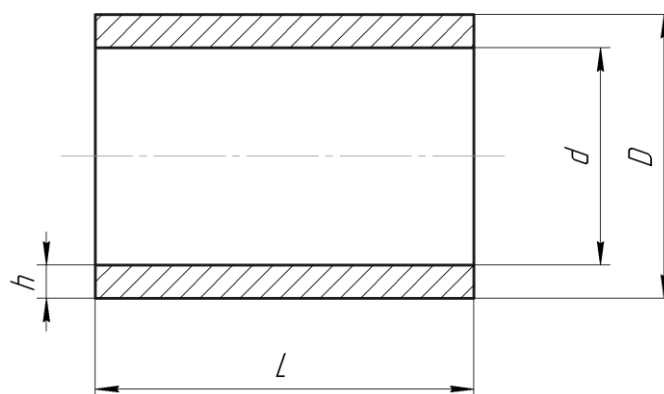


Рис. 1 Образец для проведения экспериментальных исследований, где -  $D$ ,  $d$ ,  $h$ ,  $L$  – соответственно наружный и внутренний диаметры, толщина и длина в миллиметрах.

В некоторых случаях могут появляться и деформации изгиба [3]. Для выбора необходимого способа ремонта, обеспечивающего качественное восстановление при наименьших затратах, важно знать количественные значения перемещений размеров после нанесения покрытий различными способами на наружные поверхности деталей типа «втулка». В данной статье рассмотрены наиболее часто применяемые в промышленности технологии и материалы, которые имеются практически на любом предприятии, а именно:

- механизированная дуговая наплавка в углекислом газе проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм;
- электроконтактная наварка проволоками (ЭКНП) Св-08Г2С и пружинной 2 класса диаметром 2мм по базовому варианту (твердо – жидкая фаза);
- плазменное напыление на установке УПУ-3Д порошком ПТ-Ю5Н.

В работе проводили исследования продольных и поперечных формоизменений размеров, которые заключались в экспериментальном опреде-



лении количественных значений внутренних линейных и поперечных перемещений при различных способах нанесения покрытий на наружные поверхности деталей типа «втулка». Экспериментальные исследования проводились на цилиндрических образцах, размеры которых показаны на рис 1. При этом наружный диаметр образца  $D$  был равен 75 мм, а внутренний  $d$ –63мм. Толщина образца  $h$  составляла 6 мм, а длина  $L$  равнялась 100 мм.

При проведении эксперимента использовались наиболее часто применяемые диаметры проволок и вспомогательные материалы. Образцы изготавливались из двух марок сталей 20 и 45. Дуговая наплавка и ЭКНП выполнялись в три слоя (прохода). Толщина слоя после напыления составляла 2 мм. Измерение внутреннего диаметра  $d$ , до и после нанесения наружного покрытия различными способами, выполнялось в 20 точках по окружности в каждом из 8 сечений по длине образца на разработанном и изготовленном в НПП «ВЕЛД» приборе [4]. Линейные размеры измерялись с помощью микрометра в 20 точках по длине образца. Результаты экспериментальных исследований формоизменений размеров приведены на рис. 2 (линейные) и рис. 3 (радиальные).

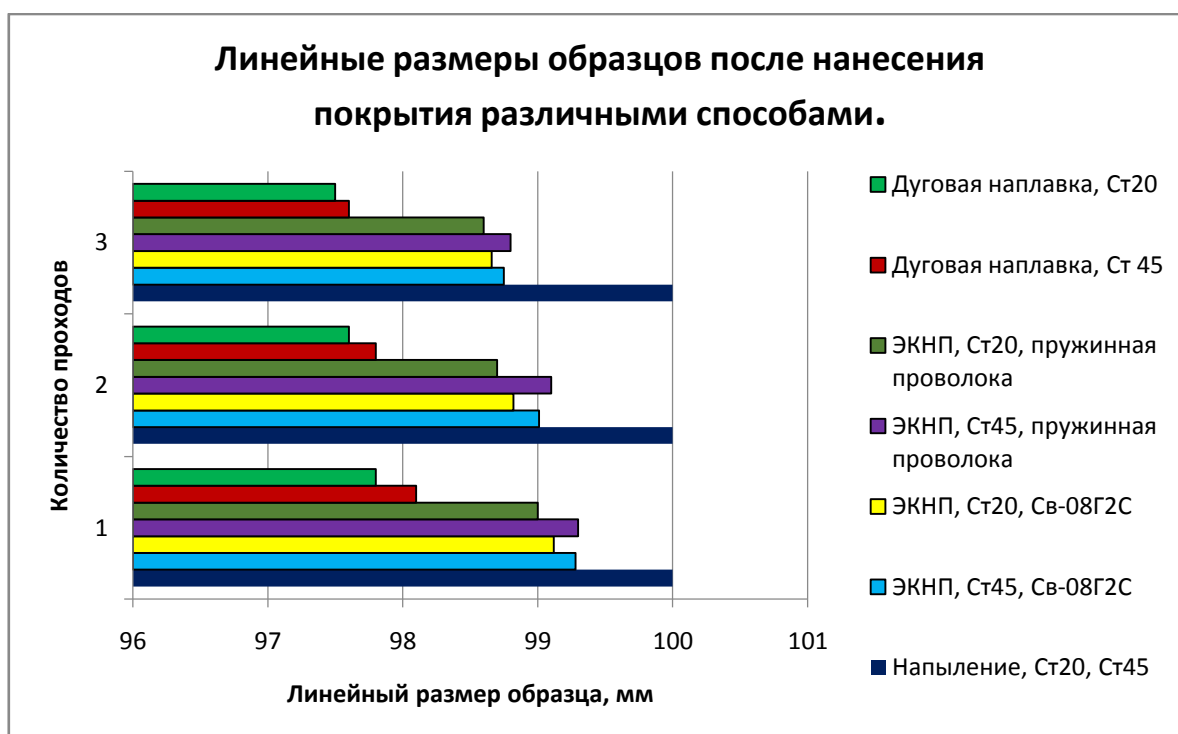


Рис. 2 Линейные размеры образцов после нанесения покрытий различными способами.

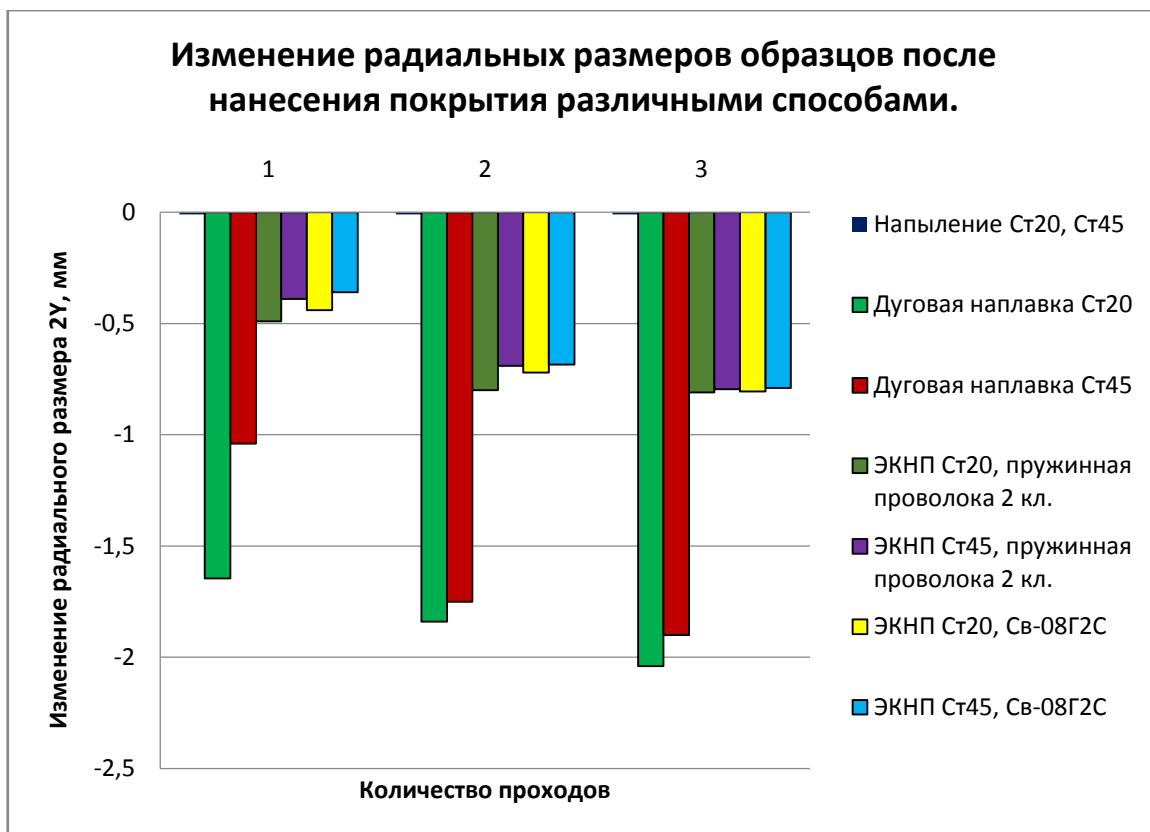


Рис. 3 Изменения радиальных размеров образцов после нанесения покрытий различными способами.

Они подтверждают, ранее сделанные выводы [5] и собственный опыт восстановления деталей, что при использовании технологии плазменного напыления линейные и внутренние поперечные размеры в образцах не изменяются. Выполненные исследования и многолетний опыт ремонта деталей в НПП «ВЕЛД» подтвердили, что при дуговой наплавке и (или) ЭКНП могут появиться линейные и радиальные перемещения размеров [2,3, 4]. При этом установлено, что наибольшие формоизменения продольных и поперечных размеров происходят при наплавке и наварке первых слоев, меньшие вторых и совсем незначительные третьих. Данный вывод справедлив для всех образцов из сталей 20 и 45 после наплавки или наварки сварочной и пружинной проволоками. Аналогичные выводы сделаны в работе [3], результаты которых получены при выполнении экспериментальных исследований по дуговой наплавке валиков по толщине листа в три слоя. Уменьшение темпа роста осевых и радиальных перемещений размеров, при увеличении количества наплавленных (наваренных) слоев от 1 до 3, можно объяснить двумя причинами (рис.4 а, б, в):

- ростом площади сечения образцов, что вызвано наваренной с наружи проволокой и осаженным изнутри основным металлом;
- уменьшением зоны термического влияния (ЗТВ) в основном металле, что вызвано удалением зоны контакта наружная поверхность образца – проволока при наварке второго и третьего слоев.

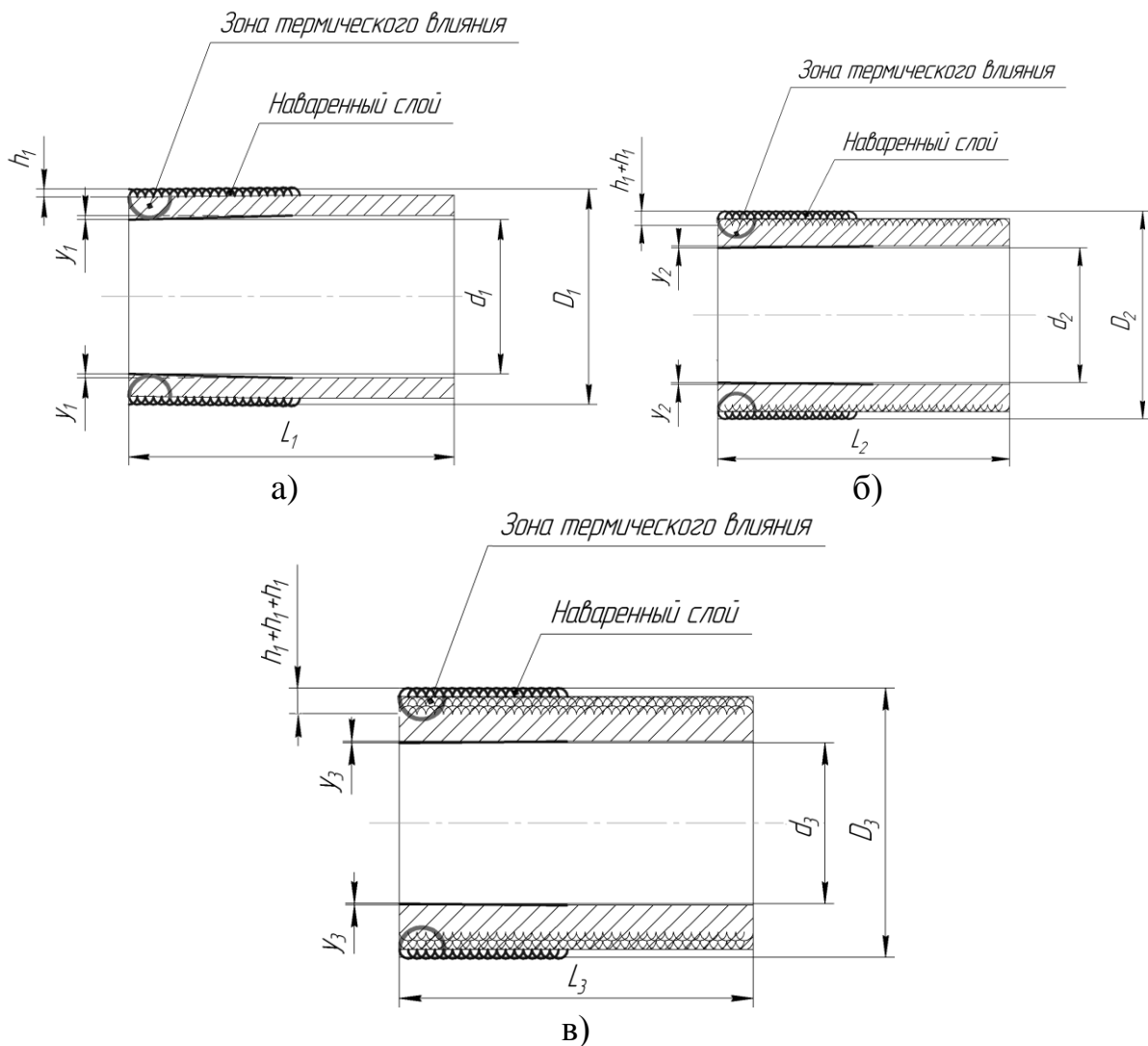


Рис. 4 а, б, в – изменение площади сечения образцов и удаление зоны термического влияния от поверхности основного металла после наплавки или наварки 1, 2 и 3 слоев,  
 где:  $h_1$  - подъем металла за 1-ый слой в мм (подъем металла за каждый следующий слой приблизительно равен  $h_1$ ),  $2y_i$  – величина осадки внутреннего диаметра после наплавки и наварки  $i$ -ого слоя в мм,  
 $d_i$  – внутренний диаметр образца после наплавки и наварки  $i$ -ого слоя в мм,  
 $D_i$  – наружный диаметр образца после наплавки и наварки  $i$ -ого слоя в мм.

По результатам эксперимента установлено, что максимальные перемещения осевых и радиальных формоизменений размеров имеют место при механизированной наплавке в углекислом газе. ЭКНП приводит к меньшим перемещениям продольных и поперечных размеров. При этом наибольшие продольные и поперечные формоизменения размеров имеют место при наплавке и наварке образцов из стали 20 ( $\sigma_T = 245$  МПа), что можно объяснить ее более низким пределом текучести по сравнению со сталью 45 ( $\sigma_T = 355$  МПа). В отличие от марок основного металла, влияние проволок Св-08Г2С и пружинной 2 класса на существенное изменение

осевых и поперечных перемещений размеров при проведении эксперимента не установлено. Было также определено, что абсолютные значения осевых формоизменений размеров образцов при наплавке и наварке оказались больше, чем радиальные. Однако, ввиду того, что, как правило, осевые размеры деталей редко выходят из поля допуска, а радиальные достаточно часто, то наиболее важно знать, как изменяются количественные значения радиальных формоизменений образцов. Полученные количественные значения поперечных перемещений на образцах дают возможность прогнозировать формоизменения радиальных размеров реальных деталей при нанесении наружных покрытий тем или иным способом. Такой подход позволяет выбрать наиболее рациональную технологию восстановления деталей, обеспечивая качественный ремонт при наименьших затратах.

Выводы:

1. Механизированная дуговая наплавка и ЭКНП образцов из сталей 20 и 45 сварочной и пружинной проволоками 2 класса привели к изменению осевых и радиальных размеров. При этом наибольшие продольные и поперечные формоизменения размеров имеют место при наплавке и наварке образцов из стали 20, что можно объяснить ее более низким пределом текучести по сравнению со сталью 45. При этом существенного влияния на осевые и радиальные перемещения размеров ЭКН сварочной и пружинной проволоками не установлено.

2. Плазменное напыление образцов из сталей 20 и 45 порошком ПТ-Ю5Н не привело к изменению продольных и радиальных размеров.

3. При дуговой наплавке и ЭКНП образцов из сталей 20 и 45, увеличение количества наплавленных (наваренных) слоев от 1 до 3 приводит к снижению темпа роста продольных и радиальных формоизменений размеров. Полученные результаты можно объяснить увеличением площади сечения образцов и уменьшением ЗТВ в основном металла. При этом наибольшее уменьшение внутреннего размера образцов для сталей 20 и 45 происходит при наплавке и наварке первого слоя.

4. Получены количественные значения осевых и поперечных перемещений размеров образцов из сталей 20 и 45 при различных наиболее применяемых в промышленности технологиях нанесения покрытий, которые позволяют до выполнения операций восстановления выбирать наиболее рациональные способы ремонта деталей типа «втулка», обеспечивая требуемое качество при минимальных затратах.

#### **Список литературы:**

[1] *Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2 - х томах.* Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышева. - М. Машиностроение, 2004. Т. 2 / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышев, А.И. Акулов и др. - 480 с.: ил.

[2] 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.

[3] Николаев Г. А. *Сварные конструкции*. М.: Машгиз, 1962. 552 с.

[4] Дубровский В.А., Зыбин И. Н., Зезюля В. В., Карчагин А.В. Экспериментальные исследования радиальных формоизменений в тонкостенных цилиндрических образцах после электроконтактной наварки проволокой. *Сварка и диагностика*, 2015, № 2, С. 44 -50.

[5] Сидоров А.И. *Восстановление деталей машин напылением и наплавкой*. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.

**Дубровский Владимир Анатольевич** –д-р техн. наук, директор ООО "НПП Велд". E-mail: nppveld@yandex.ru.

**Потапов Алексей Вячеславович** — ассистент кафедры "Инженерная графика"КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 2furius@gmail.com.

**Амеличева Анна Юрьевна**— студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aallkko@gmail.com.

Д.Е. Бохан, Н.Н. Максимов

## ГАЗОПЛАМЕННАЯ ПРАВКА МЕТАЛЛОВ

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

При сварке изделия производится концентрированный и кратковременный нагрев до высоких температур сравнительно небольшого объема металла. Прилегающие к шву наиболее нагретые участки основного металла подвергаются в процессе нагрева пластическим изменениям, в них образуются деформации пластического сжатия. Остаточные деформации, вызванные сварочным нагревом, нередко искажают размеры и форму сварной конструкции. Вследствие этого требуется последующая трудоемкая правка конструкции [1]. На вытянутых заготовках растяжение при нагреве происходит преимущественно в продольном направлении (удлинение).

Для устранения деформаций после сварки - применяется холодная и горячая правка сварных конструкций. Остаточные напряжения при холодной правке могут быть снижены только в том случае, если вся сварная конструкция подвергалась растяжению до напряжений, равных пределу текучести. Однако в этом случае увеличивается наклеп металла активных зон сварных швов и появляется вероятность образования в швах трещин и разрывов. Кроме того, холодная правка является весьма трудоемким технологическим процессом.

Широкое применение на практике находит горячая правка сварных изделий газопламенным нагревом. Физическая сущность газопламенной правки заключается в изменении линейных размеров и формы в результате возникновения локализованных пластических деформаций, вызываемых местным нагревом металла, свободные деформации которого ограничены окружающими областями холодного металла.

Преимуществами газопламенной правки являются простота технологического процесса, его экономичность, маневренность и универсальность [1]. Газопламенная правка позволяет править все виды остаточных деформаций и может применяться для всех свариваемых материалов: все виды сталей, биметаллов, алюминий, медь, латунь, титан, магниевые стали.

При газопламенной правке может применяться ацетилен, природный газ, пропан, бутан, пропан-бутановые смеси, керосин, дизельное топливо. Чаще используют ацетилен, а также газозаменители ацетилена [3]. Горючие газы- заменители ацетилена дешевле и недефицитны. Однако их теплотворная способность ниже, чем у ацетилена, поэтому в ряде случаев при этом приходится учитывать возможную степень уменьшения интенсивности нагрева. Основными характеристиками горючего газа являются: температура факела, мощность ядра пламени, скорость горения.

Газопламенная правка может применяться не только для сталей, но и для листов и изделий из цветных металлов[2].

Горячая правка, как и холодная, ведет к повышению остаточных напряжений в сварных швах и к истощению пластических свойств в активной зоне, поэтому технологический процесс изготовления сварных конструкций надо строить так, чтобы они получались максимально приближенными к необходимой форме и размерам, для ограничения последующей их правки.

#### **Список литературы:**

1. Трочун И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке. М.: Машгиз, 1964. 247 с.
2. Антонов И. А. Газопламенная обработка металлов. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.
3. Корольков П. М. Термическая обработка сварных соединений. 3-е изд., перераб. и дополн. Киев: «Екотехнология», 2006. 176 с.

**Максимов Николай Николаевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.

**Бохан Дмитрий Евгеньевич** — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: bohan2020@yandex.ru.

В.В. Легостов, К.Ю. Труханов, А.В. Царьков

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В СРЕДЕ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

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

Алюминиевые и магниевые сплавы по своим физико-химическим свойствам значительно отличаются от других металлов и сплавов, и это влияет на условия их сварки. Некоторые физические константы магния и алюминия приведены в таблице. Особо следует остановиться на различии свойств окисной пленки, покрывающей поверхность этих металлов. Данная пленка существенно затрудняет сварку обоих металлов и сплавов на их основе. Кислород в ничтожно малых количествах растворяется в алюминии, но образует с ним устойчивый окисел  $Al_2O_3$ , и пленка этих окислов при повышении температуры почти до  $700\text{ }^\circ\text{C}$  достаточно хорошо защищает металл от дальнейшего окисления. При этом нужно различать пленку окисла  $\alpha Al_2O_3$ , которая образуется уже при комнатной температуре, и  $\gamma Al_2O_3$ , образование которой начинается практически при температуре плавления, и которая отличается большей плотностью. С ростом температуры толщина пленки  $\alpha Al_2O_3$  увеличивается, однако ее плотность уменьшается, она становится рыхлой, и это отрицательно сказывается на ее защитной способности. Как видно из таблицы, температура плавления пленки гораздо выше температуры плавления самого металла, и именно поэтому она не плавится при образовании сварочной ванны, препятствуя сплавлению металла.

Характеристика	Mg	Al
Плотность при $200\text{ }^\circ\text{C}$ , $\text{кг/м}^3$	1740	2700
Температура, $^\circ\text{C}$ :		
плавления	650	931
кипения	1107	2543
плавления окисной пленки	2800	2000
Удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	1030	900
Скрытая теплота плавления, $\text{Дж}/\text{см}^3$	649,3	1065
Коэффициент теплопроводности при $20\text{ }^\circ\text{C}$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	155	223
Коэффициент термического расширения, $1/\text{град}$	$26,1 \cdot 10^{-6}$	$23,8 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент электропроводности, $\text{Ом}\cdot\text{м}/\text{см}^3$	$24,6 \cdot 10^{-4}$	$37,2 \cdot 10^{-4}$

Для удаления толстой пленки следует использовать механические или химические способы, а для удаления тонкой пленки непосредственно во время сварки - явление так называемого катодного распыления. Этот про-



цесс имеет место при сварке в инертном газе на постоянном токе обратной полярности и идет во время горения дуги, а на переменном токе - в те полупериоды, когда изделие является катодом. Особое внимание следует уделять удалению окисной пленки с поверхности электродной проволоки (как алюминиевых, так и магниевых сплавов) малого диаметра. Это объясняется тем, что на поверхности окисной пленки хорошо сорбируется влага, которая, диссоциируя в дуге, приводит к насыщению металла шва водородом и увеличению в нем пористости. Сварка металла больших толщин экономически нецелесообразна, с одной стороны, из-за малой производительности, а с другой – из-за возможного перегрева зоны термического влияния, укрупнения зерна в металле зоны и потери прочности соединения. Для соединения металла толщиной 0,5–2,0 мм пригодна сварка без присадки, выполняемая, как правило, односторонним способом на удаляемых или неудаляемых подкладках. Сварка в инертных газах алюминиевых сплавов выполняется в основном двумя способами: неплавящимся и плавящимся электродом. Неплавящийся электрод может использоваться для ручной (в основном на переменном токе), полуавтоматической и автоматической сварки. Для повышения стабильности горения дуги следует пользоваться специализированными приборами (осцилляторами, импульсными возбудителями и т. д.). Диаметр сопла горелки должен быть согласован с диаметром вольфрамового электрода, который обычно равен 2–5 мм. В зависимости от этой величины выбирают и силу тока  $I_{св} = (60 - 70)d_э$ .

Влияние на качество сварных соединений оказывает выбор конструктивных элементов разделки кромок, которые в настоящее время определены ГОСТ 23949-80. Этим же ГОСТом утверждены и оптимальные размеры сварных швов. Подготовка кромок под сварку также влияет на качество сварных соединений. Очистку под сварку предпочтительно выполнять химическую; небольшие детали можно обрабатывать целиком, у больших же деталей кромки должны быть обезжирены и химически обработаны на ширине не менее 100 мм. Как показывает опыт, непосредственно перед сваркой достаточно тщательно обработать кромки металлической щеткой или шабером и обязательно затем обезжирить спиртом или ацетоном. Щетки должны быть из нержавеющей стали с диаметром проволоки не более 0,2 мм во избежание появления глубоких царапин на обрабатываемых поверхностях.

Особое внимание следует обращать на сборку алюминиевых сплавов под сварку. При односторонней сварке первый проход необходимо выполнять на удаляемой подкладке из меди или нержавеющей стали с канавкой глубиной 0,6–1,2 мм, шириной 4–10 мм (в зависимости от свариваемой толщины), в крайнем случае разделку можно выполнять в виде замка. Если подкладку по каким-либо причинам применять нельзя, то необходимо либо защищать корень шва от окисления поддувом инертного газа, либо выполнить последующую подварку с обратной стороны. Начало и окончание шва следует выводить на специальные выводные планки, устанавливаемые при сборке соединения в его начале и конце. Накопленный опыт применения сварки не-

плавящимся электродом конструкций из алюминиевых сплавов позволил отработать режимы, обеспечивающие высокое качество сварных конструкций.

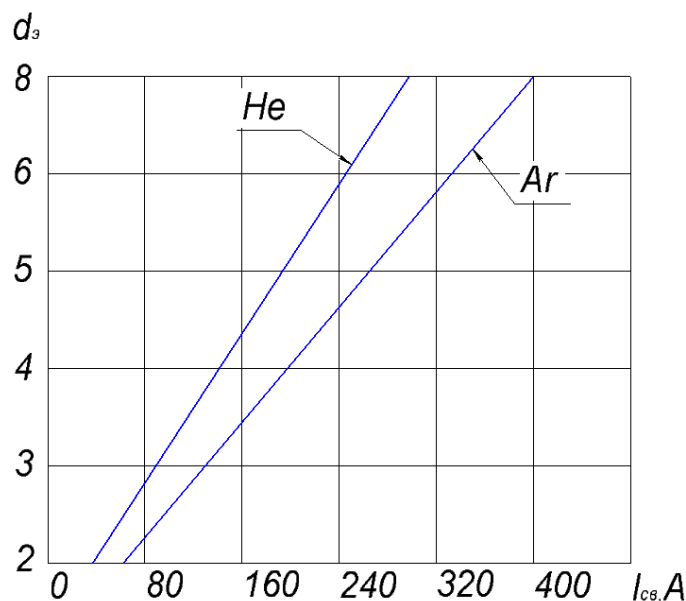


Рис. 1. Допустимые значения силы тока в зависимости от применяемого газа и диаметра электрода

Электроды могут быть из чистого вольфрама и вольфрама, легированного лантаном (ВЛ) или иттрием (ВИ). Последним электродам из-за их высокой стойкости следует отдавать предпочтение: токовая нагрузка на них может быть повышена на 15–20% по сравнению с обычными электродами (рис. 1).

Сварка неплавящимся электродом в аргоне с успехом применяется и для сварки магниевых сплавов по тем же основным технологическим правилам, что и сварка алюминиевых сплавов. Следует отметить, что аргон, обладая меньшей стоимостью, обеспечивает более качественное формирование шва. Некоторые авторы считают, что при сварке металла толщиной более 10 мм рационально использовать трехфазный ток, так как за счет большей мощности дуги проплавление будет более глубоким, нежели при обычных способах сварки. В целях повышения стабильности сварки, там, где это возможно, желательно применять автоматическую сварку.

При сварке плавящимся электродом необходим правильный выбор всех технологических параметров с учетом специфических свойств сплавов. Так, при сварке алюминиевых сплавов большое значение имеет их теплопроводность, при повышении которой увеличивается отток теплоты с увеличением толщины свариваемого металла (рис. 2) и уменьшается глубина проплавления. Выбор режима сварки зависит от типа конструктивного элемента данного сварного соединения. Основные закономерности изменения параметров проплавления шва в зависимости от изменения режима по сравнению со сталью здесь сохраняются лишь качественно.

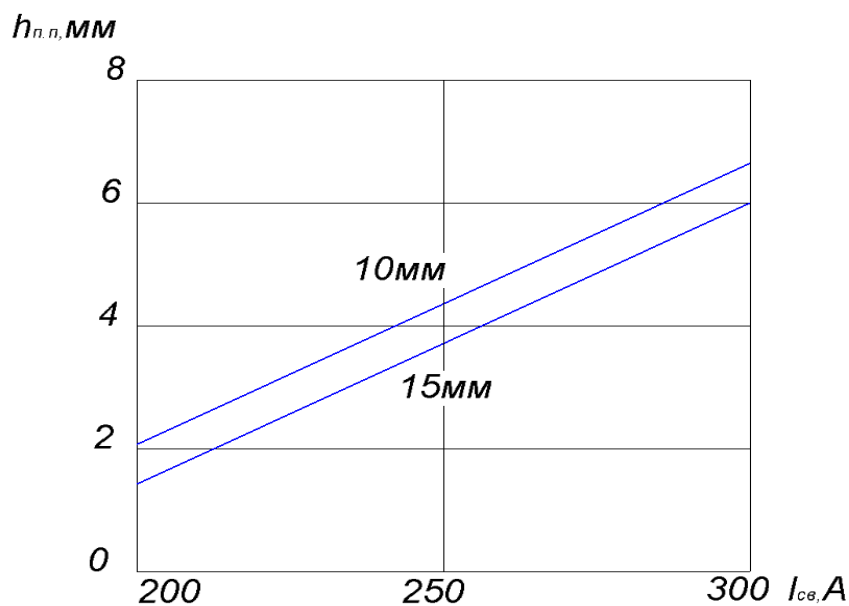


Рис. 2. Зависимость глубины проплавления от толщины свариваемого металла.

Важную роль имеет напряжение на дуге. Его оптимальное значение является функцией трех переменных: состава защитной атмосферы, силы сварочного тока и скорости подачи электродной проволоки данного диаметра. При этом способе сварки существует оптимальное соотношение между силой тока и напряжением дуги, обеспечивающее получение качественного формирования шва.

Для современной промышленности характерно применение тонкой электродной проволоки (до 2,0 мм). Разделка кромок при этом применяется, начиная с толщины 10 мм. При разделке кромок важное значение имеет зазор между ними. Так, при сварке металла толщиной 12–40 мм он не должен превышать  $2 \pm 0,5$  мм во избежание прожогов и протекания металла. Конструктивные элементы для различных типов сварных соединений предусмотрены ГОСТ 14896-69 (для алюминиевых сплавов). При выполнении автоматической и полуавтоматической сварок большое значение имеют расстояния от среза газового сопла до изделия и от токоведущего мундштука до края газового сопла (рис. 3). При их увеличении ослабляется газовая защита (при данном расходе газа) и перегревается электродная проволока, а при уменьшении - появляется опасность быстрого загрязнения сопла брызгами металла и расплавления конца токоведущего мундштука. Эти давно установленные закономерности подтвердила практика последнего десятилетия. Оптимальные расстояния от токоподводящего мундштука до среза сопла и от среза сопла до изделия составляют 6-12 мм.

При сварке в горизонтальном и вертикальном положениях значения силы тока должны быть уменьшены на 10 и 17% соответственно. В вертикальном положении сварка должна производиться снизу-вверх. При выполнении стыкового соединения горелка должна располагаться, как прави-

ло, перпендикулярно к плоскости листа, а при сварке тавровых соединений в нижнем положении ось электрода должна направляться под углом 40–45°. При сварке соединений небольших толщин и корневых швов соединений больших толщин поперечные колебания горелки не допускаются; они возможны лишь при заполнении верхних сечений разделки при сварке соединений больших толщин. Так как сопла горелок при этом виде сварки выполняют в виде цилиндра, расход инертного газа должен строго регулироваться. Недостаточный расход газа приводит к уменьшению устойчивости горения дуги, увеличению интенсивности окисления и разбрызгивания металла, ухудшению формирования шва и появлению на его поверхности черного налета. При чрезмерном расходе газа увеличивается его скорость истечения из сопла; часто это приводит к завихрениям струи после ее удара о плоскую поверхность, захвату воздуха и его попаданию в зону защиты.

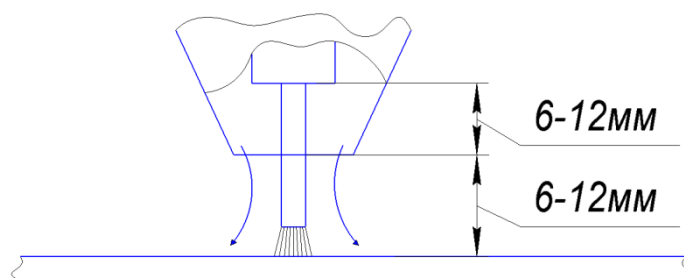


Рис. 3. Схема горелки и токоподводящего мундштука. Оптимальные расстояния для современных методов сварки.

Технология сварки алюминиевых и магниевых сплавов требует особого внимания при разработке, применения специальных приемов и оборудования.

### Список литературы

- [1] Лапин И.Е, Повышение технологических свойств дуги при сварке неплавящимся электродом в инертных газах: Автореф. дис. док.техн. наук-Волгоград, 2004 – 40 с.
- [2] Руссо В.Л. Дуговая сварка в инертных газахЛ.: Судостроение, 1984 – 120 с.
- [3] Фролов В.В. Дуговая сварка алюминия. – Харьков: Технология, 2003 – 66с.

**Легостов Владимир Викторович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: legostov.vladimir@bk.ru.

**Труханов Константин Юрьевич** — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

**Царьков Андрей Васильевич**— д-р техн. наук,заведующий кафедрой "Технологии сварки"КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.

Н.И. Соловьев, П.С. Зверев, К.Ю. Труханов

## **ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ**

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

История лазера началась с создания в 1916 году Альбертом Эйнштейном теории взаимодействия излучения с веществом, из которой вытекала принципиальная возможность создания квантовых усилителей и генераторов электромагнитных волн. Первая попытка экспериментально обнаружить индуцированное излучение была осуществлена в 1928 году, когда Ланденбург, изучая отрицательную дисперсию света, сформулировал условия обнаружения индуцированного излучения как преобладание его над поглощением (условие инверсии), отметив, что для этого необходимо специальное избирательное возбуждение квантовой системы. В 1955 году ученые Николай Басов и Александр Прохоров разработали квантовый генератор - усилитель микроволн с помощью индуцированного излучения, активной средой которого является аммиак. Это изобретение позволило американским ученым Чарльзу Таунсу и Артуру Шавлову через два года начать разработку принципов лазера. Работая параллельно в том же направлении, Александр Прохоров в 1958-м использовал для создания лазера резонатор Фабри-Перо, представляющий собой два параллельных зеркала, одно из которых полупрозрачно. В мае 1960 г. сотрудник исследовательского центра фирмы Hughes, американский физик Теодор Мейман, основываясь на работах Н.Басова, А.Прохорова и Ч.Таунса, сконструировал первый лазер на рубине с длиной волны в 0,69 мкм. Спустя полгода в лабораториях корпорации IBM заработал инфракрасный лазер на фториде кальция с добавкой ионов урана, построенный Питером Сорокиным и Миреком Стивенсоном. Это был уникальный прибор, который действовал лишь при температуре жидкого водорода и практического значения не приобрел. Наконец, в декабре того же года исследователи из Bell Laboratories Али Джаван, Уильям Беннетт и Дональд Хэрриот продемонстрировали первый в мире газовый лазер на смеси гелия и неона, который повсеместно применяется и в наши дни.

Лазер - это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения. [1] Физической основой работы лазера служит квантово-механическое явление вынужденного излучения. Излучение лазера может быть непрерывным, с постоянной мощностью, или импульсным, достигающим предельно больших пиковых мощностей. Лазерный луч по сравнению с обычным светом является монохроматичным (обладает фиксированной длиной волны и частотой). Это облегчает его фокусировку оптическими линзами. Лазерный луч

имеет высокую степень когерентности (согласованного протекания во времени нескольких волновых процессов). Когерентные колебания вызывают резонанс, усиливающий мощность излучения. Лазерное излучение легко передается с помощью оптических систем в труднодоступные места. На лазерный луч не влияют магнитные поля.

Одним из применений лазера является лазерная резка. При этом от других способов резки ее отличает отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал, возникновение минимальных деформаций. Для лазерных резки металлов применяют технологические установки на основе твердотельных, волоконных лазеров и газовых СО<sub>2</sub>-лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах излучения. Сфокусированный лазерный луч обеспечивает высокую концентрацию энергии и позволяет разрезать практически любые материалы независимо от их теплофизических свойств. В процессе резки, под воздействием лазерного луча материал разрезаемого участка плавится, возгорается, испаряется или выдувается струей газа. При этом можно получить узкие резы с минимальной зоной термического влияния.

Возможны два механизма лазерной резки – плавлением и испарением. [2] Однако последний механизм требует высоких энергозатрат и осуществим лишь для достаточно тонкого металла. Поэтому на практике резку выполняют плавлением.

В настоящее время в технологических лазерах применяются твердотельные и газовые излучатели. В твердотельных лазерах в качестве рабочего тела используются активные элементы из рубина, стекла с присадками ионов неодима, алюмоиттриевого граната с неодимом. Длина волн твердотельных установок намного короче, чем у аппаратов газового типа. Агрегаты работают как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Что касается схемы работы, то в данном случае лазер проходит через стеклянный стержень (активный твердотельный элемент) с включениями рубина, неодима, граната алюмоиттриевого (легированного неодимом или же иттербием). Сам стержень располагается в специальной камере, которая освещается лампой накачки, которая способна создавать равномерные мощные вспышки света. В торцах стержней располагаются частично прозрачные и отражающие зеркала. Если обобщить, то все оборудование данного вида, предназначенное для лазерной сварки, работает по принципу: лазерный луч, проходя через стекло, усиливается, многократно отражаясь в рубиновом стержне (рисунок 1).



Рис. 1. Схема твердотельного рубинового лазера

Газовые установки традиционно отличаются большей мощностью. [3] Это объясняется тем, что здесь применяются высоковольтные источники в импульсном или непрерывном режиме, которые возбуждают активную рабочую среду - газовую смесь (рисунок 2). Энергетическое возбуждение газа в этом случае достигаться будет за счет электроразряда. Для подачи газа в зону резки между линзой и заготовкой размещено сопло в виде усеченного конуса. Газ, выходящий под давлением из сопла по лазерному пучку, помимо технологических функций обеспечивает защиту линзы от продуктов лазерной обработки.



Рис. 2. Схема газового лазера

Резку углеродистых сталей чаще всего выполняют с применением кислорода в качестве вспомогательного газа. В результате взаимодействия кислорода с нагретым лучом металлом протекает экзотермическая реакция окисления железа обычно с выделением в 3–5 больше тепла, чем от самого лазерного излучения. Для получения качественного реза используется азот высокой чистоты, подаваемый при повышенном давлении. При резке нержавеющей стали большой толщины требуется заглубление фокального пятна луча в разрезаемый металл. Как следствие, повышается диаметр входного отверстия и возрастает подача газа внутрь металла в зону расплава. Правильный подбор типа газа, его качества и параметров продувки оказывает принципиальное воздействие на результат. Увеличение влажности, наличие углеводородных соединений, содержания пыли может приводить

к повреждению оптики, рассеиванию излучения и общему снижению эффективности работы.

Учитывая определяющий характер тепловых явлений, для оценочных расчетов режимов резки используют тепловые модели, созданные на основе теории теплопроводности. При этом не учитывается влияние газогидродинамических явлений в полости реза. Простейшей является одномерная модель резки с последовательным образованием отверстий и коэффициентом перекрытия. Для оценочных расчетов режимов резки применяются также модель линейного источника тепла в пластине. В параметрической форме основное ее уравнение имеет вид [4]:

$$\frac{6,3}{P} = \ln\left(\frac{4,5}{Y}\right), \quad P = \frac{q}{\delta a \gamma (c T_n + m)}, \quad Y = \frac{V_p b}{a},$$

где  $P$  и  $Y$  параметры соответственно мощности и скорости;  $q$  - эффективная тепловая мощность луча, Вт;  $\delta$  - толщина металла, м;  $a$  - коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\gamma$  - плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  - удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T_n$  - температура плавления, К;  $m$  - скрытая теплота плавления,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $V_p$  - скорость резки,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $b$  - ширина реза, м.

При  $P \geq 10$  и  $Y \geq 5$  выражение преобразуется в уравнение  $Y = 0,48P$  для мощного быстро движущегося линейного источника тепла в пластине, при  $P \leq 4$  и  $Y \leq 1$  оно описывает предельное состояние теплового поля для линейного подвижного источника тепла. По формуле можно рассчитать скорость резки при заданной мощности излучения или требуемую мощность излучения при заданной толщине металла и скорости резки. В качестве примера рассчитаем минимальное значение  $q$ , требуемое для резки разных металлов толщиной  $10^{-3}$  м при минимальной скорости резки  $1,67 \cdot 10^{-3}$  м/с и  $b = 2 \cdot 10^{-4}$  м.

К основным преимуществам технологии лазерной резки можно отнести: а) отсутствие механического контакта позволяет обрабатывать хрупкие и деформирующиеся материалы; б) обработке поддаются материалы из твердых сплавов; в) возможна высокоскоростная резка тонколистовой стали; г) при выпуске небольших партий продукции целесообразнее провести лазерный раскрой материала, чем изготавливать для этого дорогостоящие литейные и пресс-формы; д) возможность автоматизации и высокая точность.

### Список литературы

1. Кербера Г. Промышленное применение лазеров: Пер. с англ. М., Машиностроение, 1988, 280 с.
2. Витteman В. СО2-лазер: Пер. с англ. М., Мир, 1990, 360 с.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 664 с.



4. Вакуленко В.М., Иванов Л.П. Источники питания лазеров. М., Сов. Радио, 1980, 104 с.

5. Реди Дж., Промышленные применения лазеров. М., Мир, 1981, 638 с.

6. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С., Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978, 336с.

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

**Зверев Павел Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: zverev.pavel1995@yandex.ru.

**Труханов Константин Юрьевич** — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

С.С. Парамонов, Н.Н. Максимов

## **ОСОБЕННОСТИ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

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

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к увеличению объема использования алюминия и его сплавов в различных отраслях промышленности, особенно в тех случаях, когда важны стойкость к коррозии и высокое соотношение прочность/вес для металлических конструкций. Возрастает потребность в технологиях, обеспечивающих качественные сварные соединения изделий из данных материалов.

Одним из распространённых способов получения неразъемных соединений алюминиевых деталей является точечная контактная сварка. Она обеспечивает высокую производительность, стабильное качество получения сварных соединений, малую себестоимость за счет низкого расхода вспомогательных материалов и высокую экологичность процесса. Также следует отметить широкие возможности механизации и автоматизации процесса. Машины контактной сварки или их рабочие узлы могут сравнительно легко встраиваться в поточные сборочно-сварочные линии.

Однако сварку алюминия и его сплавов осложняют его химическая активность и высокая теплопроводность.

Пленка окиси, образующаяся на поверхности заготовки, имеет температуру плавления более 2000 градусов, что превышает температуру плавления алюминия и его сплавов. Окислы алюминия являются стойкими химическими соединениями, имеющими нейтральные качества [1]. Поэтому получающаяся пленка практически не поддается воздействию флюсов. Кроме того, ее тугоплавкость препятствует формированию литой зоны сварного соединения.

Перед тем как сварить алюминий точечной сваркой, необходимо подготовить его поверхность. Подготовка поверхности алюминия может выполняться механическим или химическим способами.

Механическая очистка может выполняться вручную или при помощи специальных устройств, что более эффективно. Очистка в основном осуществляется при помощи вращающихся металлических щеток, при зачистке вручную чаще всего применяют наждачную бумагу.

Химическая очистка является наиболее эффективным методом. Травление алюминия может осуществляться в растворах каустической соды или ортофосфорной кислоты. Перед обработкой заготовки должны быть обезжирены. После травления допускается хранения алюминия на складе до 3 дней (сварка переменной энергией) или 1 сутки (сварка аккумулярованной энергией).

Высокие теплофизические свойства алюминия затрудняют тепловыделение в зоне соединения при точечной контактной сварке. Поэтому для повышения тепловыделения в зоне сварки и уменьшения влияния теплоотвода в электроды и массу деталей сварку ведут на жестких режимах. Эти особенности в значительной мере усложняют процесс контактной сварки сложных конструкций из алюминиевых сплавов.

В данной работе рассматриваются пути решения проблемы качества сварных соединений на примере антенного излучателя, выполненного из сплава АМц.

Излучатель (Рис. 1) представляет собой конструкцию, состоящую из желоба и 11 бобышек.

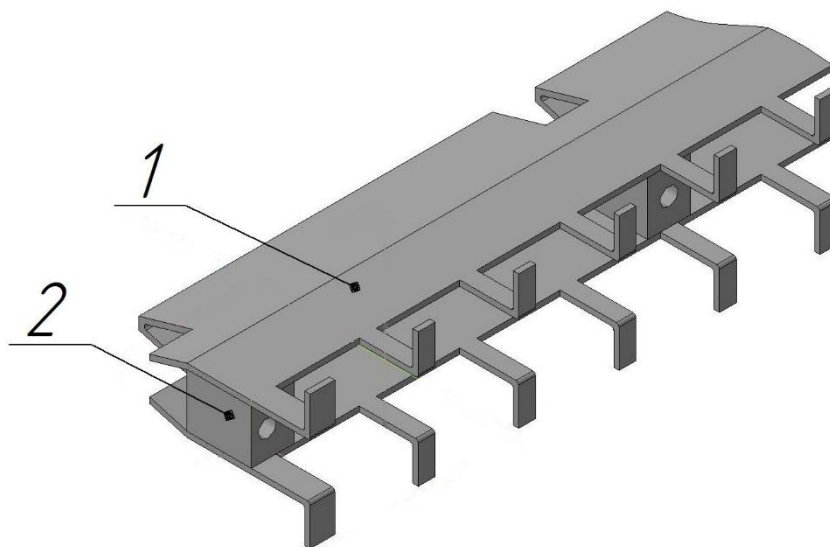


Рис. 1 Антенный излучатель. 1 – Желоб; 2 - Бобышка

При сварке желоба с бобышкой происходит шунтирование тока через желоб (Рис. 2).

Кроме фактора шунтирования возникает еще одно затруднение – формирование одновременно двух сварных точек.

В совокупности физико-химических свойств и конструктивных особенностей изделия возникают проблемы получения стабильного качества сварных соединений, основными из которых являются: прилипание электродов к поверхности изделия в процессе сварки; формирование требуемых прочностных характеристик полученного соединения; глубина отпечатка от электрода на поверхности желоба.

Предлагаются следующие решения для получения качественного сварного соединения:

1. Применение рельефов на свариваемых поверхностях бобышек, позволяющих повысить начальное тепловыделение в зоне формирования литых ядер.
2. Применение жесткого сварочного импульса.

3. Уменьшение теплоотвода в электроды за счет применения молибденовой прокладки.
4. Применение малоинерционного привода системы сжатия контактной машины для снижения влияния теплового расширения материала во время сварки и уменьшения глубины электродных отпечатков.

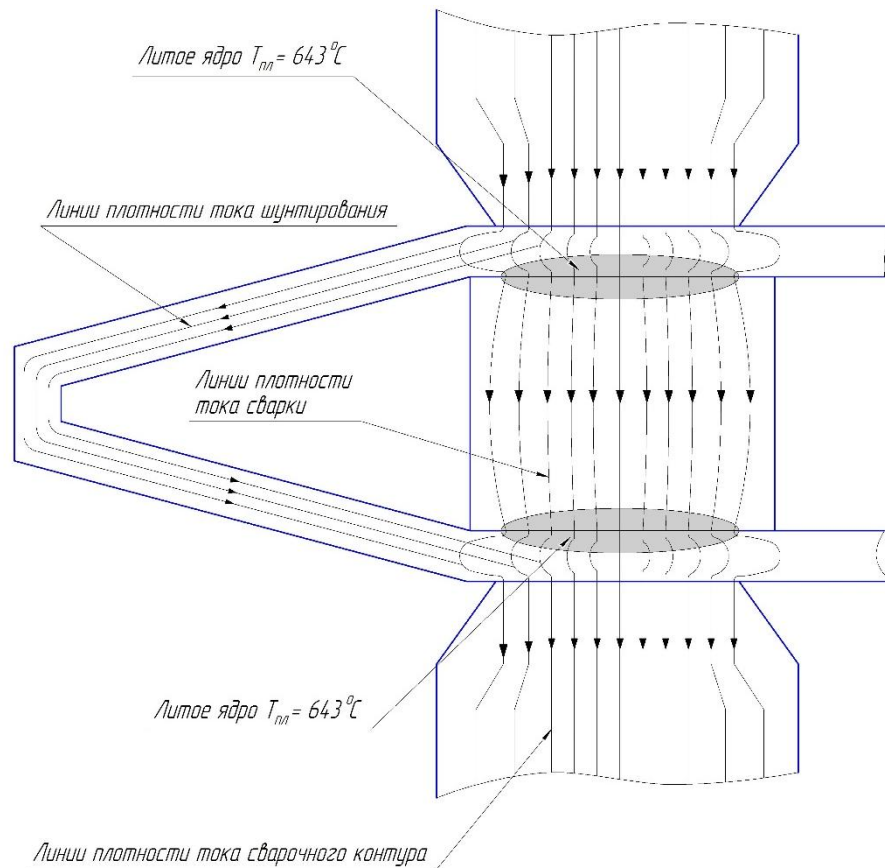


Рис. 2 Схема протекания тока при точечной сварке антенного излучателя

В процессе точечной сварки максимальный нагрев, а, следовательно, и начало процесса плавления происходят в зоне с максимальным электрическим сопротивлением. Для того чтобы гарантировать начало плавления в требуемых зонах (места соединения бобышки и желоба) необходимо увеличить электрическое сопротивление между указанными элементами. Оптимальным способом достижения данной цели является уменьшение площади контактов за счет придания торцам бобышки сферической формы (рис. 3).

Источник питания контактной машины для сварки алюминиевых сплавов должен обеспечивать жесткие режимы сварки, характеризующиеся быстрым нагревом.

Инверторные источники питания являются одними из самых современных, имеют малые габаритные размеры, позволяют тонко регулировать

импульс тока. Также важным фактором является большая скорость нарастания тока, что позволит снизить отрицательное влияние высокой теплопроводности материала.

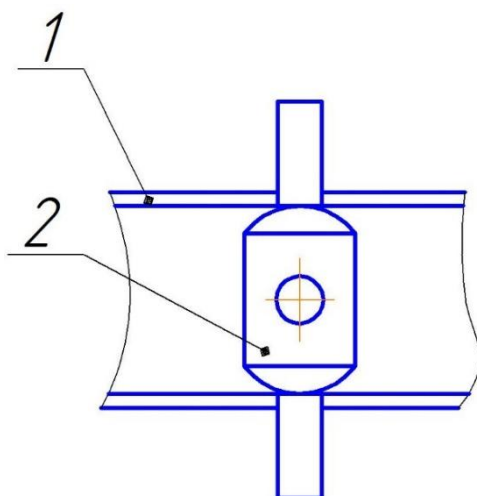


Рис. 3 Конструкция с уменьшенной площадью контакта бобышки и желоба. 1 – желоб, 2 – бобышка.

В инверторных источниках питания осуществляется трехкратное преобразование энергии питающей сети. Повышение частоты в 10 раз позволяет, как это видно из формулы, определяющей сечение магнитопровода сварочного трансформатора  $F_c$ , уменьшить вес и габаритные размеры трансформатора также в 10 раз:

$$F_c = \frac{U_{2\max}}{4,44fw_2BK_c}, \quad (1)$$

где  $B$  - магнитная индукция, Тл;  $K$  - коэффициент, учитывающий неплотность сборки листов трансформаторного железа и слой изоляции на листе,  $K = 0,9...0,2$ ;  $f$  - частота тока,  $f = 50... 500$  Гц;  $U_{2\max}$  - вторичное напряжение,  $U_{2\max} = 4...20$  В;  $w_2$  - число витков вторичной обмотки.

Для повышения частоты питающей сети в таких источниках постоянного тока переменное напряжение трехфазной питающей сети с частотой 50 Гц сначала выпрямляется, а затем производится инвертирование (преобразование) постоянного напряжения в переменную частоту 500 Гц, которое подается на первичную обмотку сварочного трансформатора, а на стороне вторичной обмотки трансформатора вновь выпрямляется до постоянного тока [2].

Отвод тепла в электроды, вызванный высокой теплопроводностью материалов изделия и электродов снижает тепловложение в зоне сварки. Для снижения теплоотвода могут применяться различные пластины из хромоникелевой стали или молибдена, которые позволяют снизить отвод тепла за счёт своей меньшей теплопроводности. Также возможно применение медных электродов с различными вставками (например, вольфрамовыми), которые не усложняют технологический процесс сварки.

Отпечаток электрода в месте сварки, отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах изделия. Причинами возникновения данного явления являются интенсивный отвод тепла из зоны сварки в деталь, вызванный высокой теплопроводностью материала, и высокая масса подвижной части контактной машины, препятствующая тепловому расширению материала в процессе сварки. Для уменьшения глубины отпечатка необходимо использовать малоинерционный механизм сжатия, который позволит металлу изделия расширяться в процессе нагрева. Наиболее приемлемым вариантом в данном случае является мембранный пневматический привод, отличающийся небольшой высотой и простотой устройства. Недостатком данного типа приводов является небольшой ход, но во многих случаях он вполне достаточен в качестве рабочего хода сварочной машины.

Рабочий диаметр мембраны обычно достигает до 500 мм. Но получаемую силу, если нужно, увеличивают, заставляя работать на один шток несколько мембран.

Применение различных технологических и конструктивных решений позволяет снизить влияние факторов, затрудняющих процесс точечной контактной сварки, и получать качественные и стабильные сварные соединения.

#### **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. Банов М. Д. Технология и оборудование контактной сварки. — 4-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2009. — 224 с.
3. Глебов Л. В. и др. Расчет и конструирование машин контактной сварки 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 424 с.

**Парамонов Сергей Сергеевич**—аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: paramonov231992@gmail.com.

**Максимов Николай Николаевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.

Г.К. Ненарокомов, Н.Н. Максимов

## **ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДУГИ И ЕЁ СТАБИЛЬНОСТИ ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ.**

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

При сварке конструкций из высоколегированных сталей, сплавов титана, алюминия, и других материалов широко применяется сварка неплавящимся электродом в инертных газах. Данный способ позволяет соединять как небольшие детали, так и крупногабаритные, большой толщины, не требует применения флюсов и электродных покрытий и последующей зачистки швов. Дает возможность осуществлять соединение трудносвариваемых материалов, восстановление изношенных деталей, а также производить наплавку материалов с особыми свойствами.

Что касается свойств дуги, то в отличие от дуги с плавящимся электродом, здесь отсутствует влияние на свойства разряда процессов плавления и переноса электродного материала, взаимодействия металла с защитной средой.

Однако существует ряд причин, сдерживающих применение аргонодуговой сварки металлов. Так при сварке деталей большой толщины (более 5 мм) на токах свыше 300-400А проявляется проблема низкой производительности данного способа. Она обусловлена сравнительно невысокой тепловой эффективностью дуги и нарушением формирования швов (возникновение пор, подрезов, перетяжек, наплывов и т.п.) при высоких значениях погонной энергии. Последнее как утверждает автор работы [1] связано с чрезмерным силовым воздействием дугового разряда на расплавленный металл сварочной ванны, квадратично возрастающим с увеличением сварочного тока. Установлено, что на величину силового воздействия дуги существенное влияние оказывают также состав защитного газа и форма рабочего участка электрода [1]. Так, применение гелия и его смесей с аргоном повышает проплавливающую способность дуги, однако данные о влиянии состава смеси на силовое воздействие дуги и формирование шва в литературе отсутствуют. Не раскрыты также механизмы влияния конструкции неплавящихся электродов на формирование швов, отсутствуют систематизированные данные о взаимосвязях условий протекания катодных процессов и состава инертной атмосферы с распределением давления дуги на сварочную ванну, характер которого в значительной мере определяет гидродинамические процессы в сварочной ванне.

При сварке тонколистовых металлов одной из проблем, является низкое качество формирования швов, проявляющееся в несплавлении кромок, образовании прожогов, провисании сварных швов, высоких значениях ко-

эфициента формы шва. Причина этих дефектов кроется в низкой пространственной и физической устойчивости малоамперной дуги, наблюдаемой при сварке как на постоянном, так и на переменном токе при сварке алюминия[2].

Среди известных способов повышения производительности сварки неплавящимся электродом выделяют применение активирующих флюсов и добавок галоидосодержащих газов, обеспечивающих контрагирование дугового разряда и, как следствие, высокую концентрацию видимой энергии[1]. В то же время применение активирующих флюсов неизбежно сказывается на стойкости катодов и неэффективно при токах свыше 275 А в следствие того, что пары флюса уносятся из дуги и перестают влиять на ее строение. Также для повышения технологических свойств дуги применяют процесс сварки ассиметричными разнополярными импульсами прямоугольной формы [3].

Выявлено, что решающим фактором качественного формирования сварного шва является величина максимального давления дуги  $p_{max}$  на сварочную ванну. Понижение данной величины это и есть решение поставленной проблемы.

В настоящее время предложены следующие перспективные способы понижения максимального давления дуги  $p_{max}$  [1,2,3]:

Применение электродов принципиально новой конструкции, которые обеспечивают горение дуги с диффузным катодным пятном в широком диапазоне токов(0-1000А). При том что ранее сварка данным способом велась как правило до 150 А. Конструкция рабочего участка неплавящегося электрода определяет характер протекания катодных процессов. У электродов, заточенных на конус зона с максимальной напряженностью расположена в непосредственной близости от оси катода, в связи с чем давление на сварочную ванну велико. С ростом угла заточки максимум напряженности смещается от оси электрода, увеличивая диаметр столба дуги и снижая ее пиковое давление  $p_{max}$ . Также прорезь, сделанная на рабочем участке электрода, приведет к образованию радиально направленных сил Лоренца, которые изменят распределение теплового потока с кругового на эллиптический. Таким образом обеспечивается эффект аналогичный применению внешнего магнитного воздействия, выражающийся в отклонении дуги в направлении сварки, что позволяет компенсировать естественное ее отставание на высоких значениях скорости. Конструкция рабочего участка неплавящегося электрода, определяя конфигурацию магнитного поля вблизи катодного пятна, обуславливает характер распределения давления и теплового потока от дуги в свариваемый материал.

Замена защитного газа с аргона на аргоно-геливую смесь. При концентрации гелия более 50% достигается хорошее формирование швов, если используются электроды с конической заточкой. Если же использовать электроды, обеспечивающие горение дуги с диффузионным катодным



пятном то швы, будут качественным, независимо от соотношения газов. При этом наилучшие показатели формирования швов и тепловой эффективности процесса обеспечиваются в первом случае при сварке в чистом гелии, а во втором при концентрации гелия 75-80%.

В ходе исследований [1,2] было установлено, что:

1. Силовое воздействие дуги на сварочную ванну определяется характером протекания катодных процессов и составом защитного газа. При этом переход от дуги с сосредоточенным катодным пятном к разряду с диффузным катодным пятном, а также увеличение концентрации гелия и аргоно-гелиевой смеси газов снижают силовое воздействие дуги в 1,6-3,2 раза. Этот переход осуществляется путем формирования в прикатодной зоне области с пониженной напряженностью магнитного поля, что приводит к отклонению оси дугового разряда в ее направлении, и позволяет компенсировать естественное отставание дуги при сварке на высоких скоростях.
2. Давление дуги с сосредоточенным катодным пятном в аргоне характеризуется большим градиентом в центре сварочной ванны и высоким максимальным значением  $p_{max}$  превышающим при равном токе в 1,5-1,8 раза максимальное давление дуги в гелии. Это является одной из причин нарушения формирования швов при аргонодуговой сварке на высоких скоростях и погонной энергии.
3. При сварке в аргоно-гелиевых смесях максимальное давление дуги  $p_{max}$  скачкообразно уменьшается на 650-1000 Па в диапазоне увеличения концентрации гелия на 20-25%. Наименьшие значения  $p_{max}$  наблюдается у разряда с диффузным катодным пятном в чистом He, а максимальная тепловая эффективность такой дуги достигается при концентрации гелия 50-75%.
4. Путем изменения геометрических параметров рабочего участка неплавящегося электрода можно управлять конфигурацией магнитных полей и плотностью плазменных потоков, вплоть до создания ассиметричных, благодаря чему источник тепла приобретает универсальные характеристики.

Таким образом, влияя на протекание катодных процессов, состав защитного газа и конфигурацию магнитного поля вблизи катодного пятна можно научно обоснованно и эффективно управлять технологическими характеристиками дуги, обеспечивая при этом требуемую стабильность формирования швов и высокую производительность процесса.

### Список литературы

1. Атаманюк В.И, Разработка путей и средств повышения стабильности формирования швов при сварке неплавящимся электродом: Автореф. дис. канд. техн. наук-Волгоград, 2008-19с.

2. Савинов А.В, Повышение технологических свойств дуги с неплавящимся электродом в инертных газах: Автореф. дис. док. техн. наук-Волгоград,2013-40с.

3.Лапин И.Е, Повышение технологических свойств дуги при сварке неплавящимся электродом в инертных газах: Автореф. дис. док. техн. наук-Волгоград,2004-40с.

**Ненарокомов Георгий Константинович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ego9911@yandex.ru.

**Максимов Николай Николаевич** — канд. техн. наук,доценткафедры "Технологии сварки"КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.

Г.В. Орлик, А.Г. Орлик, О.В. Дандин

## **ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ДЕТАЛЕЙ**

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

Конкурентоспособность современных промышленных предприятий зависит от производительности и надежности используемого промышленного оборудования. Эффективность оборудования или промышленного комплекса зависит от технологических перерывов или аварийных остановок на плановый и аварийный ремонт. В наибольшей степени это связано с износом оборудования, до 90 % машин выходят из строя из-за изнашивания трущихся поверхностей деталей. Период работы оборудования зависит от ресурса всех деталей, входящих в него. Детали, работающие в условиях интенсивного износа, имеют короткий период эксплуатации, что значительно снижает общий ресурс работы оборудования и приводит к плановым остановкам. Использование наплавки в целях восстановления изношенных покрытий деталей машин зарекомендовало себя как эффективный и экономичный метод увеличения срока эксплуатации оборудования.

Применение современных материалов для наплавки, обладающих качественно новым комплексом свойств, обеспечивающих повышение стойкости деталей машин к интенсивному износу, является перспективным для применения в различных отраслях машиностроения. Износостойкие свойства наплавочного материала во многом зависят от структуры нанесённого покрытия. Применение современных наплавочных материалов, позволяет получать различные структуры стойкие к определённым видам изнашивания. Широкий спектр современных наплавочных материалов затрудняет выбор определённой группы данных материалов и их структур, позволяющих максимально сопротивляться интенсивному изнашиванию в конкретных условиях эксплуатации оборудования.[1]

Применение более стойких наплавочных материалов для деталей, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания, позволяет повысить ресурс работы изделия в целом и механизировать процесс наплавки.

Повышение износостойкости деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа, за счёт формирования структуры наплавленного слоя с заданным комплексом свойств, при механизированной дуговой наплавке является актуальной задачей. Исходя из условий работы рассматриваются изделия, работающие в условиях гидроабразивного износа (спусковые лотки гравийных и песчаных карьеров, смесители машин, транспортирующие шнеки и др.).

Рассмотрим выбор наплавочного материала на примере наплавки реборды шнека. Реборда шнека работает в условиях гидроабразивного изнашивания в результате воздействия твёрдых частиц (речного песка), увлекаемых потоком жидкости (воды), край реборды должен обладать свойствами режущего инструмента. Шнек, вращаясь в корпусе регенерационной установки, транспортирует и отделяет жидкость от твёрдой фазы, поэтому износ реборды приводит к уменьшению производительности регенерационной установки в целом, что определяет срок и необходимость проведения ремонтных работ. Следует отметить, что ремонт реборды шнека по базовой технологии возможен не более двух раз, далее необходимо производить её замену, это увеличивает стоимость ремонта.

В настоящее время различают следующие виды механического взаимодействия абразива с трущимися деталями: скольжение детали по монолитному абразиву; качение детали по абразиву; соударение с частицами абразива; соударение детали с монолитным абразивом; воздействие потока абразивных частиц на поверхность детали (гидроабразивный и газоабразивный износ); скольжение детали в массе абразивных частиц; трение сопряженных деталей в контакте с абразивными частицами. [2]

Результаты испытаний на абразивный износ показывают, что повышение твердости металла сопровождается увеличением его износостойкости, однако, при одинаковой твердости износ зависит и от структуры металла рис.1. Например, при одной и той же твердости металл со структурой бейнита имеет меньший износ, чем металл со структурой мартенсита. [3]

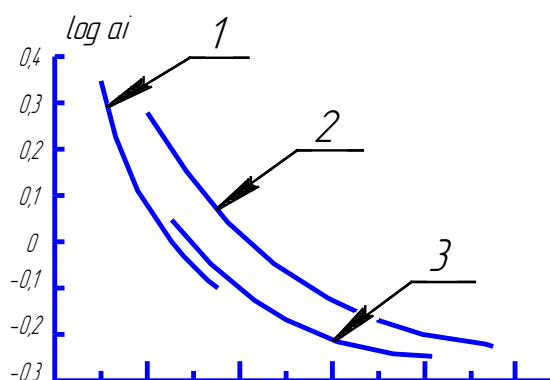


Рис 1. Зависимость коэффициента гидроабразивного износа от твердости материала для сталей различного структурного класса:

1 - сталь с ферритно-перлитной структурой, 2 - сталь со структурой мартенсита и бейнита, а также со структурой отпущенного мартенсита и отпущенного бейнита, 3 - то же при содержании хрома > 2%

В общем случае стойкость против абразивного изнашивания зависит не только от твердости, но и от состава, и от структуры поверхностных слоев. Увеличение износостойкости достигается при высоком сопротивле-

нии металла сжатую, сдвигу, значительной величине молекулярно механического сцепления структурных составляющих, а также сочетании твердости и вязкости при отсутствии хрупкости. Кроме того, высокая степень легирования твердых растворов и равномерность распределения легирующих элементов. Получение такого комплекса свойств, зачастую противоречивых, возможно лишь при применении гетерофазных композиционных материалов или покрытий.

Для обеспечения стойкости против абразивного износа необходимо обеспечить структуру материала с твердой фазой, расположенной в матрице, при этом, чем больше прочность матрицы, тем выше износостойкость материала. Наиболее целесообразным является использование покрытий с композиционной структурой, состоящей из пластичной и одновременно высокопрочной матрицы с твердыми армирующими частицами.[3]

Наноструктурированные покрытия - термобарьерные, износостойкие, коррозионностойкие и предназначены для восстановления и продления сроков работы оборудования нефтегазовой, авиационной, атомной, машиностроительной, металлургической, строительной и других отраслей промышленности. В частности, покрытия защищают от коррозии буровых платформ, мостов и металлоконструкций, а также от износа запорной и насосно-компрессорной арматуры, бурового, нефтегазодобывающего и перерабатывающего оборудования. Наноструктурированные покрытия характерны для функциональных покрытий, наносимых методами газотермического напыления. Современное машиностроение ставит задачи снижения коэффициента трения при сохранении износостойкости, повышения вязкости покрытия при сохранении антикоррозионных свойств, увеличения температуры эксплуатации на 50 °С.[4]

Для создания наноструктурированных покрытий используются наноструктурированные материалы, суспензии и золь-гели для внедрения в покрытия нанодобавок, которые модифицируют их структуру и обеспечивают получение требуемых свойств покрытий, структура которых целиком или частично формируется из наночастиц. Существуют различные способы формирования наноструктур: добавление в состав сплава твердой аморфной фазы, приводящее к уменьшению размеров кристаллитов и соответственно к получению наноструктурированных материалов TiAlN+Si, TiMoN+Si, TiCrN; нанесение многослойных покрытий с перемежающимися нанослоями; формирование наноструктур методом высокоскоростного распыления мозаичных катодов ; формирование наноструктур методом ионного ассистирования; Реализовать более высокий уровень адгезионных, когезионных характеристик и обеспечить высокую плотность покрытий можно за счет изменения температуры и варьирования скорости газовой струи, взаимодействующей с частицами материала покрытия.

Большинство известных газотермических методов нанесения покрытий полностью расплавляют напыляемый материал, разрушая его структуру.

Поэтому при всем многообразии технологий газотермического напыления наиболее перспективными для создания тонких прочных наноструктурированных покрытий являются высокоскоростные технологии напыления.

В условиях высоких нагрузок на режущую кромку большие преимущества при производстве режущего инструмента обеспечивают наноструктурированные покрытия. Ультрадисперсные материалы с увеличенной площадью межзеренных границ имеют более сбалансированное соотношение между твердостью, оказывающей определяющее положительное влияние на износостойкость и прочностными характеристиками материала, в том числе и в условиях действия циклических термомеханических напряжений. Известно, что первопричиной разрушения материалов стандартной (микрометрической) структуры с размерами зерен свыше  $d > 1\text{ мкм}$  является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов. В наноструктурированных материалах с размерами зерен менее  $d < 80...100\text{ нм}$  проявляется иной механизм разрушения. Для подобных материалов преобладающей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах. Материал покрытия в наноразмерных зернах практически идеален. Разрушения зерен вследствие дислокаций практически не встречаются, а если они и происходят, то они быстро и эффективно тормзятся на границах зерен. В наноматериалах наблюдается препятствование ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границзерен. [5]

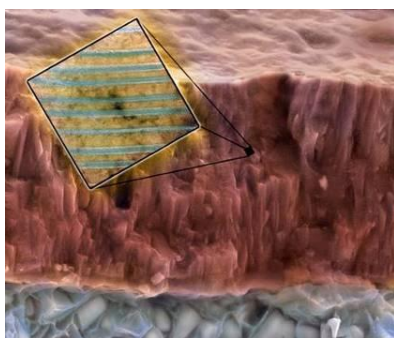


Рис 2. (Ti, Al)N

Наибольшее распространение получили покрытия (Ti, Al)N, где нанослой нитридов титана и алюминия постоянно меняются местами, создавая градиент концентрации составных элементов. Такие покрытия называют наноградиентными.

Фирма Plaitit (Швейцария) разработала двухфазные наноструктурированные покрытия с размерами зерен до 5нм, у которых основную функцию по износостойкости выполняют зерна (Al, Cr) N или (Ti, Al) N (основная нанокристаллическая фаза) на границах которых располагается вторая нанокристаллическая (или аморфная) фаза Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, сдерживающая коагуляцию зерен основной фазы как при осаждении покрытия (вакуумно-дуговая технология), так и при эксплуатации инструмента. [6]

Таким образом, создание покрытий для режущего инструмента нового поколения наиболее эффективно осуществлять при использовании инновационной концепции многослойно-композиционных архитектуры с нанометрической структурой и чередующимися слоями наноразмерной толщины различного композиционного состава и функционального назначения.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёшин Н.П. Оценка остаточного ресурса сварных конструкций // Сварка и диагностика. 2007. №2. С. 4-10.

2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003.- 576 с.

3. Трибология. И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского. Самара, 2000. 268 с.

Электронные ресурсы:

4. [http://neftegaz.ru/tech\\_library/view/4052](http://neftegaz.ru/tech_library/view/4052)

5. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2010>

6. <http://www.plaitit.com>

**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.

**Дандин Олег Владимирович** – инженер КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: spdklg@yandex.ru.

А.А. Иванов, К.А. Григорян, К.Ю. Труханов

## **ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ LTR ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ**

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

Большая часть применяемых на практике видов сварки основана на локальном концентрированном нагреве участков свариваемых изделий до температур плавления или пластического течения. При перемещении сварочного источника температура точек тела происходит изменение температуры точек тела во времени, называемое термическим циклом. Термический цикл сварки можно фиксировать с помощью термопар, установленных в определенных точках сварного соединения.

Принцип действия термопар основан на явлении Зеебека. Термопара представляет собой два тонких проводника из различных металлов, соединенных между собой на концах, например с помощью сварки. Один спай термопары помещают в точку измерения температуры, другой спай, называемый холодным, вынесен отдельно и находится при температуре окружающей среды. Разность температур между спаями приводит к возникновению термоЭДС. Для оцифровки термоЭДС используется АЦП. Диапазон измеряемых температур очень широк: от температур, близких к абсолютному нулю, до температур плавления наиболее тугоплавких металлов. В диапазонах температур до 1600 °С термопары - одно из наиболее надежных средств измерения температуры твердых металлов. При температурах выше 1600 °С термопары уступают оптическим пирометрам.

Рассмотрим применение установки LTR фирмы ЗАО «Л-КАРД» (г. Москва) для оцифровки показания хромель-алюмелевых термопар (рис. 1).

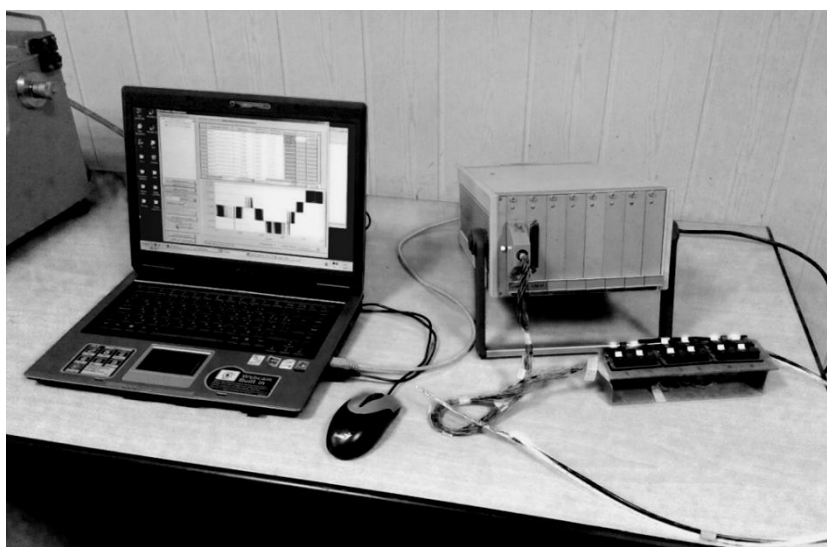


Рис 1. Измерительная система LTR



Установка LTR-EU-8 представляет собой 8-ми местный крейт с интерфейсами USB 2.0 и предназначен для установки модулей семейства LTR. Для измерения температуры используется модуль LTR27, предназначенный для измерения медленноменяющихся величин напряжения, силы тока и сопротивления.

Для построения графиков в реальном времени, записи и анализа данных используется программа LGraph2. Перед выполнением измерений необходимо провести калибровку термопар. На рисунке 2 представлен пример визуализации в реальном времени показаний термопар.

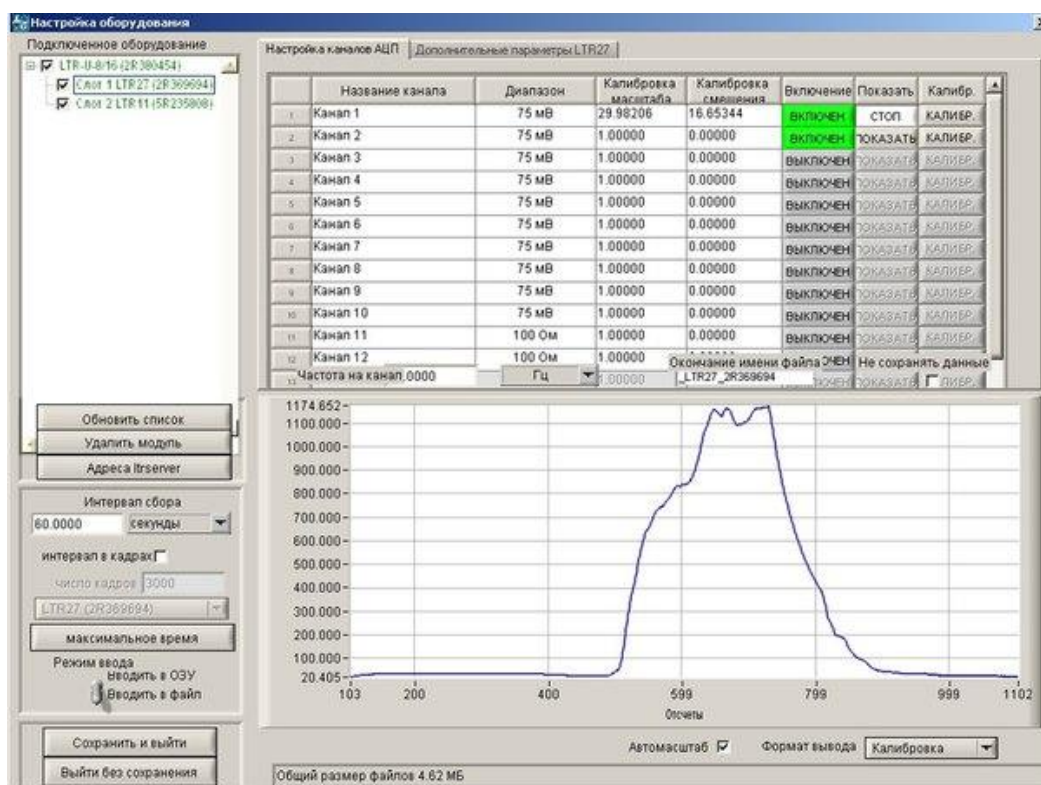


Рис. 2 Пример визуализации термического цикла в программе LGraph2

Применение установки LTR совместно с программным обеспечением LGraph2 позволяет проводить анализ и обработку полученных данных о температурных полях после эксперимента, а также визуализировать эти данные в режиме реального времени. Это позволяет расширить область применения рассмотренного оборудования для научно-исследовательской работы и учебного процесса.

### Список литературы

1. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – МЛ: Мир, 1992
2. Теория сварочных процессов: учебник / под ред. В.М. Неровного – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007
3. <http://www.lcard.ru/products/ltr/ltr-eu-8>

4. <http://www.lcard.ru/products/ltr/ltr27>

5. <http://www.lcard.ru/support/lgraph>

**Иванов Андрей Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: manly94@mail.ru.

**Григорян Карэн Артурович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chantofpaagro@gmail.com.

**Труханов Константин Юрьевич** — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

А.А. Иванов, К.А. Григорян, К.Ю. Труханов

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОПАР ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

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

Термопара является одним из наиболее распространенных промышленных инструментов измерения температур [1]. Действие термопары основано на эффекте, который впервые был открыт и описан Томасом Зеебеком в 1822 г. Наиболее правильное определение этого эффекта следующее: если однородный материал, обладающий свободными зарядами, имеет разную температуру на измерительных контактах, то между контактами возникает разность потенциалов (рис. 1). Другое определение эффекта Зеебека: возникновении тока в замкнутой цепи из двух разнородных проводников при наличии градиента температур между спаями. Поскольку генерирование ТЭДС происходит по длине термоэлектрода, то показания термопары зависят от состояния термоэлектродов в зоне максимального температурного градиента. Поэтому поверку термопар следует проводить при той же глубине погружения в среду, что и на рабочем объекте. Учет термоэлектрической неоднородности особенно важен для рабочих термопар из неблагородных металлов.

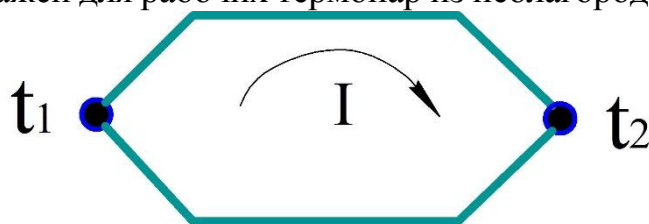


Рис. 1 Эффект Зеебека

Спай, находящийся в области измерения температуры, называется горячим, вынесенный из этой зоны спай – холодным. Для измерения термоЭДС можно использовать схемы, приведенные на рисунке 2 [2].

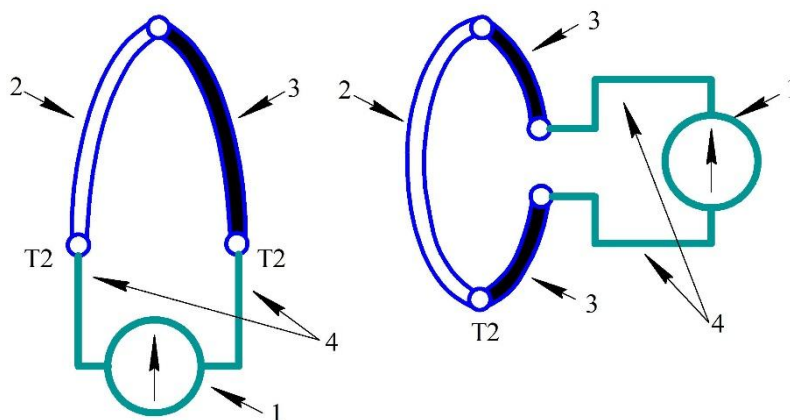


Рис. 2 Схемы измерения термоЭДС термопар

В таблице приведены наиболее распространенные типы термопар и их характеристики.

Тип	Обозначение	Состав	Температурный диапазон	
			длительно	кратковременно
К	ТХА	Никель - хром/никель - алюминий (хромель/алюмель)	0 до +1100	-180 до +1300
J	ТЖК	Железо/медь - никель (железо/константан)	0 до +700	-180 до +800
N	ТНН	Никель - хром - кремний/никель - кремний (нихросил/нисил)	0 до +1100	-270 до +1300
R	ТПП	Платина 13% + родий / родий	0 до +1600	-50 до +1700
S	ТПП	Платина - 30 % родий/платина - 6 % родий	0 до 1600	-50 до +1750
B	ТПР	Платина - 30 % родий/платина - 6 % родий	+200 до +1700	0 до +1820
T	ТМК	Медь/медь - никель (медь/константан)	-185 до +300	-250 до +400
E	ТХКн	Никель - хром/медь - никель (хромель/константан)	0 до +800	-40 до +900

В местах подключения проводников термопары к измерительной системе возникают дополнительные термоЭДС. В результате их действия на вход измерительной системы фактически поступает сумма сигналов от рабочей термопары и от термопар, возникших в местах подключения (рис. 3).

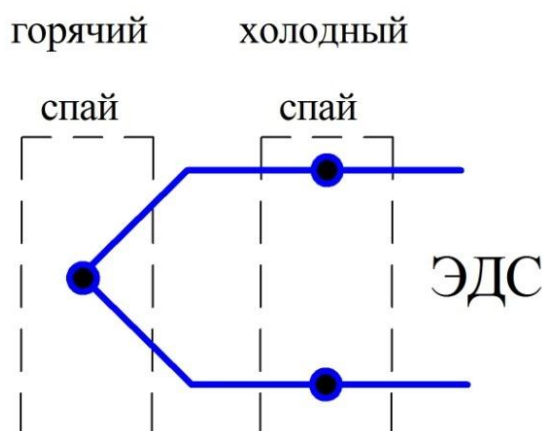


Рис 3. Схема присоединения термопары к измерительной системе

Для решения этой проблемы используется техника «компенсации холодного спая»: температура холодного спая измеряется другим датчиком

температуры, а затем величина термоЭДС холодного спая программно или аппаратно вычитается из сигнала термопары (рис. 4).

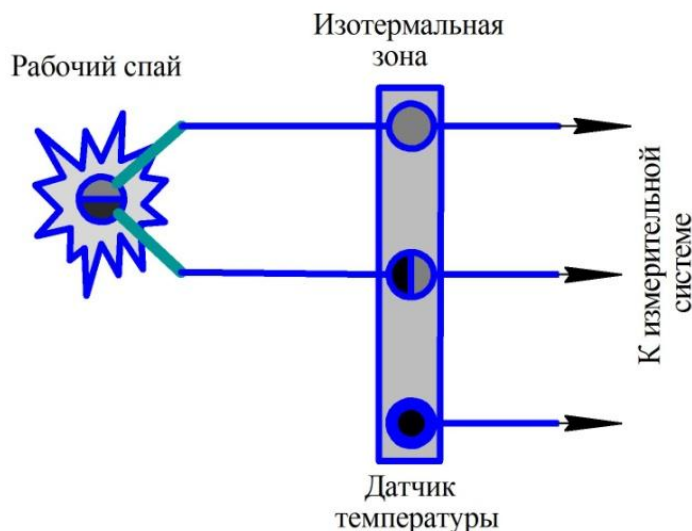


Рис. 4. Компенсация холодного спая

Генерируемая термоЭДС определяется разностью температур спаев и зависит от материала пары проводников:

$$\text{термоЭДС} = F(\Delta t),$$

где  $F(\Delta t)$  – градуировочная функция.

Градуировочные функции для различных типов термопар, определяемых комбинацией материалов проводников, описаны в нормативной документации [3]. Так же эти зависимости аппроксимированы с помощью полиномов. Например, для термопары типа К и температур свыше  $0^\circ\text{C}$  полином выглядит следующим образом:

$$E = \sum_{i=0}^9 A_i \times t^i + C_0 \times e^{C_1(t-126,9686)^2},$$

где  $A_0 = -1,7600413686 \cdot 10^{-2}$ ,  $A_1 = 3,89212049975 \cdot 10^{-2}$ ,  $A_2 = 1,8558770032 \cdot 10^{-5}$ ,

$A_3 = -9,94575929 \cdot 10^{-8}$ ,  $A_4 = 3,18409457 \cdot 10^{-10}$ ,  $A_5 = -5,60728449 \cdot 10^{-13}$ ,  $A_6 = 5,607506 \cdot 10^{-16}$ ,

$A_7 = -3,2020720003 \cdot 10^{-19}$ ,  $A_8 = 9,7151147152 \cdot 10^{-23}$ ,  $A_9 = -1,2104721275 \cdot 10^{-26}$ ,  $C_0 = 0,1185976$ ,

$C_1 = -1,183432 \cdot 10^{-4}$ .

*Преимущества термопар:*

- широкий диапазон рабочих температур,
- простота изготовления, надежность и прочность конструкции.

*Недостатки термопар:*

- необходимость контроля температуры холодных спаев,
- возникновение термоэлектрической неоднородности в проводниках и, как следствие, изменение градуировочной характеристики из-за изменения состава сплава в результате коррозии и других химических процессов.

Термопары широко применяют для измерения температуры различных объектов, а также в автоматизированных системах управления и кон-

троля. Измерение температур с помощью термопар получило широкое распространение из-за надежной конструкции датчика, возможности работать в широком диапазоне температур и дешевизны. К числу достоинств термопар относятся также малая инерционность, возможность измерения малых разностей температур. Термопары незаменимы при измерении высоких температур (вплоть до 2200 °С) в агрессивных средах. Термопары могут обеспечивать высокую точность измерения температуры на уровне  $\pm 0,01$  °С.

Для оцифровки термоЭДС термопар применяется АЦП. Пример термических циклов для случая аргонодугового нагрева тонколистовой нержавеющей стали приведен на рисунке 4. Измерения выполнялись с помощью хромель-алюмелевых термопар.

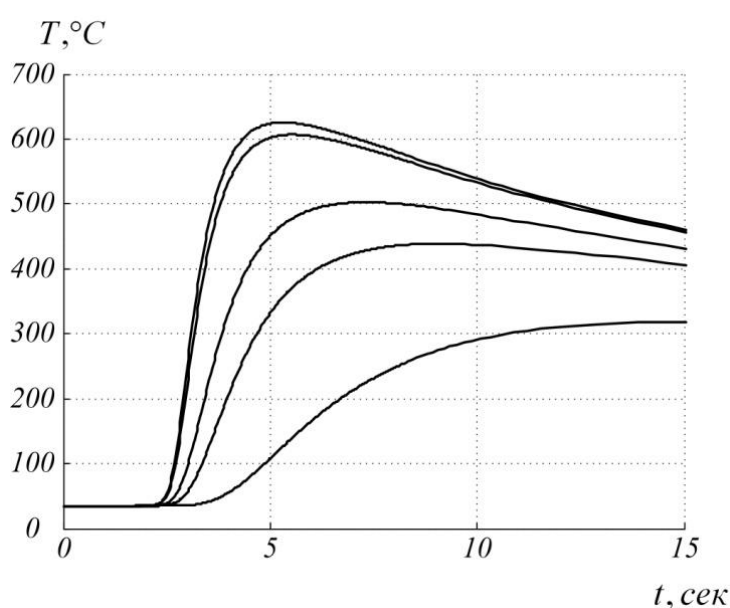


Рис. 4. Пример термических циклов

Простота, универсальность и широкий температурный диапазон работы термопар позволяет применять их для исследования сварочных процессов.

#### Список литературы

1. Теория сварочных процессов: учебник / под ред. В.М. Неровного – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 200
2. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – МЛ: Мир, 1992
3. ГОСТ Р 8.585-2001 ГСИ

**Иванов Андрей Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: manly94@mail.ru.

**Григорян Карэн Артурович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chantofpaagro@gmail.com.

**Труханов Константин Юрьевич** — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

Д.А. Ткачев, Н.Н. Максимов

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕДИ И ЛАТУНИ**

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

В электротехнической промышленности при соединении различных проводников и токоведущих элементов изготовленных, обычно, из меди, латуни и других высокотеплоэлектропроводных материалов часто требуется получить неразъемные соединения. Для этого обычно используют пайку. Внедрение более эффективного способа – сварки (в частности контактной) затруднительно. Связано это с тем, что теплофизические свойства этих материалов мало отличаются от свойств электродов для контактной сварки, изготавливаемых из низколегированных бронз [1]. Типовая система легирования для таких материалов выглядит так: 1-3% никеля, хрома и других элементов. Сходная электропроводность свариваемых материалов и материалов электродов препятствует тепловыделению необходимому для формирования сварного соединения, а зачастую приводит к привариванию электрода к детали. Для повышения тепловыделения применяют высокоомные прокладки в контакте деталь – деталь, повышающие тепловыделение и (или) тепловые экраны из жаропрочных материалов или вольфрама и молибдена, снижающие теплоотвод из зоны соединения.

В КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана технология контактной точечной сварки обмоток торцевых асинхронных двигателей, выполненных из тонколистовой меди, электродами с вольфрамовыми вставками. На базе физико-математической модели методом конечных разностей были рассчитаны электротепловые поля в зоне соединения. Результаты показали, что вольфрамовые вставки являются не столько тепловыми экранами, сколько источником тепла, поставляемого из тела разогретых сварочным током вставок (с наибольшей изотермой порядка 2300 °С) в менее нагретую зону соединения медных деталей с изотермой плавления 1083 °С.

Однако расширение номенклатуры свариваемых деталей и материалов потребовало коррекции разработанной технологии. Так на ОАО «КЗАЭ» требуется соединять концы медных проводов, шинных проводов, состоящих из медных жил диаметром 0,1-0,2 мм с различными концевыми элементами из латуни Л63 [2].

При этом для формирования соединений используют промежуточные прокладки из никелевого сплава, которые размещают в контакте между медными проводниками и латунными деталями. Данный прием позволяет получать неразъемное соединение вследствие расплавления никелевого сплава при нагреве сварочным током в медных электродах контактной машины.

Исключить применение промежуточной вставки возможно, если использовать электроды с вольфрамовыми вставками. Но различие в теплофизических свойствах меди М1 и латуни Л63 [3] (см. табл. 1) требует применения технологических приемов, нивелирующих эти различия.

Таблица 1. Физические свойства меди М1 и латуни Л63

Характеристика	Медь М1	Латунь Л63
Удельное сопротивление, мкОм·м	0,0171	0,065
Температура плавления, °С	1083	906
Теплопроводность, Вт/м·°С	390	106

Основываясь на созданной физико-математической модели и результатах электротеплового расчета, было решено применить коррекцию плотностей тока в электродных вставках для регулирования температуры нагрева за счет изменения плотностей тока во вставках, т.е. их диаметра. Для регулирования теплоотода и деформационных процессов применен составной электрод со стороны латунной детали. Конструкция составного электрода представляет собой вольфрамовую вставку, закрепленную в медном электроде контактной машины и втулку из стали Х18Н10Т, расположенную по внешней образующей вставки (см. рис. 1).

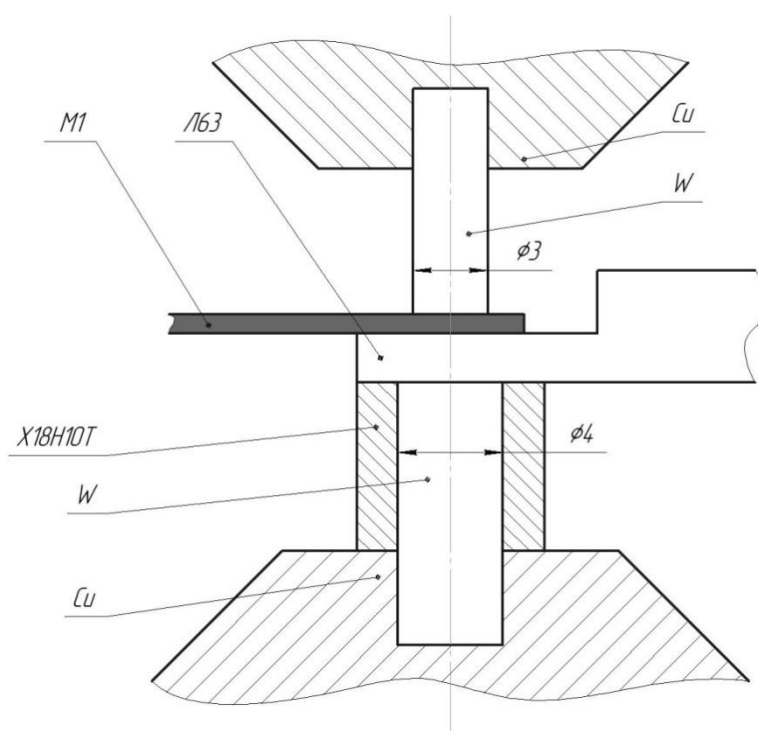


Рисунок 1. Схема контактной сварки высокотеплоэлектропроводных материалов вольфрамовыми электродами.

Со стороны медного многожильного шинного провода  $\varnothing 1,2$  мм была использована вольфрамовая вставка диаметром 3 мм и длиной 5 мм, со



стороны латунной детали толщиной 0,8 мм для снижения плотности тока и температуры была применена вольфрамовая вставка диаметром 4 мм с внешней втулкой из стали X18H10T с наружным диаметром 7 мм. Применение втулки из высокоомного материала позволило снизить удельное давление в контакте электрод-латунная деталь, что способствовало выравниванию термомодеформационных процессов в зоне соединения за счет нагрева меди М1 и латуни Л63 до температуры плавления в зоне их контакта. При визуальном контроле наблюдается равномерное смачивание расплавленной латуни отдельных проводников шинного провода не только в контакте деталь-деталь, но и под вольфрамовой вставкой. В то же время детали из латуни не изменили своих геометрических размеров, и их деформация не превысила допустимую. Наличие смачивания латуни поверхностей проводников шинного провода, расположенных даже в контакте вставка-деталь позволяет визуально контролировать качество сварных соединений.

Применение представленной технологии дает значительный экономический эффект за счет исключения операции размещения прокладки из никелевого сплава в контакте деталь-деталь и затрат на его приобретение.

#### **Список литературы.**

[1] Климов А.С., Смирнов И.В., ред. *Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки*. Санкт-Петербург, Лань, 2011, 336 с.

[2] Гладков Э. А., Киселев О. Н., ред. *Робототехнические комплексы для дуговой и контактной сварки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 107 с.

[3] *Марочник сталей и сплавов*. Москва, 2014, 1216 с.

**Ткачев Дмитрий Анатольевич** — ассистент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tkachoff88@mail.ru.

**Максимов Николай Николаевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.

А.В. Царьков, В.В. Дьячук, С.В. Клещев

## **СОПОСТАВЛЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ В ОБЛАСТИ НАПЛАВКИ СВАРКОЙ**

КФМГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время технологии сварки являются одним из двух широко распространенных способов восстановления работоспособности магистральных газопроводов, в частности при заварке удаленных механическим способом коррозионных дефектов. Технология подготовки и заварки таких дефектов подробно изложена в руководящих материалах ОАО «Газпром» [1]. Вместе с тем вопрос испытания качества наплавки отдельно в этом документе не рассматривается. Фактически он объединен с методом испытания сварных соединений. Нам представляется такой подход не вполне логичным, т.к. процесс наплавки имеет значительные отличия от процесса сварки как по технологии выполнения, так и по своим целевым функциям.

Учитывая все возрастающие объемы наплавки в промышленности, международный институт сварки подготовил проект специального документа - ИСО 15614-7 [2], направленного на стандартизацию процедуры испытаний технологии наплавки. По-видимому, в ближайшее время этот документ будет принят большинством стран, входящим в МИС. Цель этой статьи дать краткий анализ предлагаемого документа и сопоставление со стандартом ОАО «Газпрома».

Если брать укрупнено, то стандарт состоит из трех основных частей: форма и размеры стандартных образцов; процедура испытания; область распространения проведенных испытаний. В качестве стандартных предлагается пять видов образцов (смотри рис. 1, 2), один для пластины и четыре для трубы. Такое количество образцов для труб вполне объяснимо принципиальным отличием кольцевой и продольной наплавки как с точки зрения технологии, так и с точки зрения напряженно-деформированного состояния наплавленного образца. Несомненно, что и расположение швов внутри или наружи, так же оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства наплавки.

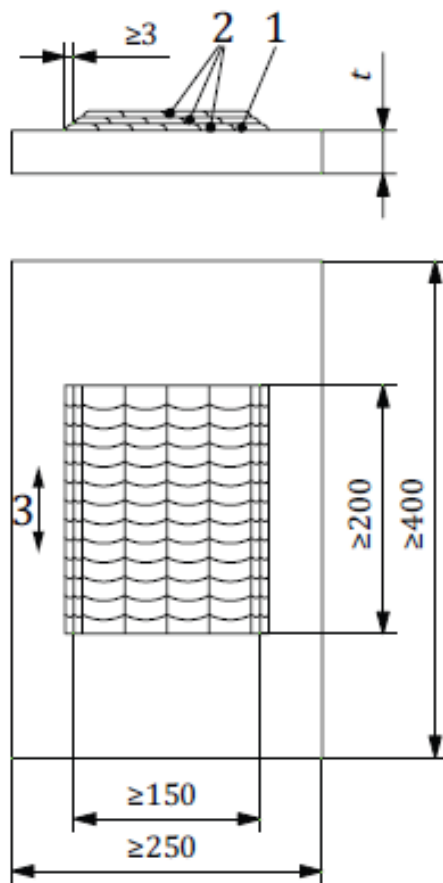


Рис. 1 Образец для испытания - пластина

1 - промежуточный слой (если необходимо); 2 - количество проходов (слоев) в соответствии технологической картой или толщина наплавки; 3 - направление наплавки; 4 - толщина основного металла.

Рассматривая методы испытания образцов (табл. 1), авторы стандарта учитывают целевое назначение наплавки - защита от коррозии или упрочнение поверхности. В первом случае предлагается восемь видов испытаний, во втором - четыре. Такое отличие в количестве испытаний объясняется различием требований, предъявляемых к наплавленным слоям. Хочется особо отметить, что в стандарте ИСО, в отличие от инструкции Газпрома, практически отсутствуют испытания на исследование механических свойств наплавленных образцов, характерные для испытаний сварных соединений. По-видимому, это объясняется универсальным характером разработанного ИСО стандарта, не учитывающего специфику объекта, для которого используется наплавка. Инструкция Газпрома больше направлена на предупреждение механического разрушения в месте выполнения наплавки. Этим объясняется наличие в документе требований к выполнению большого количества механических испытаний (не менее 11 образцов для испытаний на статическое растяжение, на статический изгиб, на ударный изгиб, на излом с надрезом, на твердость).

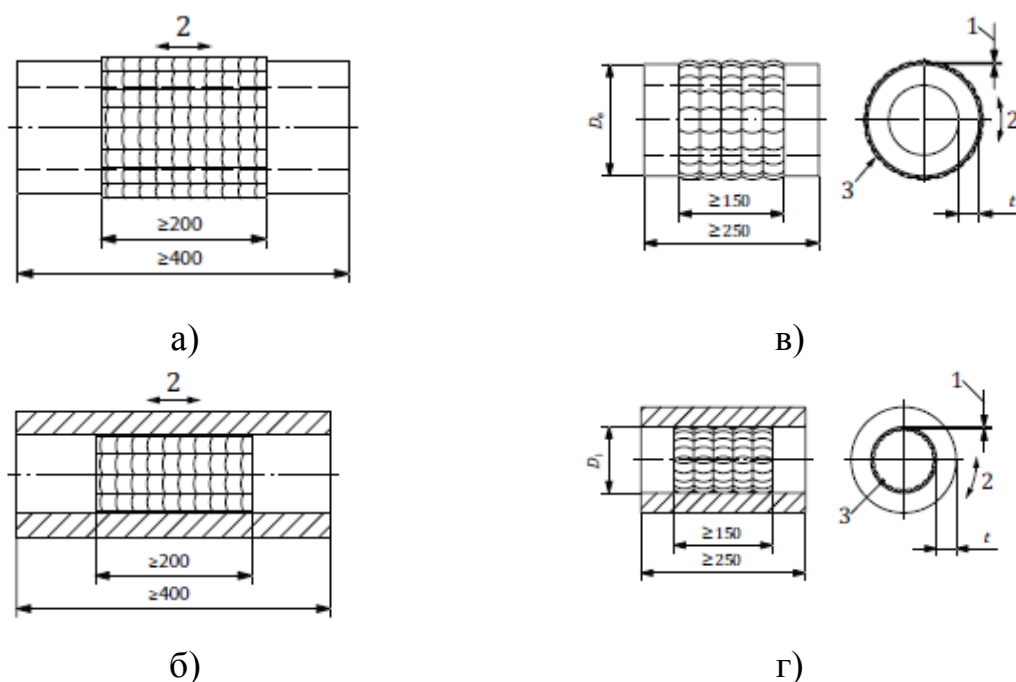


Рис. 2 Образец для испытания - труба

- а) - наплавка продольными швами на внешней поверхности;
- б) - наплавка продольными швами на внутренней поверхности;
- в) - наплавка кольцевыми швами на внешней поверхности;
- г) - наплавка кольцевыми швами на внутренней поверхности;
- 1 - промежуточный слой (если необходимо); 2 - направление наплавки;
- 3 - количество проходов (слоев) в соответствии технологической карты или толщина наплавки.

Таблица 1. Исследование и испытания контрольных образцов

Назначение наплавки	Вид испытаний	Объем испытаний
Наплавка антикоррозионного покрытия	визуальный контроль; УЗК контроль; цветной контроль; испытания на изгиб; исследование макроструктуры; химический анализ; исследование на $\delta$ -феррит; испытания на твердость	100% 100% 100% 2 образца 1 образец 1 образец 1 образец 1 обследование
Поверхностное упрочнение	визуальный контроль; цветной контроль; изучение макроструктуры; испытания на твердость.	100% 100% 1 образец 1 обследование

Имеет место отличие и в подготовке контрольных образцов (рис. 3, 4).

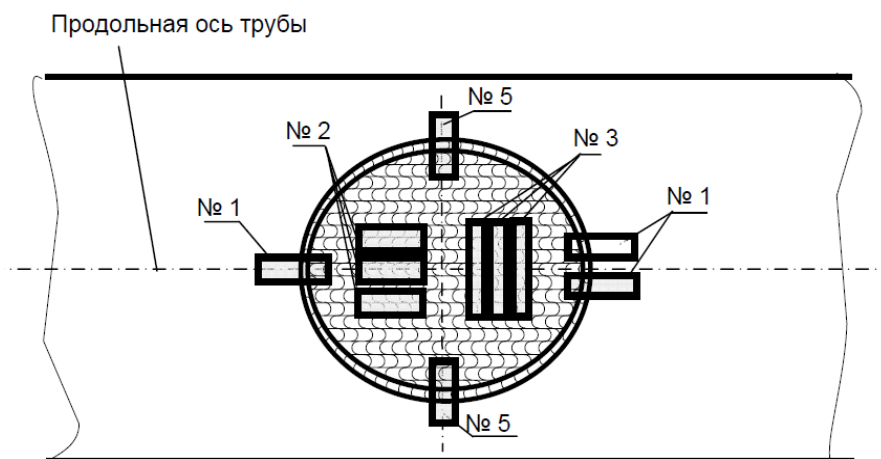


Рис. 3 Схема вырезки образцов согласно инструкции ООО «Газпром»  
 №1 – образцы на статическое растяжение; №2 – образцы на статический изгиб; №3 – образцы на ударный изгиб; №5 – образцы для определения твердости

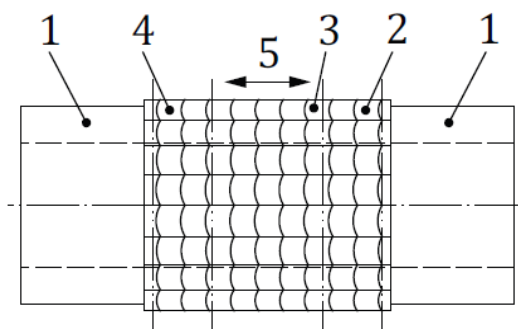


Рис. 4 Вырезка контрольных образцов согласно ИСО  
 1 - участок образца длиной не менее 25 мм; 2, 4 – образцы для испытания на изгиб; 3- участок вырезки образцов для изучения макроструктуры, химического состава (включая определение  $\delta$ -феррита), твердости; 5- направление сварки.

Таким образом, краткое сравнение двух нормативных документов позволяет сделать вывод о значительном различии в подходах к оценке качества наплавки. Если в инструкции Газпрома большее внимание уделяется механическим испытаниям, то в стандарте ИСО – металлографическим. Учитывая процесс постепенной унификации отечественных и зарубежных (в первую очередь европейских) нормативных документов, можно сделать следующий вывод.

Вывод. Необходима переработка и подготовка нового нормативного документа по оценке качества наплавки при ремонте магистральных газопроводов, учитывающего подходы действующих международных стандартов и специфику процесса наплавки как самостоятельного процесса.

### Список литературы

1. СТО Газпром «Инструкция по технологиям сварке при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов», часть 2, 2007 г.
2. ISO/FDIS 15614-7, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 7: Overlay welding, 2015.

**Царьков Андрей Васильевич**— д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.

**Дьячук Виктор Васильевич** – директор ООО "Энергопрогресс". E-mail: kalygennergoprogress@yandex.ru.

**Клещев Сергей Владимирович** –эксперт по газовому оборудованию ООО "Энергопрогресс". E-mail: kie-tanya@mail.ru.

Т.М. Хохлов, А.С. Трунков, К.Ю. Труханов

## **УСТРОЙСТВО И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ЛТ-400И**

КФМГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Лазерная резка является современным и высокотехнологичным способом резки материалов [1, 2]. Его преимуществом является:

1. неподвижные оптический резак и излучатель позволяют добиться высокой точности и скорости юстировки луча лазера и сохранять ее продолжительное время,
2. кратчайшее расстояние между неподвижным излучателем и неподвижным резаком позволяют создать надежную защиту луча от грязи и обслуживающего персонала от воздействия излучения,
3. перемещение заготовки, а не лазерного резака позволяет организовать эффективный отсос газов и продуктов реза из зоны обработки, что значительно улучшает экологию окружающей среды,
4. малая занимаемая площадь,
5. отсутствие потребности в газах ( $\text{CO}_2$ : гелия и азота),
6. простота обслуживания и юстировки оптики лазера.

Для резки используются твердотельные, газовые, полупроводниковые и жидкостные лазеры, с различными типами рабочего тела.

Рассмотрим устройство установки лазерной резки ЛТ-400И (ООО «НПФ ТЕЛАР», г. Тула), представленной на рисунке 1. Данная установка оснащена твердотельным импульсным лазером. В качестве рабочего тела используется алюмо-иттриевый гранат с легированием неодимом (Nd:YAG) [3]. Данный тип лазера является одним из самых распространённых лазеров высокой мощности.



Рис. 1 Установка лазерной резки ЛТ-400И

На рисунке 2 представлена схема установки [4]. Лазер твердотельный импульсный типа ЛТ-400 И (1), установлен на балке (3). Координатный стол (2), предназначен для применения в лазерных комплексах для точного трехмерного позиционирования при раскрое и сварке материалов, выполнении отверстий и гравировки. Двухканальный импульсный источник питания лазера ИПЛ-2-600И (4) с максимальной средней электрической мощностью, выделяемой в лампе каждого канала, 6000 Вт предназначен для синхронного формирования импульсов тока (разрядных импульсов) в лампах накачки твердотельного технологического лазера и управления режимами его работы. Система охлаждения (5) обеспечивает отвод тепла до 14 кВт при температуре, подаваемой в излучатель охлаждающей жидкости +14...+18 °С при давлении в трубопроводах не менее 2 атмосфер.

Система охлаждения представляет двухконтурное принудительное охлаждение:

1. внутренний контур – охлаждение активных элементов и ламп накачки двух квантронов отдельно (контур замкнутый, объем хладагента постоянен и расход его 30...35 л/мин, хладагент – дистиллированная вода ГОСТ 6709);
2. наружный контур – охлаждение хладагента.

Для введения в эксплуатацию модуля ЛТ необходимо установить излучатель на оборудовании с ЧПУ, обеспечивающее подачу по трем координатам стола с технологическими деталями под обработку или подачу по трем координатам самого излучателя (вариант для обработки крупногабаритных деталей). Канал охлаждения (6). Канал связи/управления (7).

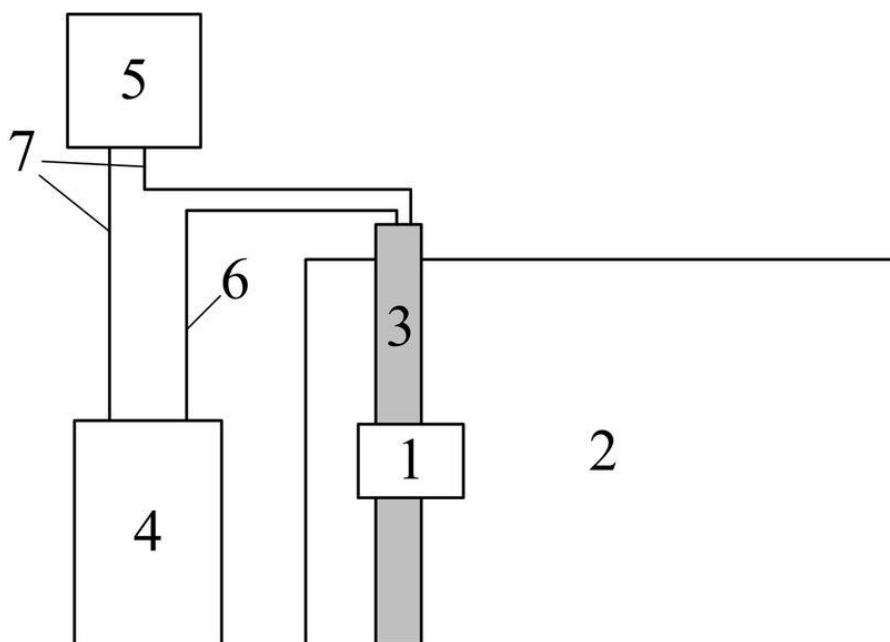


Рис. 2 Установка лазерной резки ЛТ-400И

Рабочее помещение должно быть снабжено вентиляционной установкой и содержаться в чистоте во избежание попадания внешней пыли на из-



лучатель. Основные технические и эксплуатационные характеристики установки приведены в таблице.

Таблица 1. Технические и эксплуатационные характеристики установки

Параметр, единица измерения	Величина
Габаритные размеры: координатного стола, мм блока охлаждения, мм источник питания, мм	3600×2152×1450 2090×850×1275 730×550×900
Мощность лазерного излучения, Вт не менее не более	380 450
Размеры рабочей зоны, мм	2500×1250×100
Диаметр пучка лазерного излучения по уровню 0,86, мм, не более	6 ± 0,5
Диаметр сфокусированного лазерного пятна в плоскости резания, мм, не более	0,3
Частота следования импульса, Гц	1300
Длительность импульса тока по уровню 0,35 от типового значения, мс	0,2-0,6
Толщина различных листовых материалов: легированная тугоплавкая сталь, мм инструментальная и углеродистая сталь, мм нержавеющая сталь, мм алюминиевые сплавы, мм неметаллы, мм	до 5 до 5 до 5 до 3 до 3
Расход охлаждающей жидкости (дистиллированной воды по внутреннему контуру), л/мин	30...35
Температура охлаждающей жидкости не более, °С	+30
Оптимальная температура охлаждающей жидкости, °С	+14...+18
Время готовности излучения не более, часа	0,5
Среднее время непрерывной работы, часов	5 ± 0,5
Средняя суточная наработка, часов	16 ± 0,5
Наработка на отказ не менее, часов	100
Средний ресурс не менее, часов	10000

Применение лазерных технологий позволяет существенно повысить точность обработки, исключить последующую механическую обработку,

расширить диапазон обрабатываемых материалов. Однако, сложность оборудования повышает требования к квалификации наладчиков и операторов установки.

#### **Список литературы**

1. Nd:YAG-лазер URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG-лазер>
2. Кербера Г. Промышленное применение лазеров: Пер. с англ. М., Машиностроение, 1988, 280 с.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 664 с.
4. Паспорт. Лазер твердотельный импульсный типа ЛТ-400И

**Хохлов Тимофей Михайлович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

E-mail: tima4545@yandex.ru.

**Трунков Анатолий Сергеевич** — ст. преп.КФМГТУим. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru.

**ТрухановКонстантинЮрьевич** — ассистентКФМГТУим. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

## **СЕКЦИЯ 3.**

# **ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Йе Еинт Ко Ко, С.М. Твердова

## АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Увеличение оптической мощности полупроводниковых лазерных диодов в настоящее время является одной из основных задач на пути к расширению областей их применения. Наибольший уровень сложности эта проблема приобретает при непрерывном режиме работы полупроводниковых лазеров. Рассмотрим некоторые характеристики полупроводниковых лазерных диодов.

**Ватт-амперная характеристика (ВтАХ)** – зависимость мощности излучения  $P_{\text{вых}}$  от тока накачки. Ватт-амперная характеристика является одной из наиболее важных характеристик лазеров [1].

Мощность излучения инжекционного лазерного диода в ваттах

$$P_{\text{вых}} = \left( \frac{\hbar\omega}{e} \right) f(\beta_{\Sigma}, L, r) (i_n - i_{\text{нор}}) \eta_0 \quad (1)$$

где  $\left( \frac{\hbar\omega}{e} \right) \approx U_0 - U_{pn}$ ;  $f(\beta_{\Sigma}, L, r) \approx \left[ 1 + \frac{\beta_{\Sigma} L}{\ln(1/r)} \right]^{-1}$ ;  $\eta_0 \approx 0,6 \dots 0,9$ ;  $U_0$  – внешнее напряжение;  $U_{pn}$  – напряжение на p-n переходе;  $\hbar\omega$  – энергия фотонов, доминирующая в спектре излучения;  $\beta_{\Sigma}$  – потери излучения суммарные;  $L$  – длина резонатора,  $r$  – эффективный коэффициент отражения зеркал резонатора;  $i_{\text{нор}}$  – пороговый ток инжекции носителей заряда;  $\eta_0$  – внутренний квантовый выход.

Значение порогового тока накачки  $i_{\text{нор}}$  определяется через плотность тока  $j$  и площадь  $s$  поверхности активного слоя кристалла [2].

$$i_{\text{нор}} = j_{\text{нор}} s \quad (2)$$

где  $j_{\text{нор}} = \left[ \beta_{\Sigma} + \frac{\ln(1/r)}{(G_{\text{нор}})} \right] \frac{A}{\text{см}^2}$  – пороговая плотность тока;  $U_{pn} = U_0 \rightarrow \frac{\hbar\omega}{e}$  – среднее значение напряжения на p-n переходе. При превышении порогового значения тока ( $i_n > i_{\text{нор}}$ ) наступает лазерный эффект, генерируемая оптическая мощность резко возрастает, излучение становится вынужденным.

На рисунке 1 показана типичная зависимость выходной мощности на диоде от тока для GaAlAs/GaAs полоскового лазера с волноводным усилением при ширине полоски около 10 мкм. При уменьшении ширины полоски лазерный порог таких приборов становится «мягче», т. е. выходная

мощность остаётся пропорциональной спонтанному излучению. Это приводит к уширению отдельных лазерных мод.

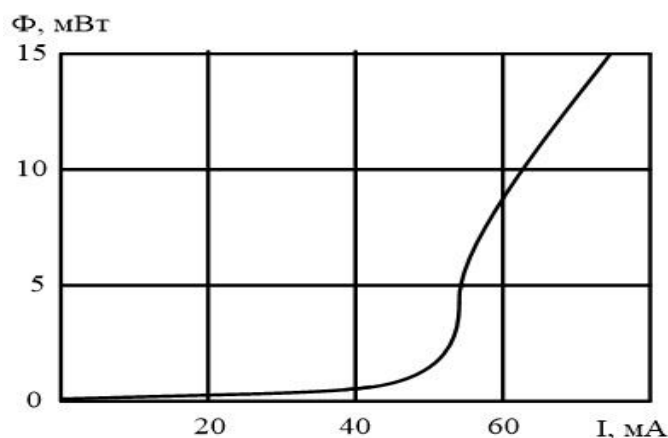


Рисунок 1. Ватт-амперная характеристика для типичного полоскового лазера с волноводным усилением при  $l = 130$  мкм и  $\omega = 12$  мкм

Показанные на рисунке 2 перегибы характерны для лазеров с волноводным усилением при ширине полоски 10...20 мкм. Эти перегибы становятся серьёзной помехой, когда требуется высокая линейность, затрудняют работу в импульсном режиме и делают невозможной работу в аналоговом режиме.

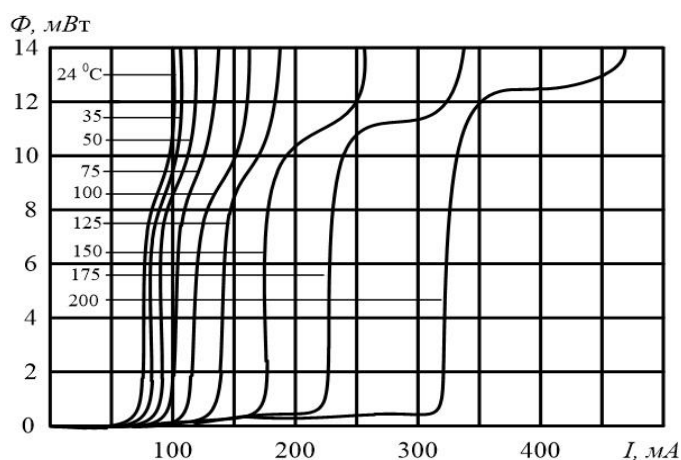


Рисунок 2. Ватт амперная характеристика полупроводникового ЛД при различных значениях температуры

**Спектральная характеристика** – зависимость мощности излучения от длины волны; определяется током накачки. Основное воздействие на спектральные характеристики оказывает число возбужденных продольных мод. При узкой полоске в лазерах с волноводным усилением обычно возбуждается много мод и наблюдается довольно широкая линия генерации. Это показано на рисунке 3, а. В лазерах с волноводным каналом сразу за порогом генерируется несколько лазерных мод, но по мере увеличения то-

ка одна или две моды становятся доминирующими над остальными, как показано на рисунке 3, б.

Уменьшение длины резонатора приводит к возрастанию межмодового расстояния, так что только немногие моды могут попасть в пределы линии усиления. По этой причине предпочтительнее короткие резонаторы (не более 100 мкм). Они дают возможность работать с одной продольной модой при более высокой выходной мощности. Ширина спектральной линии отдельной моды менее 0,01 нм.

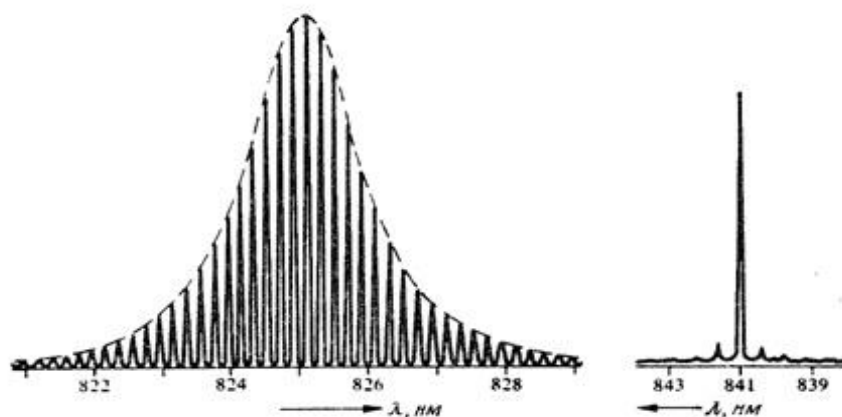


Рисунок 3. Типичный спектр GaAlAs/GaAs лазера: (а) лазер с волноводным усилением; (б) лазер с волноводным каналом

Расстояние между соседними типами колебаний (модами) равно

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 / (2N_{эф}L) \quad (3)$$

где  $N_{эф} = n - \lambda_0 (\partial n / \partial \lambda)$  – эффективный показатель преломления,  $(\partial n / \partial \lambda)$  – градиент показателя преломления.

При малых токах (меньше порогового) излучение, возникающее в основном из-за самопроизвольной рекомбинации, является некогерентным. Поэтому спектральная характеристика получается широкой, т. е. ЛД работает как светоизлучающий диод (СИД). При больших токах (больше порогового) интенсивность излучения значительно больше, так как излучение получается когерентным и строго направленным [3].

**Частотная характеристика** – зависимость значения амплитуды импульса оптического излучения от частоты модуляции. В большинстве типов лазеров, кроме лазеров с очень узкой полоской, зависимость глубины модуляции от частоты имеет резонансный характер. Как видно из рисунка 4 величина резонансной частоты меняется с изменением тока накачки, но остаётся в районе 0,2 ... 2,0 ГГц [4]. Резонансный характер объясняется тем, что рост концентрации носителей в активной области, вызванный увеличением модулирующего тока, происходит с некоторой задержкой.

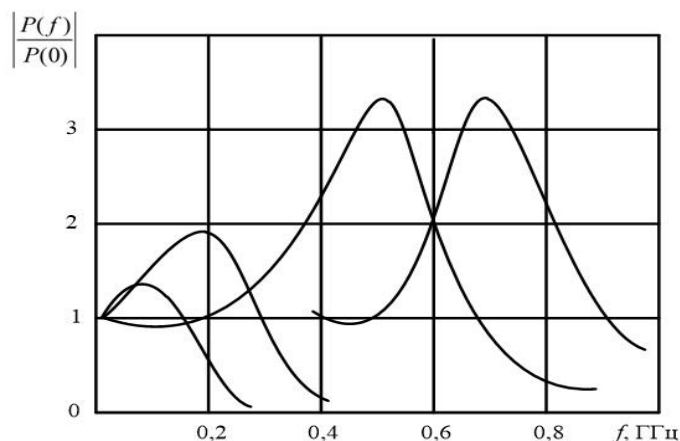


Рисунок 4. Типичная зависимость мощности модулированного оптического излучения от частоты модуляции

Происхождение лазерного резонанса можно объяснить следующим образом. Повышение концентрации вызывает рост рекомбинационного излучения, которое, опять с задержкой, увеличивает индуцированную рекомбинацию, что приводит к падению концентрации носителей. Наличие задержек приводит к переходу через равновесное состояние и процесс становится колебательным – явление электро-фотонного резонанса.

#### Библиографический список

- [1] Елисеев П.Г. *Введение в физику инжекционных лазеров*. Москва, Изд-во Главная редакция физико-математической литературы, 1983, 269 с.
- [2] Байбородин Ю.В. *Основы лазерной техники*. 2-е изд. Киев, Изд-во Выща школа, 1988, 269 с.
- [3] Пасынков В.В., Чиркин Л.К. *Полупроводниковые приборы*. 5-е изд. Санкт-Петербург, Изд-во Лань, 2001, 377 с.
- [4] Gowar J. *Optical communication systems*. PrenticeHall, 1993, 300 p.

**Йе Еинт Ко Ко** — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ueyintkoko49@gmail.com.

**Твердова Светлана Михайловна** – преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivalug@rambler.ru.

Н.Н. Чернова, В.В. Андреев

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДОВ

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

В настоящее время кремниевые фотодиоды широко используются для регистрации различных видов излучений, в дымовых пожарных извещателях и других электронных приборах для преобразования излучения в электрический сигнал. Одним из важнейших параметров фотодиода является емкость фоточувствительного элемента. Ее величина зависит от качества исходных кремниевых пластин и технологии изготовления кристалла.

Данная работа посвящена исследованию влияния параметров исходной кремниевой пластины на характеристики фотодиодов, такие как емкость фоточувствительного элемента и величина темнового тока фотодиода.

При различных параметрах кремниевой пластины ёмкость фоточувствительного элемента изменяется в широких пределах. Годными считаются фотодиоды с ёмкостью от 120 пФ до 148 пФ при обратном смещении р-п перехода 20 В.

Теоретические значения ёмкости фоточувствительного элемента можно рассчитать с использованием следующей формулы [1,2]:

$$C = S \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0 N}{2(\phi_{\text{кон}} + U)}}, \quad (1)$$

где  $N$  – концентрация примеси в полупроводниковой подложке;  $S$  – площадь фоточувствительного элемента (для исследуемых образцов составляла  $=1,408 \text{ см}^2$ );  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $\epsilon=11,7$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см – электрическая постоянная;  $\phi_{\text{кон}}$  – контактная разность потенциалов (в нашем случае 0,7 В);  $U$  – напряжение смещения (при измерениях составляла 20 В).

Результаты измерений ёмкости фоточувствительного элемента для различных значений удельного сопротивления исходной кремниевой пластины приведены в таблице 1. Ёмкость, полученная экспериментальным методом, подтвердила теоретические данные. Значение величины темнового тока фотодиода при температуре  $T=+85^\circ\text{C}$  не должно превышать 1000 мкА. Измерения, проведенные на исследуемых полупроводниковых пластинах, показали, что темновой ток фотодиодов лежит в пределах от 10 мкА до 100 мкА, что полностью соответствует норме. Полученная зависимость ёмкости фоточувствительной площадки фотодиода от удельного сопротивления исходных структур (рис.1) позволяет выбрать необходимые для изготовления качественных фотодиодов исходные кремниевые пластины и тем самым повысить выход годных кристаллов.



Таблица 1. Влияние параметров исходных кремниевых пластин на ёмкости фоточувствительного элемента

Удельное сопротивление, Ом/см	Концентрация примеси в кремниевой пластине, см <sup>-3</sup>	Ёмкость, пФ
6000	$2,20 \cdot 10^{12}$	146
7000	$1,90 \cdot 10^{12}$	136
8000	$1,70 \cdot 10^{12}$	128
9000	$1,50 \cdot 10^{12}$	121
10000	$1,30 \cdot 10^{12}$	112
12000	$1,10 \cdot 10^{12}$	103
14000	$9,50 \cdot 10^{11}$	96
16000	$8,30 \cdot 10^{11}$	89,7
18000	$7,40 \cdot 10^{11}$	84,7
20000	$6,60 \cdot 10^{11}$	80
22000	$6,00 \cdot 10^{11}$	76,3

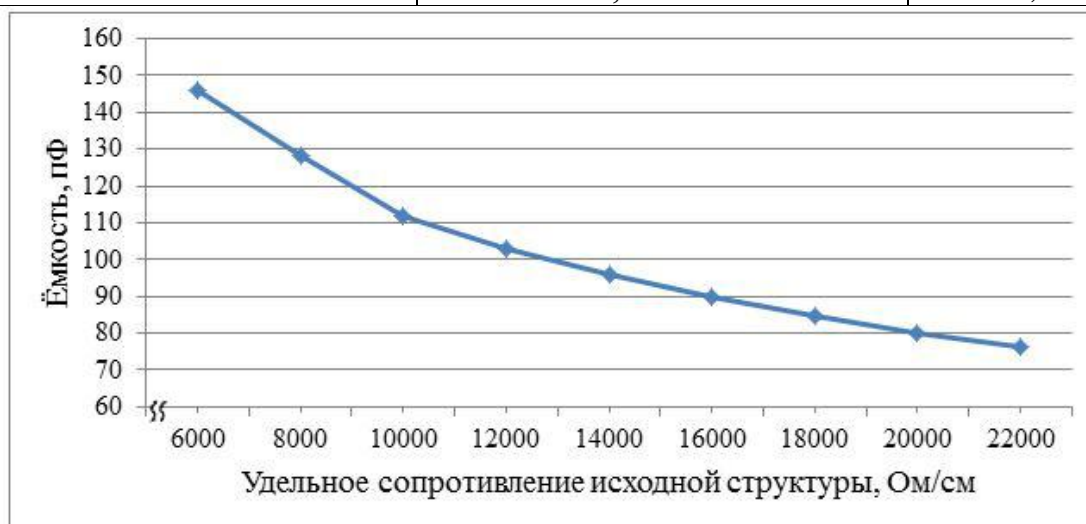


Рис.1. Зависимость ёмкости фотодиода от удельного сопротивления исходной структуры

Результаты работы были использованы для оптимизации технологического процесса изготовления кристаллов фотодиодов на ОАО «Восход» - Калужский радиоламповый завод.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зи С.М. *Физика полупроводниковых приборов*: в 2-х кн. Кн.1/ Пер. с англ. Под ред. Р.А.Суриса. - М.: Мир, 1984. - 456 с.
- [2] 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.

**Чернова Наталья Николаевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nataly\_mrr@gmail.com.

**Андреев Владимир Викторович** – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

Аунг Пьо

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CDS-CDTE

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

Традиционным способом получения электроэнергии является сжигание углеводородов. Однако учитывая, что их количество является ограниченным, развитие альтернативной энергетики является актуальной задачей. Одним из способов получения энергии является использование солнечной энергии. Солнечной энергии на поверхность земли за час подает больше чем люди используют в течении года[1]. Солнечные элементы (СЭ) не производят парниковых газов, и они бесшумны.

Известно [2], что выходная мощность и КПД солнечных батарей сильно зависят от температуры. Соответствующее изменения КПД представляют большой интерес, поскольку рабочая температура может меняться в широком интервале значений, особенно при эксплуатации СЭ в космосе. В этой работе предложена математическая модель, описывающая температурную зависимость выходных параметров СЭ на основе гетеропереходов CdS-CdTe. На её основе получены зависимости максимальной мощности ( $P_{max}$ ) и фактора заполнения ( $ff$ ) вольт-амперной характеристики солнечного элемента от значений температуры.

Из таблицы 1 видно, что уменьшение температуры от 288 К до 263 К приводит к возрастанию выходной мощности до 0,01 Вт и фактора заполнения до 0,91.

Таблица 1. Результаты расчёта зависимости параметров солнечных элементов CdS-CdTe от температуры.

Температура СЭ(К)	Фактор заполнения- $ff$	$U_{MAX}$ (В)	$I_{MAX}$ (мА)	$P_{max}$ (Вт)
263	0.9087	1,1	9,5	0,01
273	0.8658	1,05	9,4	0,0098
278	0.8282	1	9,4	0,0094
288	0.7447	0,9	9,35	0,0084

Полученные результаты могут быть полезны при определении условий эксплуатации проектируемых солнечных батарей.

### Список литературы

1. Richard Hantula. Science and Curriculum Consultant: Debra Voegel, M.A., Science Curriculum Resource Teacher. How do solar panels work? 2010. P-32.
2. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. 222 с.

Аунг Пьо — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ar-lay48@gmail.com.

В.В. Андреев, А.А. Столяров, А.В. Романов, Д.М. Ахмелкин

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МДП-СЕНСОРОВ**

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

Космические аппараты в процессе эксплуатации подвергаются воздействию радиационных факторов [1,2]. С увеличением срока активного существования космического аппарата на орбите возрастает роль радиационных отказов элементной базы, входящей в его состав. Определение поглощенной дозы чувствительными элементами СБИС является достаточно сложной задачей. В условиях космического аппарата сложно обеспечить одинаковые условия облучения для чувствительного элемента СБИС и датчика накопленной дозы. Для обеспечения максимальной идентичности условий воздействия ионизирующего излучения космического пространства на чувствительный элемент СБИС и на датчик накопленной дозы необходимо размещать датчик вблизи СБИС в приборном отсеке или даже непосредственно на печатной плате. Важным является и обеспечение идентичности электрических режимов датчика и чувствительного элемента СБИС. Для применения в нано- и пикоспутниках датчики поглощенной дозы должны иметь малые массогабаритные показатели и более высокую точность. Поэтому разработка датчиков, позволяющих контролировать поглощенную дозу чувствительных элементов элементной базы в условиях воздействия радиационных факторов космического пространства на основе МДП-сенсоров радиационных излучений, технологически совместимых с изделиями микросистемной техники, является актуальной задачей.

В данной работе разработан метод контроля интенсивности радиационного излучения и определения интегральной поглощенной дозы с использованием МДП-структур. Проведено исследование воздействия  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -излучения на МДП-структуры, находящиеся в специальных электрических режимах.

В настоящее время в качестве датчиков интегральной поглощенной дозы радиационных излучений широко используются МДП-транзисторы (RADFET – сенсоры) [3,4]. В результате воздействия радиационного излучения в подзатворном диэлектрике таких транзисторов происходит накопление положительного заряда, приводящее к изменению порогового напряжения. Величина изменения порогового напряжения МДП-транзистора пропорциональна интегральной поглощенной дозе [2-4]. Аналогичное накопление положительного заряда в подзатворном диэлектрике происходит и в МДП-конденсаторах. В то же время, в работах [5,6] было показано, что ионизационные процессы в диэлектрической пленке МДП-структур можно использовать для контроля интенсивности радиационных излучений. Таким образом, использование МДП-структур позволяет контролировать как ин-

тенсивность радиационного излучения, так и величину интегральной поглощенной дозы радиационного излучения.

В качестве экспериментальных образцов использовался специально разработанный набор тестовых МДП-конденсаторов [6]. МДП-конденсаторы формировались на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией  $\langle 100 \rangle$ . Низкоомный полупроводник был специально выбран для удобства создания сильнополевых инжекционных режимов при изучении ионизационных процессов, протекающих под действием облучения в тонких диэлектрических пленках. Двоокись кремния толщиной  $50 \div 100$  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. Для удобства контактирования и использования полученные кристаллы частично разваривались в корпуса интегральных микросхем. С этой целью все контактные площадки были сформированы на толстой пленке  $\text{SiO}_2$ . Также были сформированы планарные контакты к подложке.

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 получением необходимой чувствительности МДП-структуры. Экспериментальная установка позволяла переключать амплитуду прикладываемого токового импульса, реализуя режимы многоуровневой токовой нагрузки [7,8]. 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.

Все структуры испытывались при положительной полярности металлического электрода, что позволяло создать в полупроводнике МДП-структуры режим обогащения и исключить влияние полупроводника на перенос заряда через МДП-структуры, который в этом случае определялся только свойствами инжектирующей границы раздела и объемом диэлектрической пленки.

Для исследования влияния  $\alpha$ -частиц на МДП-структуры, находящиеся в режиме сильнополевой инжекции носителей в диэлектрик, образцы подвергались воздействию излучения источника  $^{239}\text{Pu}$ . Мощность потока  $\alpha$ -частиц составляла  $10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Экспериментальные результаты, иллюстрирующие воздействие  $\alpha$ -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. 1. Участок 1 на рис.1 соответствует заряду емкости МДП-структуры постоянным

током плотностью  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> 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  $\alpha$ -частиц (рис. 1, облучению соответствуют участки 3,4,5,6). В [5] было показано, что при приложении к МДП-структуре постоянного импульса 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.

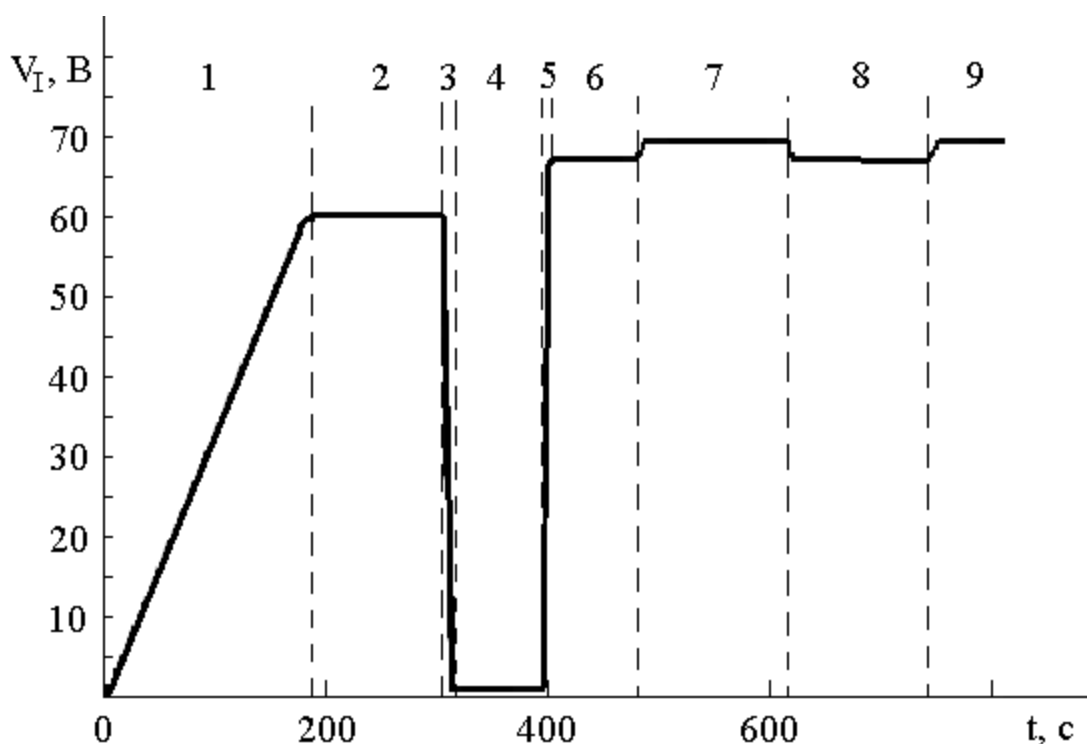


Рис. 1. Временная зависимость напряжения на МДП-структуре при заряде (участки 1,5) и разряде (участок 3) емкости МДП-структуры, а также при протекании сильнополевого инжекционного тока (участки 2,6,7,8,9) в условиях приложения к образцу постоянного импульса тока: 1,2,3,4 –  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>; 5,6,7,8,9 –  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>; на участках 3,4,5,6,8 проводилось облучение  $\alpha$ -частицами.

Следовательно, если плотность ионизационного тока больше плотности  $J_0$ , то будет наблюдаться разряд емкости МДП-структуры до напряжений близких к нулю (рис. 1, 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/см<sup>2</sup> в середине участка и уменьшалась до  $2 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> в области более слабых электрических полей. На участке 5 (рис. 1) плотность тока, прикладываемая

мого к МДП-структуре, была увеличена до  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>, в результате чего  $J_{\text{ion}}$  стала меньше  $J_0$  и структура перешла в режим заряда емкости. Наличие ионизационного тока на участке 5 приводит к уменьшению скорости возрастания напряжения (рис. 1) по сравнению с режимом, в котором отсутствовало облучение. Напряжение было рассчитано с использованием выражения (1). На этом участке значение  $J_{\text{ion}}$  также дало значение  $(2\div 3) \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>. На участке 6 (рис. 1) 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. 1) можно рассчитать, используя выражение (1) и уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма [1,7].

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 выражений (1) и (2) на участках 6 и 8 (рис. 1) была равна  $5 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>. Более высокая плотность ионизационного тока на участках 6 и 8 была, по-видимому, обусловлена полевой зависимостью радиационной ионизации [5,6].

После прекращения кратковременного действия  $\alpha$ -облучения напряжение на МДП-структуре практически возвращается к значениям, наблюдавшимся до облучения (рис. 1), что свидетельствует об отсутствии заметных деградиационных процессов в диэлектрической пленке [5-8]. При более длительных воздействиях  $\alpha$ -частиц в подзатворном диэлектрике у границы раздела с кремнием накапливается положительный заряд, плотность которого пропорциональна интегральной поглощенной дозе ионизирующего излучения [3-5]. Накопление положительного заряда приводит к уменьшению напряжения, падающего на МДП-структуру в режиме сильнополевой инжекции электронов  $V_1$  при протекании постоянного тока. Еще более существенное влияние накопление положительного заряда оказывает на сдвиг C-V характеристик.

Проведена апробация разработанного МДП-сенсора при контроле интегральной поглощенной дозы ионизирующего облучения. Для исследования использовалось ионизирующее излучение гамма квантов (источник  $\text{Co}^{60}$ ). Радиационная чувствительность сдвига C-V зависимостей по оси напряжения к гамма-излучению в зависимости от параметров подзатворного диэлектрика составляла  $2\div 10$  мВ/Гр и дозовая зависимость сдвига напряжения, соответствующего середине запрещенной зоны ( $\Delta V_{\text{mg}}$ ), была близка к линейной в диапазоне до 300 Гр.

Таким образом, был разработан метод контроля интенсивности радиационного излучения и определения интегральной поглощенной дозы с использованием МДП-структур. Проведено исследование воздействия  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -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, можно определить величину ионизирующего тока. Это явление можно использовать в сенсорах радиационных излучений, позволяющих контролировать как интенсивность радиационных излучений, так и величину интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117).*

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. - М.: Энергоатомиздат. 1988, 256 с.

[2] Ma T. P., Dressendorfer P. V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. New York: WileyInterscience, 1989.

[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] Vasovic N.D, Ristic G.S.A new microcontroller-based RADFET dosimeter reader// Radiation Measurement. 2012. V.47. P272-276.

[5] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Лычагин А.А., Столяров А.А., Ульянов С.Е. Радиационная ионизация в структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов// Физика и химия обработки материалов. 2006.№ 6. С. 19-23.

[6] 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.

[7] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A.: Multilevel current stress technique for investigation thin oxidelayers of MOS structures// IOPConf. Series: Materials Science and Engineering. V. 41, 2012. P. 12-17.

[8] 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. V. 12. No. 3. P. 299–303.

**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.

**Романов Андрей Владимирович** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: romanov@okbmel.ru.

**Ахмелкин Дмитрий Михайлович** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dmitriy.akhmelkin@gmail.com.

Д.В. Андреев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕКАНИЯ ЗАРЯДА В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ МДП-СТРУКТУР

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

Одним из главных параметров, характеризующих надёжность энергонезависимой памяти с плавающим затвором (флэш-память), является время хранения заряда на плавающем затворе, или, иными словами, время хранения информации [1-3]. Для современной флэш-памяти среднее время хранения заряда на плавающем затворе при комнатной температуре составляет 10 лет и более [1,2]. Отсюда следует, что проведение эксперимента по определению времени хранения заряда в обычных условиях без использования каких-либо «ускоряющих» стекание заряда факторов – задача, требующая значительных временных затрат, что неприемлемо в условиях современной экономики. Для того, чтобы «ускорить» процесс стекания заряда с плавающего затвора, используют различные «ускоряющие» методики, такие как воздействие на флэш-память повышенных температур, электрических полей и др. [2] Затем при помощи тех или иных методик находят корреляцию данных, полученных при «ускоряющих» воздействиях, с данными, полученными при отсутствии таких воздействий.

Настоящая работа посвящена моделированию стекания информационного заряда в элементах энергонезависимой памяти на основе МДП-структур с плавающим затвором.

В данной работе в качестве «ускоряющей» методики было выбрано воздействие на элемент флэш-памяти повышенных температур (20 °С, 125 °С, 250 °С, 350 °С). Выбор таких температур, помимо их основной, «ускоряющей» функции, обусловлен работой некоторой современной энергонезависимой памяти в условиях экстремально высоких температур (например, память на основе SiC). Обычно, воздействие повышенных температур на энергонезависимую память применяется при известной величине энергии активации ( $E_a$ ), т.е. энергии, при которой начинается эмиссия заряда с плавающего затвора. Базируясь на ранее полученных данных [3], выбранный нами диапазон энергий активации 0,1 ÷ 3,1 эВ с шагом 0,3 эВ.

В результате, путём моделирования, были получены зависимости времени хранения заряда на плавающем затворе от энергии активации (рис. 1).

Время хранения заряда  $t_R$  определялось по следующей формуле [1]:

$$t_R = \frac{\ln(2)}{v \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}, \quad (1)$$



где  $\nu$  – частотный фактор,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

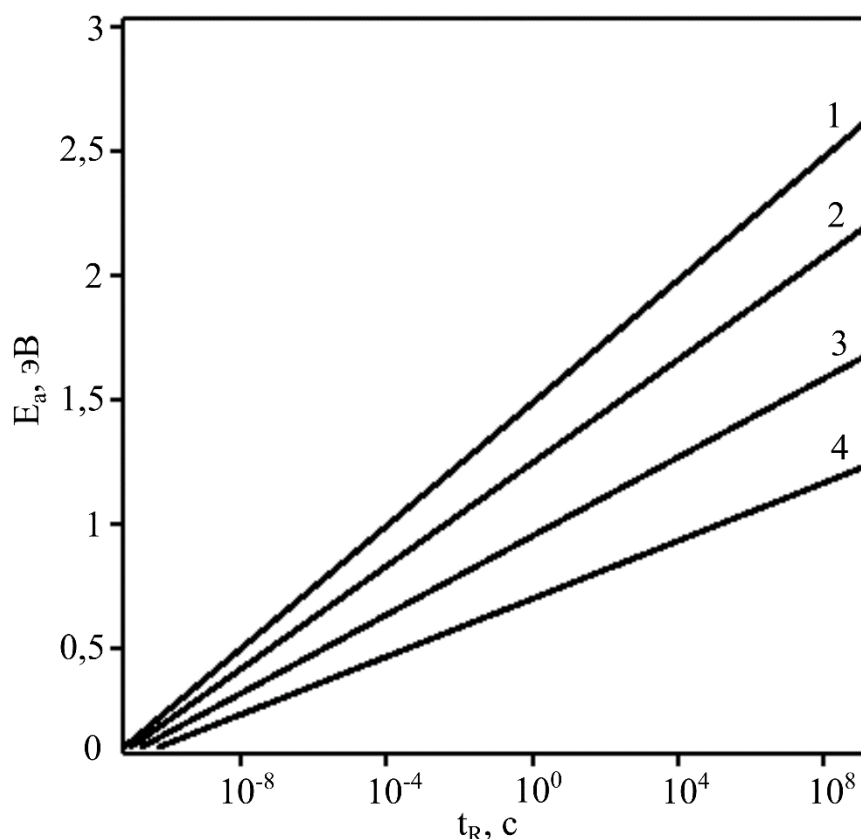


Рис. 1. Зависимости времени хранения заряда на плавающем затворе флэш-памяти от энергии активации при воздействии различных температур: 1 – 350°C, 2 – 250 °C, 3 – 125 °C, 4 – 20 °C.

Из приведённых на рис. 1 зависимостей можно сделать вывод, что увеличение температуры приводит к существенному «ускорению» процессов стекания заряда с плавающего затвора, что позволяет значительно сократить временные затраты на проведение эксперимента по оценке возможности сохранения заряда на плавающем затворе элемента энергонезависимой флэш-памяти.

Концентрация электронов, покинувших электронные ловушки в инжекционно модифицированном диэлектрическом слое, будет равна

$$n = \sum_i^n n_{oi} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau(E_i)}\right) \right], \quad (2)$$

где  $n_{oi}$  - плотность  $i$ -х электронных ловушек,  $\tau(E_i)$ - постоянная времени  $i$ -х электронных ловушек.

Для ловушек из каждой составляющей энергетического спектра при релаксации с ростом температуры можно считать время захвата на ловушку много больше времени выноса (пролета) [5]. Так как, концентрация ловушек с энергией  $E_i$  много меньше общей концентрации захваченных на ловушки электронов [5,6], то внутреннее электрическое поле будет прак-

тически полностью определяться более глубокими ловушками. Таким образом, реализуется случай слабого перезахвата и постоянного времени пролета.

На каждой из температурных ступеней временная зависимость изменения напряжения плоских зон, определяющаяся концентрацией электронов, освободившихся из ловушек, описывается следующими выражениями:

$$\Delta V_{FB} = \Delta V_{0i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau(E_i)}\right) \right], \quad (3)$$

$$\Delta V_{0i} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} n_{0i} \cdot (d_{OX} - X_{PG}), \quad (4)$$

$$\tau_i = w_i^{-1} \exp\left(-\frac{E_i}{kT_i}\right), \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_i$  – температура на  $i$ -м участке временной зависимости температурного воздействия прикладываемого к МДП-структуре.

После проведения отжига низкоэнергетические составляющие спектра ловушек будут разряжены.

Временная зависимость изменения напряжения плоских зон, связанная со стеканием заряда термостабильной компоненты при рабочей температуре  $T_p$ , тогда будет описываться следующим выражением

$$\Delta V_{FB} = \sum_{i=m}^n \Delta V_{0i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau(E_i)}\right) \right], \quad (6)$$

где  $m$  – номер составляющей энергетического спектра, соответствующий температуре отжига.

Зная значение допустимой концентрации электронов, покинувших ловушки при максимальной рабочей температуре, с использованием выражения (6) можно оценить время, за которое уменьшение термостабильной компоненты заряда не превысит допустимых пределов.

Таким образом, было проведено моделирование, позволившее получить зависимости времени хранения заряда на плавающем затворе от энергии активации при различных температурах. Показано, что увеличение температуры позволяет значительно «ускорить» процесс стекания заряда с плавающего затвора энергонезависимого элемента флэш-памяти и, тем самым, существенно сократить время на проведение эксперимента по определению возможности сохранения заряда на плавающем затворе флэш-памяти.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э.Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117).*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Sze S.M. and Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007. – 794 p.

[2] Brewer J. and Gill M. Nonvolatile Memory Technologies with Emphasis on Flash: A Comprehensive Guide to Understanding and Using Flash Memory Devices. IEEE Press Series on Microelectronic Systems. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2008. – 750 p.

[3] Cerbu F., Andreev D.V., Afanasev V.V., Lisoni J.G., Breuil L., Stesmans A., and Houssa M. Electron energy distribution in Si/TiN hybrid floating gates for NAND memories// European Materials Research Society. Symposium AA: Non-volatile memories: materials, nanostructures and integration approaches. 2015Spring, 2015.

[4] Tang B., Zhang W.D., Degraeve R., Breuil L., Blomme P., Zhang J.F., Ji Zh., Zahid M., Toledano-Luque M., Bosch G. and Houdt J. Evaluation and Solutions for P/E Window Instability Induced by Electron Trapping in High- $\kappa$  Intergate Dielectrics of Flash Memory Cells// IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. V.61, NO. 5, P. 1299–1306.

[5] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M. and 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.

[6] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. and Andreev D.V. Control current stress technique for the investigation of gate dielectrics of MIS devices// Phys. StatusSolidiC. 2015. V. 12. No. 3. P. 299–303.

**Андреев Дмитрий Владимирович** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

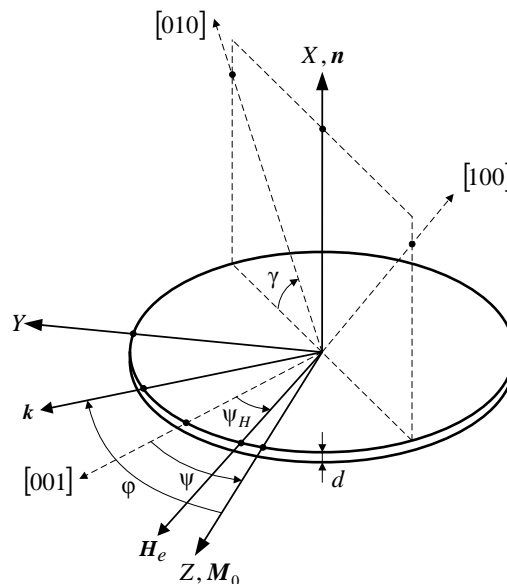
В.В. Шагаев, Тун Тун Лин

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ С ТЕРМОСТАБИЛЬНЫМИ ЧАСТОТАМИ

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

Данная работа посвящена исследованию характеристик поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ) в плёнках кубических ферритов [1, 2]. Причём, были выбраны плёнки с ориентациями типа  $\{100\}$  и  $\{110\}$ . Можно ожидать, что анизотропия характеристик в таких плёнках будет наибольшей. Такое предположение основано на том, что в плоскостях  $\{100\}$  и  $\{110\}$  расположены кристаллографические оси симметрии двух или трёх типов. Так в плоскости  $\{100\}$  лежат оси типа  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$ , в плоскости  $\{110\}$  –  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ . Особый интерес представляет температурная стабильность спектра ПМСВ, поскольку при проектировании устройств одной из главных является задача термостабилизации их характеристик.

В данной работе поиск решений, повышающих термостабильность устройств, основывался на анизотропных свойствах ферритовых плёнок. При этом в отличие от ранее опубликованных работ [3 – 5] не вводились ограничения на значения материальных параметров феррита.



**Рис. 1.** Модель плёнок с кристаллографическими ориентациями типа  $\{100\}$  ( $\gamma = 0$ ) и  $\{110\}$  ( $\gamma = \pi/4$ )

Модель ферритовой плёнки изображена на рис. 1. Использованные обозначения:  $n$  – нормаль к плёнке;  $k$  – волновой вектор МСВ;  $H_e$  – на-

пряжённость постоянного намагничивающего поля;  $\mathbf{M}_0$  – вектор равновесной намагниченности феррита;  $d$  – толщина плёнки;  $X, Y, Z$  – координатные оси. Причём, ось  $X$  направлена вдоль нормали, а ось  $Z$  вдоль вектора  $\mathbf{M}_0$ . На рисунке также обозначены углы, которые были использованы в расчётах. При рассмотрении плёнки с кристаллографической ориентацией типа  $\{100\}$  угол  $\gamma$  принимал значение  $\gamma = 0$ , а для плёнки с ориентацией  $\{110\}$  –  $\gamma = \pi/4$ . В этих двух случаях можно полагать, что в касательном поле, намагничивающим плёнку до насыщения, вектор  $\mathbf{M}_0$  также как и вектор  $\mathbf{H}_e$  будет параллелен плёнке. Данный вывод следует из того, что плоскости  $\{100\}$  и  $\{110\}$  являются плоскостями симметрии. Изменение температуры плёнки будет сопровождаться изменением поля магнитной кристаллографической анизотропии, что приведёт к повороту вектора  $\mathbf{M}_0$  в плоскости плёнки. Углы  $\psi$  и  $\phi$  зависят от ориентации  $\mathbf{M}_0$ , и при расчёте температурного коэффициента частоты МСВ необходимо было учитывать температурные производные от этих углов.

ПМСВ характеризуется векторами переменной намагниченности  $\mathbf{m}(t, \mathbf{r})$  и переменного магнитного поля  $\mathbf{h}(t, \mathbf{r})$ , где  $t$  – время,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор. У бегущей вдоль плёнки волны переменные параметры описываются гармонической функцией  $\exp(j\omega t - jk_y y - jk_z z)$ , где  $\omega$  – круговая частота,  $k_y$  и  $k_z$  – проекции волнового вектора. Кроме того, переменные векторы должны быть решением системы уравнений, составленной из уравнения движения намагниченности (уравнения Ландау-Лифшица) и уравнений Максвелла в магнитостатическом приближении:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -2\pi g [\mathbf{M}, \mathbf{H}_{eff}],$$

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_e - 4\pi(\mathbf{M}_0 \mathbf{n}) \mathbf{n} + \mathbf{h} - \frac{\partial W_a}{\partial \mathbf{M}},$$

$$\text{rot } \mathbf{h} = 0,$$

$$\text{div}(\mathbf{h} + 4\pi \mathbf{m}) = 0.$$

Здесь  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \mathbf{m}$ ;  $g$  – гиромагнитное отношение (у практически значимых ферритов  $g \approx 2.8$  МГц/Э);  $W_a$  – плотность энергии магнитной анизотропии. Было использовано выражение:

$$W_a = W_a^c + W_a^u = -\frac{K_{c1}}{2M_0^4} \sum_p M_p^4 + K_{u1} \frac{M_0^2 - (\mathbf{Mn})^2}{M_0^2}.$$

Первое слагаемое учитывает кристаллографическую магнитную анизотропию. Его вид определяется инвариантностью энергии к преобразованиям симметрии кубической кристаллической решётки. Второе слагаемое учитывает одноосную магнитную анизотропию имеющуюся у плёнок, вы-

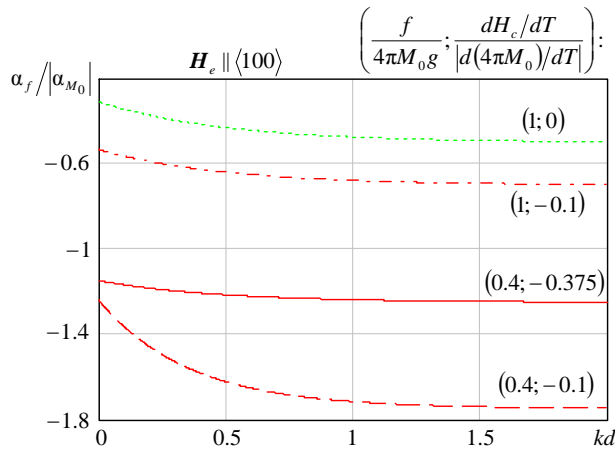
ращенных на подложках.  $K_{c1}$  – первая константа кубической магнитной анизотропии, и суммирование производится по проекциям вектора намагниченности на оси системы координат, образованной кристаллографическими осями  $[100]$ ,  $[010]$ ,  $[001]$  (рис. 1).  $K_{u1}$  – первая константа одноосной нормальной анизотропии. Векторы  $\mathbf{m}$  и  $\mathbf{h}$ , являющиеся решениями приведенных выше уравнений, должны удовлетворять электродинамическим граничным условиям. Эти условия заключаются в непрерывности касательной составляющей  $\mathbf{h}$  и нормальной составляющей  $(\mathbf{h} + 4\pi\mathbf{m})$ , причём вне плёнки  $\mathbf{m} = 0$ . Необходимость удовлетворения граничным условиям определит связь между круговой частотой и волновым числом. Получаемая при этом зависимость  $\omega(k)$  будет законом дисперсии ПМСВ.

Температурный коэффициент частоты ПМСВ определён формулой:

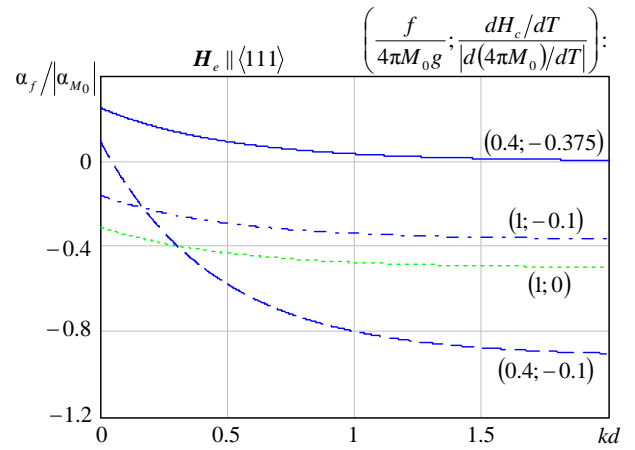
$$\alpha_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dT},$$

где  $f = \omega/2\pi$  и частота соответствует фиксированному значению волнового числа. Волновое число задаётся конструкцией полоскового преобразователя и практически от температуры не зависит. Расчёт температурного коэффициента можно выполнить, дифференцируя закон дисперсии ПМСВ. При этом в намагничивающем поле с фиксированной напряженностью  $H_e$  температурный коэффициент будет задан производными  $dH_c/dT$ ,  $dH_u/dT$ ,  $d(4\pi M_0)/dT$ , являющимися материальными параметрами плёнки. Здесь  $H_c = K_{c1}/M_0$  – поле кубической анизотропии;  $H_u = 2K_{u1}/M_0$  – поле одноосной магнитной анизотропии. В работе была рассмотрена наиболее распространённая геометрия, когда  $\varphi = \pi/2$ .

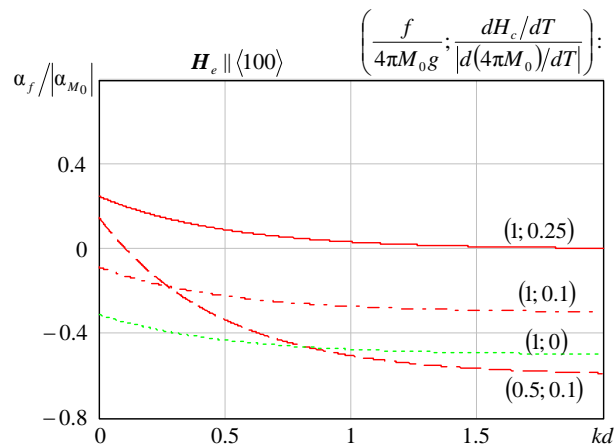
Анизотропия температурного коэффициента будет проявляться в его зависимости от кристаллографической ориентации вектора намагниченности. При этом анализ показал, что экстремальные значения достигаются для направлений вектора намагниченности вдоль осей типа  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  в плёнке с ориентацией  $\{110\}$  и вдоль осей типа  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$  в плёнке с ориентацией  $\{100\}$ . Некоторые интересные примеры расчётов приведены на рис. 2 – 9. Графики на рис. 2 – 8 были рассчитаны для моделей, в которых анизотропия плёнки представлена только производной  $dH_c/dT$ , а остальные параметры анизотропии полагались равными нулю ( $H_c = 0$ ,  $H_u = 0$ ,  $dH_u/dT = 0$ ). Влияние температурной зависимости поля одноосной анизотропии демонстрирует рис. 9. При расчёте полагалось  $f/4\pi M_0 g = 0.5$ ,  $dH_c/dT = 0.1|d(4\pi M_0)/dT|$ ,  $H_c = 0$ ,  $H_u = 0$ .



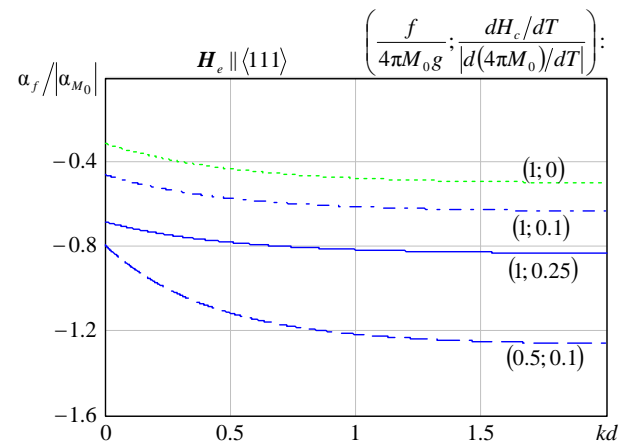
**Рис. 2.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{110\}$ , намагниченной вдоль касательной оси типа  $\langle 100 \rangle$ , и с отрицательными значениями  $dH_c/dT$ . Точечный график – зависимость в изотропной плёнке



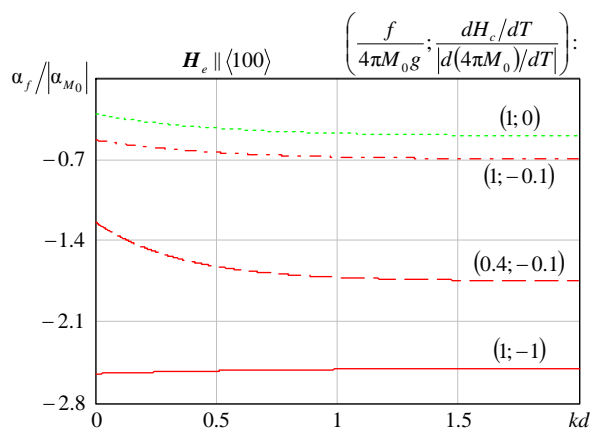
**Рис. 3.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{110\}$ , намагниченной вдоль касательной оси типа  $\langle 111 \rangle$ , и с отрицательными значениями  $dH_c/dT$ . Точечный график – зависимость в изотропной плёнке



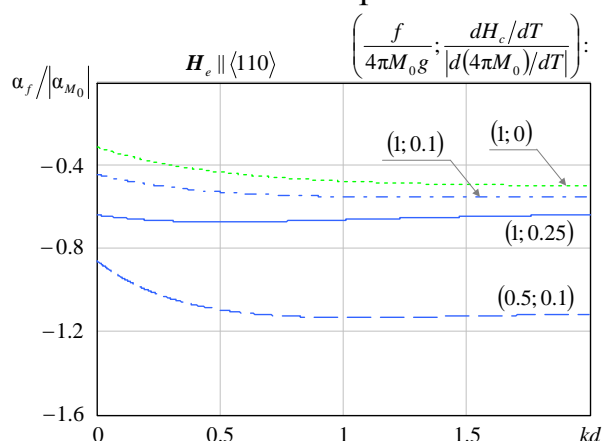
**Рис. 4.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{110\}$ , намагниченной вдоль касательной оси типа  $\langle 100 \rangle$ , и с положительными значениями  $dH_c/dT$ . Точечный график – зависимость в изотропной плёнке



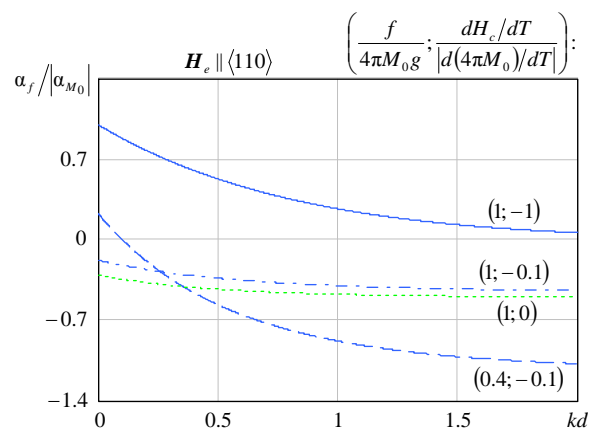
**Рис. 5.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{110\}$ , намагниченной вдоль касательной оси типа  $\langle 111 \rangle$ , и с положительными значениями  $dH_c/dT$ . Точечный график – зависимость в изотропной плёнке



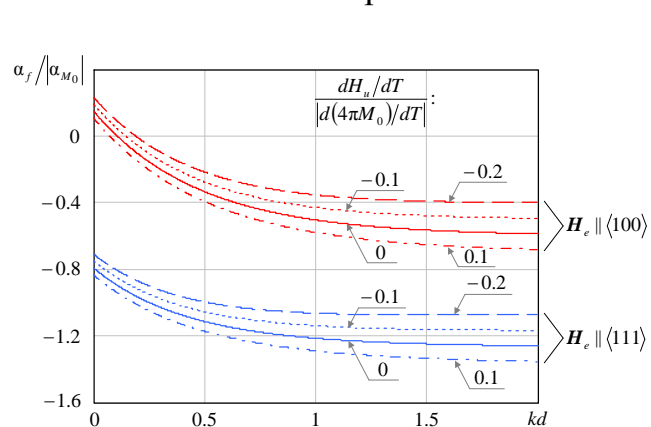
**Рис. 6.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{100\}$ , намагниченной вдоль касательной оси типа  $\langle 100 \rangle$ , и с отрицательными значениями  $dH_c/dT$ . Точечный график – зависимость в изотропной плёнке



**Рис. 8.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{100\}$ , намагниченной вдоль касательной оси типа  $\langle 110 \rangle$ . Точечный график – изотропная плёнка



**Рис. 7.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{100\}$ , намагниченной вдоль касательной оси типа  $\langle 110 \rangle$ , и с отрицательными значениями  $dH_c/dT$ . Точечный график – зависимость в изотропной плёнке



**Рис. 9.** Дисперсионные зависимости температурного коэффициента частоты в плёнке с ориентацией  $\{110\}$ , намагниченной вдоль касательных оси типа  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ , и с учётом двух типов полей анизотропии

Сравнение приведённых зависимостей показывает, что температурный коэффициент может иметь разные знаки при намагничивании плёнки вдоль касательной кристаллографической оси типа  $\langle 100 \rangle$ , с одной стороны, и вдоль осей типа  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  – с другой. Установленная особенность позволяет выбирать направление намагничивания между осями так, чтобы выполнялось требование термостабильности частоты. Использование данного способа в спин-волновом устройстве для термостабилизации его ра-



бочей частоты не предполагает изменения конструкции устройства. Нужно лишь выбрать плёнку с подходящей кристаллографической ориентацией и выбрать направление намагничивания с нулевым значением температурного коэффициента частоты.

Результаты работы могут быть использованы для повышения термостабильности устройств, построенных на основе плёнок железиттриевого граната и магний-марганцевой феррошпинели. Оба материала имеют кубическую симметрию кристаллической решётки. Хотя магнитные параметры граната и шпинели существенно отличаются друг от друга, метод анализа, предложенный в данной работе, в одинаковой степени применим к обоим материалам. Такая универсальность обусловлена отсутствием в анализе ограничений на значения параметров.

### Список литературы

1. Glass H.L. Ferrite films for microwave and millimeter-wave devices // Proc. IEEE. 1988. Vol. 76. Pp. 151-158.
2. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.Г. Магнитостатические волны в электронике СВЧ. Саратов: Изд.-во СГУ, 1993. 316 с.
3. Шагаев В.В. Влияние кубической анизотропии на температурные характеристики магнитостатических волн в ферритовых плёнках, намагниченных в плоскости // Журнал технической физики. 1998. № 10. С. 99-103.
4. Шагаев В.В. О влиянии магнитной кристаллографической анизотропии на температурные характеристики магнитостатических волн в ферромагнитных плёнках // Физика твёрдого тела. 2003. № 12. С. 2215-2221.
5. Шагаев В.В. Спектр и температурная характеристика поверхностной магнитостатической волны в монокристаллической ферритовой плёнке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 38-50.

**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.

Аунг Пьей Зон, А.В. Мазин

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕРМО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

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

Термоэлектрическими явлениями называются явления термо-э. д. с. (термоэлектродвижущая сила) Зеебека, Пельтье и Томсона.

Сущность явления термо-э. д. с. (открытого Зеебеком в 1821 г.) состоит в том, что в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разных материалов, возникает электродвижущая сила (термо-э. д. с.), если места контактов поддерживаются при различных температурах. В простейшем случае, когда такая цепь состоит из двух различных материалов, она носит название термоэлемента или термопары. Экспериментальные исследования показали, что термоэлектродвижущая сила термопары зависит от температуры горячего ( $T$ ) и холодного ( $T_0$ ) спаев и от состава материалов, образующих термопару.

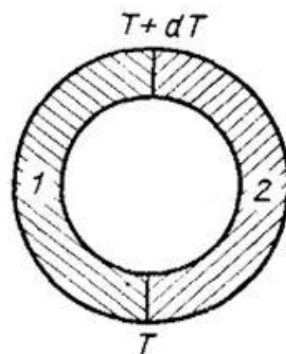


Рис. 1. Замкнутая цепь двух проводников

В небольшом интервале температур величину термо-э. д. с.  $E$  можно считать, с достаточной для практических целей точностью, пропорциональной разности температур и некоторому коэффициенту  $\alpha$ , называемому коэффициентом термо-э. д. с.:

$$E = \alpha_{1,2}(T - T_0) \quad (1)$$

более точно,  $dE = \alpha_{1,2}dT$ . Коэффициент термо-э. д. с.  $\alpha$  определяется в первую очередь материалами ветвей термоэлемента, для обозначения которых мы ввели индексы 1 и 2, но зависит также и от интервала температур в котором используется или исследуется термопара; во многих случаях изменением температуры он даже меняет знак.

Явление Пельтье [1] (открытое в 1834 г.) представляет собой эффект, обратный явлению Зеебека; сущность его состоит в том, что при прохожде-

нии тока в цепи, состоящей из различных проводников, в местах контакта в дополнение к теплоте Джоуля выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) некоторое количество тепла  $Q_{II}$ , пропорциональное прошедшему через контакт количеству электричества и некоторому коэффициенту  $\Pi$ , зависящему от природы находящихся в контакте материалов, названному коэффициентом Пельтье:

$$Q_{II} = \Pi It \quad (2)$$

Коэффициент Пельтье можно определить, как количество тепла, выделяющегося (или поглощающегося) на контакте при прохождении через него единицы заряда.

В 1856 г. Томсон, применив к термоэлектрическим явлениям первое и второе начала термодинамики, вывел соотношение между коэффициентом термо-, э. д. с.  $\alpha$  и коэффициентом Пельтье  $\Pi$ :

$$\alpha = \frac{\Pi}{t} \quad (3)$$

и предсказал существование третьего явления, названного в дальнейшем явлением Томсона.

Явление Томсона (установленное экспериментально Леру в 1867 г.) заключается в следующем: если вдоль проводника, по которому протекает электрический ток, существует перепад температур, то в дополнение к теплоте Джоуля в объеме проводника выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла  $Q_{\tau}$ , (теплота Томсона), пропорциональное силе тока  $I$ , времени  $t$ , перепаду температур  $(T - T_0)$  и коэффициенту (названному коэффициентом Томсона), зависящему от природы материала:

$$Q_{\tau} = \tau(T - T_0)It \quad (4)$$

Согласно теории Томсона, коэффициент термо-э. д. с. пары проводников связан с коэффициентами Томсона соотношением

$$\frac{d_{\alpha_{1,2}}}{d_t} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{T} \quad (5)$$

Оба соотношения Томсона (3) и (5) многократно подтверждались экспериментальными исследованиями. Качественно термоэлектрические явления можно объяснить следующим образом. Энергия свободных невырожденных электронов растет пропорционально температуре. Если вдоль проводника существует перепад температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном. В полупроводнике концентрация свободных электронов также растет с температурой и, следовательно, будет на горячем конце больше, чем на холодном. В результате всего этого возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остается нескомпенсированный положительный заряд.

Этот процесс накопления заряда будет продолжаться до тех пор, пока возникшая таким образом разность потенциалов не создаст поток электронов, движущийся в обратном направлении, равный первичному, и благодаря этому не установится стационарное состояние.

Если вдоль однородного проводника существует градиент температуры, то при прохождении тока в объеме материала кроме тепла Джоуля выделяется (или поглощается) теплота, количество которой пропорционально количеству протекающего электричества и перепаду температур:

$$Q_T = It \int_T^{T'} \tau_T dT. \quad (6)$$

Коэффициент  $\tau_T$  принято называть коэффициентом Томсона.

Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\Pi$  и  $\tau_T$  связаны между собой соотношением Томсона [2]. Для их вывода проведем элементарное рассмотрение термоэлектрических эффектов для замкнутой цепи из двух проводников, как это изображено на рис.1. Пусть между контактами полупроводников существует разность температур  $dT$ . Наличие градиента температуры вызывает термоэлектрическую силу, равную  $dE = \alpha dT$ , которая обеспечит в данной цепи прохождение тока  $dI$ . При этом на одном из контактов в единицу времени выделяется теплота Пельтье в количестве  $\Pi' dI$ , а на другом поглощается  $\Pi dI$ . В результате в цепи выделяется теплота Пельтье, и если  $\Pi'$  мало отличается от  $\Pi$ , то количество теплоты

$$dQ_T = (\tau_{T_2} - \tau_{T_1}) dI dT. \quad (7)$$

Эти термодинамические явления можно считать обратимыми, поскольку они зависят от направления тока и градиента температуры. Но в данной замкнутой цепи имеют место и необратимые процессы – теплопроводность и выделение теплоты Джоуля. В стационарных условиях теплопроводность не изменяет общего количества теплоты в системе, имеет место только перенос теплоты в неизменном количестве из одного участка в другой. Теплота Джоуля пропорциональна квадрату тока  $(dI)^2$ . Поэтому при малых значениях  $dI$  и  $dT$  эти необратимые эффекты можно не учитывать. На основании закона сохранения энергии имеем:

$$\alpha dI dT = \frac{d\Pi}{dT} dI dT + (\tau_{T_2} - \tau_{T_1}) dI dT, \quad (8)$$

Откуда находим:

$$\alpha = \frac{d\Pi}{dT} + (\tau_{T_2} - \tau_{T_1}). \quad (9)$$

Если положить для горячего конца  $T'$ ,  $\Pi'$ ,  $\tau_{T_2}$ , а для холодного  $T$ ,  $\Pi$ ,  $\tau_{T_1}$ , то на основании второго закона термодинамики, по которому поле изменение энтропии  $dS$  замкнутой системы при обратимых процессах равно нулю, имеем:

$$\frac{\Pi' dI}{T'} - \frac{\Pi dI}{T} + dI \int_T^{T'} \frac{\tau_{T_2} - \tau_{T_1}}{T} dT = 0. \quad (10)$$

Если за начало отсчета энтропии взять ее значение на горячем конце ( $\Pi' dI/T' = 0$ ), то, продифференцировав выражение (10) по  $T$ , получим:

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{\Pi}{T} \right) - \frac{\tau_{T_2} - \tau_{T_1}}{T} = 0, \quad (11)$$

Откуда найдем

$$\frac{d\Pi}{dT} - (\tau_{T_2} - \tau_{T_1}) = \frac{\Pi}{T}. \quad (12)$$

Сравнивая (9) и (12), видим, что

$$\Pi = \alpha T. \quad (13)$$

Если продифференцируем равенство (10) по  $T$ , найдем:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{T} \frac{d\Pi}{dT} - \frac{\Pi}{T^2} = \frac{1}{T} \left( \frac{d\Pi}{dT} - \frac{\Pi}{T} \right). \quad (14)$$

Учитывая выражение (12), получаем:

$$\tau_{T_2} - \tau_{T_1} = \tau_T = T \frac{d\alpha}{dT}. \quad (15)$$

Таким образом, коэффициенты  $\alpha$ ,  $\Pi$ ,  $\tau_T$ , характеризующие термоэлектрические свойства данного вещества, связаны между собой термодинамическими соотношениями. Обычно проводится экспериментальное измерение  $\alpha$ , а трудно измеряемые коэффициенты  $\Pi$  и  $\tau_T$  определяются на основе этих соотношений.

### Список литературы

- [1] Лазарь С.С. *Физика полупроводников*. Изд-во Наука, 1985, 377 с.
- [2] Шалимова К.В. *Физика полупроводников*. Изд-во М.: Энергоатомиздат, 1985, 399 с.

**Аунг Пьей Зон** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aungpyesone49@gmail.com.

**Мазин Анатолий Викторович** — д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Информационная безопасность автоматизированных систем" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mazinav@yandex.ru.

В.В. Андреев, В.Г. Дмитриев, Н.Н. Чернова, А.В. Рытикова

## **ТЕСТОВЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КМДП ИМС С ПОЛИКРЕМНЕВЫМ ЗАТВОРОМ**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время при разработке и производстве КМДП ИМС широко применяется параметрический контроль, заключающийся в измерении отдельных тестовых кристаллов, расположенных на рабочей полупроводниковой пластине [1,2]. Эти кристаллы содержат тестовые элементы, повторяющие отдельные компоненты или группы компонентов проектируемой микросхемы, а также специально разработанные тестовые структуры, позволяющие измерить электрофизические параметры элементов ИМС, отдельных технологических слоев и их межсоединений. Обычно на рабочей пластине располагаются от 3 до 5 тестовых кристаллов. Тестовые структуры в технологии производства ИМС могут использоваться для широкого круга задач, включая разработку и тестирование технологического процесса, контроль дефектов, тесты на надёжность, экстракцию параметров транзисторов и др. [1]. Помимо тестового кристалла наиболее важные тестовые элементы часто располагают в каждом кристалле разрабатываемой ИМС.

В данной работе приводится описание некоторых тестовых элементов, необходимых для контроля технологического процесса изготовления КМДП ИМС с поликремневым затвором и измерения электрофизических параметров подзатворного диэлектрика.

Для контроля качества КМДП ИМС с поликремневым затвором на ОАО «Восход» - Калужский радиоламповый завод был разработан тестовый модуль, представленный на рис. 1. В состав данного тестового модуля входят: структуры для измерения удельного поверхностного сопротивления диффузионных слоев методом Ван дер Пау; тестовые n- и p-канальные МДП-транзисторы; элементы для контроля качества электрических контактов; элементы для контроля точности выполнения фотолитографических процессов; МДП-конденсаторы, сформированные на n-подложке и p-диффузионной области («кармане») и др. Контроль качества подзатворного диэлектрика и границы раздела диэлектрик-полупроводник обычно осуществляется с использованием МДП-конденсаторов и тестовых МДП-транзисторов. При этом широко используются результаты C-V измерений, а также результаты измерений сдвига C-V характеристик или порогового напряжения МДП-транзисторов в результате термополевой обработки (на затвор подается положительное напряжение и образец выдерживается при повышенной температуре).

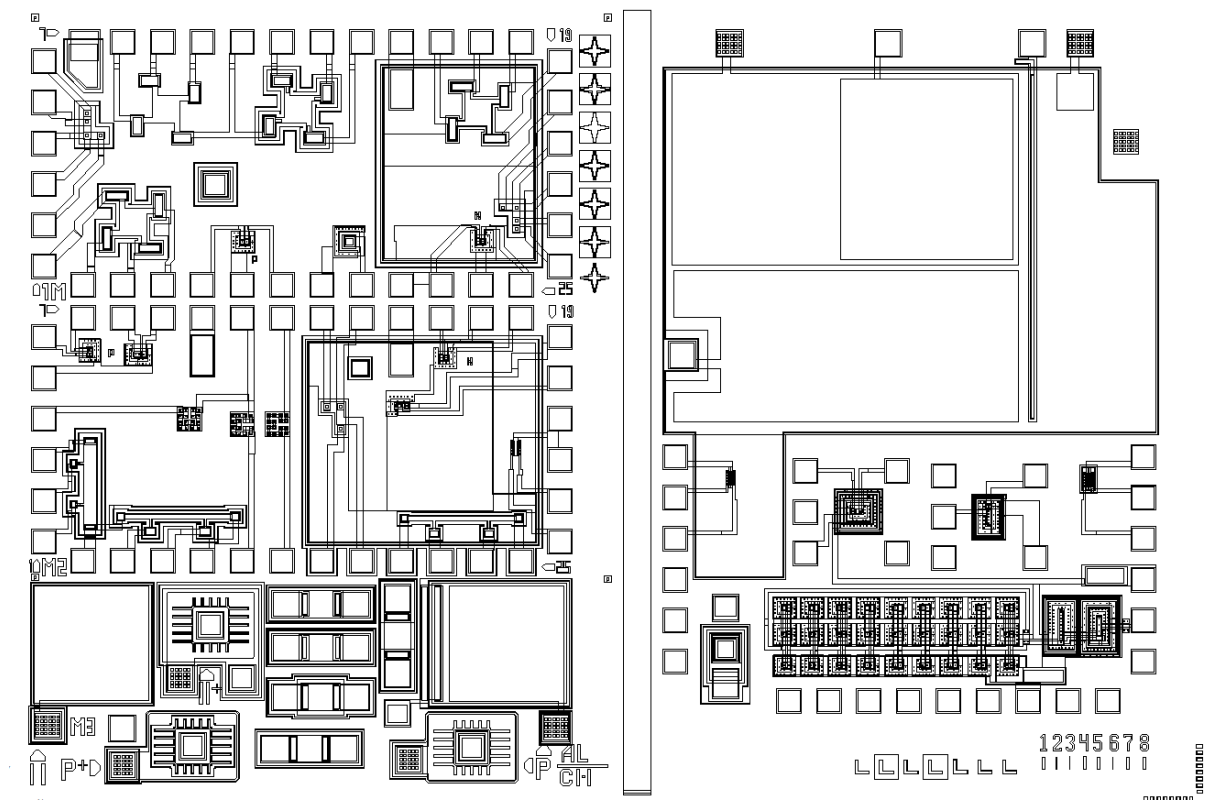


Рис. 1. Топология тестового модуля для контроля качества КМДП ИМС с поликремневым затвором

Надежность приборов и микросхем на основе МДП-структур главным образом определяется целостностью тонкопленочных диэлектриков. Исторически, надежность тонкопленочного диэлектрика определялась содержанием в нем дефектов. В общем случае собственное время жизни диэлектрика значительно превышает расчетное время функционирования устройства, но дефекты могут в значительной степени уменьшить время жизни диэлектрика [3-4].

В соответствии с принятыми стандартами [3-4] в настоящее время для контроля качества подзатворного диэлектрика в основном используются три метода проверки: метод возрастающего напряжения (V-Ramp), метод возрастающего тока (J-Ramp), метод постоянного тока (BoundedJ-Ramp). Каждый из этих методов относительно прост в реализации, удобен, оперативен в применении и может быть осуществлен на любом этапе процесса формирования диэлектрика. Однако для реализации этих методов необходимо предъявить специальные требования к тестовым МДП-конденсаторам. Тестовые конденсаторы должны быть спроектированы таким образом, чтобы эффекты паразитного последовательного сопротивления оказывали минимальное влияние. Высокое последовательное сопротивление может оказать существенное влияние на точность проводимых измерений. Это особенно актуально для высоких токов пробоя оксида, при которых значительное последовательное сопротивление приводит к заметному падению напряжения. Второе требова-

ние к тестовым конденсаторам – в затворах исследуемых структур должны отсутствовать механические напряжения. Механическое напряжение, присутствующее в затворе, может привести к повреждению прибора и неточным измерениям плотности дефектов. Рекомендуются, чтобы полярность приложенного к затвору напряжения смещала прибор в режим аккумуляции для минимизации влияния эффектов инверсной емкости, однако инверсия может быть использована в тех случаях, когда-либо конструкция прибора, либо внешние воздействия (температурой или светом) обеспечивают накопление неосновных носителей в инверсионном слое. Типичной для данных процедур является комнатная температура ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ), однако имеется возможность производить измерения и при иных рабочих температурах.

В работах [5,6] для исследования тонких диэлектрических пленок МДП-структур предложен новый метод управляемой токовой нагрузки. Этот метод позволяет контролировать характеристики подзатворных диэлектриков, а также исследовать процессы деградации и модификации МДП-структур при воздействии сильных электрических полей, радиационных облучений, плазменных обработок, инъекции горячих носителей и других стрессовых воздействий. Метод также дает возможность контролировать дефектность тонких пленок подзатворного диэлектрика МДП-приборов и влияние на неё различных обработок.

В отличие от стандартных методов исследования подзатворного диэлектрика, таких как метод постоянного тока и J-Ramp метод [3], в разработанном методе к МДП-структуре прикладывается специальный алгоритм токового воздействия, а характеристики диэлектрика контролируются по анализу временной зависимости напряжения, падающего на образце. При этом учитываются процессы заряда и разряда емкости МДП-структуры, а также захвата заряда в подзатворном диэлектрике. Заряд и разряд емкости МДП-структуры постоянной плотностью тока от режима инверсии до режима аккумуляции или наоборот позволяет получать низкочастотную C-V зависимость [5]. Учет процессов заряда емкости МДП-структуры и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур в инъекционном режиме дает возможность существенно повысить метрологические характеристики метода и уменьшить погрешности, возникающие при определении характеристик МДП-структур.

Для реализации статистического контроля качества подзатворного диэлектрика на основе выше описанных методов был разработан специальный тестовый модуль, содержащий МДП-конденсаторы. Разработанный тестовый модуль выполнен на кремниевой полупроводниковой пластине или на диффузионной области «кармана». Топология разработанного тестового модуля приведена на рис. 2. На его поверхности предусмотрены шестнадцать контактных площадок к структурам металл-диэлектрик-полупроводник различной площади. К контактным площадкам подключается контрольно-измерительная аппаратура, позволяющая проводить кон-



троль качества диэлектрической пленки на основе вышеописанных методик. Верхние электроды формировались с использованием фотолитографии по поликремневой пленке. Для удобства контактирования все контактные площадки сформированы на толстой пленке SiO<sub>2</sub>, а также изготовлены планарные контакты к подложке.

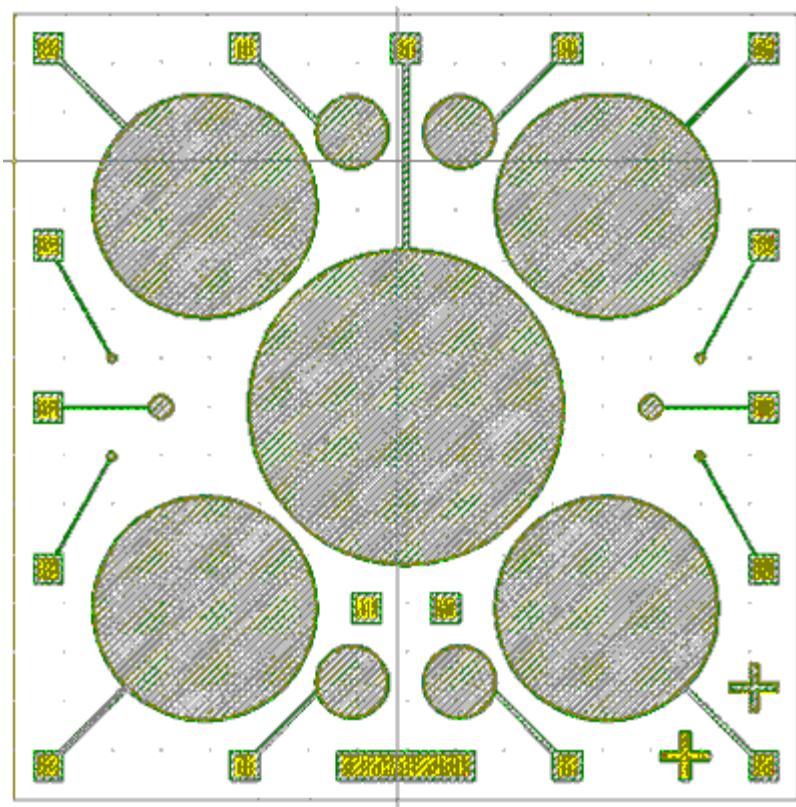


Рис. 2. Топология тестового модуля с МДП-конденсаторами

*Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117).*

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Технология СБИС. В 2<sup>х</sup> кн., кн. 2/ Под ред. Зи С.М. -М.: Мир, 1986.- С. 404.

[2] Сальников А.С., Ющенко А.Ю. Обзор тестовых структур для измерения электрофизических параметров материалов при изготовлении СВЧ монолитных интегральных схем// Доклады ТУСУРа, № 2 (22), часть 1, 2010. С.145-148.

[3] ОСТ 1120.9903-86.

[4] JEDEC Standard, JESD35–A: Procedure for the Wafer–Level Testing of Thin Dielectrics. 2001.

[5] 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.

[6] AndreevV.V., BondarenkoG.G., MaslovskyV.M., StolyarovA.A., AndreevD.V.Control current stress technique for the investigation of gate dielectrics of MIS devices// Phys. StatusSolidiC. 2015. V. 12. No. 3. P. 299–303.

**Андреев Владимир Викторович**—д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

**Дмитриев Виктор Геннадьевич** – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.E-mail: alalstol@mail.ru.

**Чернова Наталья Николаевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.E-mail: nataly\_mrr@gmail.com.

**Рытикова Александра Владимировна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.E-mail: sandramair555@gmail.com.

Чжо Зай, Ю.К. Гришин

## ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ПОБОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ

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

Рассмотрим величины, непосредственно измеряемые при исследовании эффекта Холла в режиме электродвижущая сила (ЭДС) Холла на примере образца, представленного на рисунке 1. Это не электрическое поле и плотность тока, а разности потенциалов (напряжения) и сила тока:

$$U_x = aE_x, I_x = bdj_x \text{ и } U_y = bE_y, \quad (1.1)$$

где  $a, b, d$  - длина, ширина и толщина образца.

$$U_y = -(b/a)\mu_H U_x B_z = -(1/d)R_H I_x B_z, \quad (1.2)$$

Анализируя (1.2), можно отметить следующую методическую особенность проведения измерений. При исследовании зависимости эффекта Холла в примесных полупроводниках от условий окружающей среды (например, от температуры) при  $B_z = \text{const}$  ЭДС Холла можно измерять в двух режимах: источника тока ( $I_x = \text{const}$ , тогда  $U_y$  — функция концентрации носителей  $n$ ) и источника напряжения ( $U_x = \text{const}$ , тогда  $U_y$  — функция подвижности носителей  $\mu_H$ ). В последнем случае зависимость контактного сопротивления токовых электродов от изменяемых условий окружающей среды должна быть пренебрежимо малой. Для исключения влияния сопротивления токовых электродов целесообразно продольное напряжение — напряжение проводимости  $U_\sigma$  — измерять зондовым методом (контакты 4 и 5 на рисунке 1).

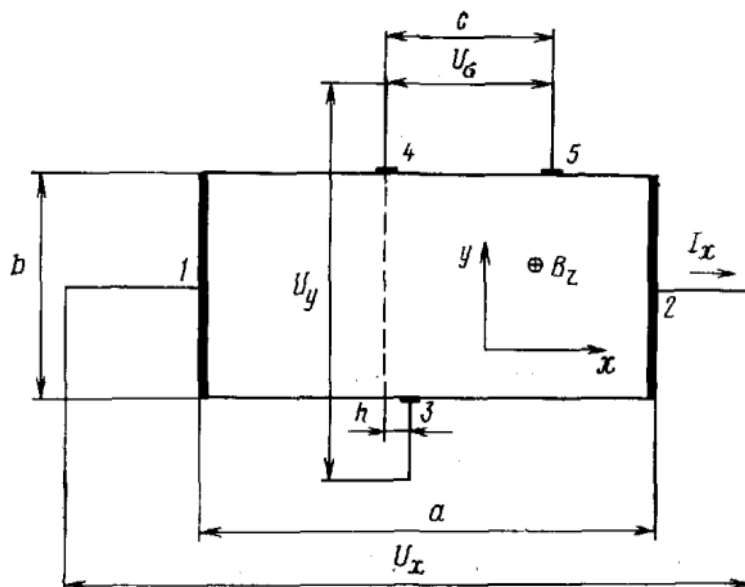


Рисунок 1. Образец для измерения эффекта Холла и электропроводности в режиме ЭДС Холла

Измерив напряжения ( $U_\sigma$  и  $U_y$ , ток  $I_x$  и индукцию магнитного поля  $B_z$ , можно определить три основных параметра электронного переноса (без учета знака заряда носителя):

$$\sigma = \frac{c}{bd} \frac{I_x}{U_\sigma}; \mu_H = \frac{c}{d} \frac{U_y}{U_\sigma} \frac{1}{B_z}; R_H = d \frac{U_y}{I_x} \frac{1}{B_z}. \quad (1.3) \text{ — } (1.5)$$

$$(1.37) \text{ — } (1.39)$$

Если при измерении входящих в формулы (1.3) — (1.5) величин используют единицы СИ, то значения  $\sigma$ ,  $\mu_H$  и  $R_H$  получают тоже в единицах СИ. Если применяют ранее широко распространенные внесистемные единицы, то правые части (1.3) и (1.5) следует умножить на  $10^8$ .

Точность полученных при исследовании гальваномагнитных эффектов данных зависит не только от тщательного анализа результатов измерений, но и от правильного учета влияния мешающих явлений. Так, мешающие явления вносят вклад в измеряемое суммарное напряжение на поперечных зондах Холла, которое можно выразить формулой

$$U_\Sigma = U_y + \sum_i U_i \quad (1.6)$$

где  $U_y$  и  $U_i$  — электродвижущая сила (ЭДС) Холла и ЭДС побочных эффектов соответственно. Только в магнитном поле, перпендикулярном внешнему электрическому и (или) температурному полям, может возникнуть 560 кинетических эффектов. Остановимся на восьми основных источниках побочных эффектов [1]. К ним относятся:

ЭДС неэквипотенциальности, или асимметрии зондов Холла;  $U_A$ , обусловленная падением напряжения при протекании первичного тока  $I_x$  через участок образца сопротивлением  $R_h$ , заключенного между сдвинутыми на расстояние  $h$  зондами Холла (см. рисунок 1);

ЭДС магниторезистивного эффекта  $U_M$ , обусловленная модуляцией сопротивления  $R_h$  магниторезистивным эффектом; термоЭДС  $U_T$ , возникающая в холловской цепи на контактах полупроводник - металл зонда Холла при различии температур в поперечном направлении между зондами Холла;

ЭДС Эттингсгаузена  $U_E$  — термоЭДС в цепи зондов Холла. Она связана с разностью температур на холловских гранях образца, обусловленной тем, что носители, скорость которых в скрещенных полях  $E_x$  и  $B_z$  отличается от средней, отклоняются к холловским граням, причем быстрые носители отдают энергию решетке полупроводника и нагревают одну холловскую грань образца, а медленные пополняют свою энергию за счет охлаждения решетки на другой холловской грани;

ЭДС Нернста — Эттингсгаузена  $U_{NE}$ , отличающаяся от  $U_E$  тем, что поток носителей обусловлен не электрическим полем  $E_x$ , а тепловым

$dT/dx$ , причем носители, движущиеся от «горячего» токового электрода к «холодному», имеют большую энергию по сравнению с носителями, движущимися в обратном направлении;

ЭДС Пельтье — Нернста — Эттингсгаузена  $U_{PNE}$ , отличающаяся от  $U_{NE}$  тем, что температурное поле  $dT/dx$  обусловлено эффектом Пельтье — выделением или поглощением теплоты при прохождении тока  $I_x$  через контакт токового электрода с образцом;

ЭДС Риги — Ледюка  $U_{RL}$ , отличающаяся от  $U_{NE}$  тем, что в данном случае подразумевается термомагнитный эффект — аналог эффекта Холла, в котором продольное температурное поле  $dT/dx$  приводит к появлению поперечного температурного поля  $dT/du$  в скрещенном магнитном поле  $B_z$ ; ЭДС Пельтье — Риги — Ледюка  $U_{PRL}$ , отличающаяся от  $U_{RL}$  тем, что температурное поле  $dT/dx$  обусловлено эффектом Пельтье. Например, при исследовании полупроводника с малой подвижностью носителей порядка  $10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В.с})$  для получения усредненной ЭДС Холла с погрешностью около 10% погрешность измерителя напряжения должна быть не хуже 0,001%. Здесь приходится сталкиваться не только с проблемой прецизионных измерений, но и с нестабильностью сопротивления  $R_h$  участка образца, а также его отношения к сопротивлению всего образца. Поэтому вряд ли можно согласиться с предложением некоторых авторов использовать для измерений напряжения только два зонда 3 и 5, а значения напряжений  $U_y$  и  $U_\sigma$  получать соответствующим усреднением. Поэтому при изготовлении образцов зонды Холла 3, 4 следует располагать как можно точнее друг против друга. Выполняя усреднение  $U_\Sigma$  по двум направлениям  $E_x$  и  $B_z$ , можно исключить ЭДС всех побочных явлений, кроме трех:  $U_E$ ,  $U_{PNE}$  и  $U_{PRL}$ .

Поэтому для уменьшения влияния термомагнитных эффектов, которое существенно в высокопроводящих полупроводниках, необходимо принимать тщательные меры для соблюдения изотермических условий эксперимента. Однако может возникнуть ситуация, когда усреднение не устраняет влияния магниторезистивного эффекта Холла. Это произойдет, если нарушить условие: направление магнитного поля  $B_z$  должно совпадать с направлением симметрии кристалла. В случае питания образца от источника а напряжения ( $U_x = \text{const}$ ) при отсутствии зависимости контактного сопротивления токовых электродов от магнитного поля  $U_M = 0$ , так как отношение сопротивлений  $R_h / R_{12} = \text{const}$ , где  $R_{12}$  — сопротивление образца между токовыми электродами. ТермоЭДС может внести погрешность при измерении продольного напряжения проводимости  $U_\sigma$  при наличии тем-

пературного поля  $dT/dx$ , особенно в высокопроводящих полупроводниках, когда  $U_{\sigma}$  мала.

Следует помнить, что на неоднородностях имеются локальные джоулевые тепловыделения, величины которых меняются в скрещенных электрическом и магнитном полях [2]. Теоретические исследования [3] показали, что на гальваномагнитные эффекты в малых образцах может оказать влияние -так называемый тепловой размерный эффект. Этот эффект обусловлен длиной остывания, т. е. связан с диффузионной длиной и выравниванием энергии в подсистеме. Длина остывания для полупроводников  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  см.

Следовательно, она сравнима с размерами образцов микроэлектроники. Размерный тепловой эффект приводит к появлению термотоков, которые, взаимодействуя с магнитным полем, вызывают термомагнитные эффекты и тем самым могут существенно изменить закономерности гальваномагнитных эффектов. Так, при толщине образца, сравнимой с длиной остывания, тепловой размерный эффект может в несколько раз изменить напряженность холловского поля, а также его знак. Вырождение смягчает влияние размерного эффекта.

Тепловой размерный эффект также оказывает влияние на магниторезистивный эффект, увеличивая или уменьшая его, а также меняя знак. В тонких по сравнению с длиной остывания образцах магниторезистивный эффект может исчезнуть полностью.

### Список литературы

[1] Кучис Е.И. *Методы исследования эффекта Холла*. Москва, Советское радио, 1974, 328 с.

[2] Резцов В.Ф. *О локализации джоулева тепловыделения на неоднородностях в скрещенных электрических и магнитных полях. Теплофизика высоких температур*. 1981, Т. 19, № 6, с. 1299-1301.

[3] Басс Ф.Г., Бочков В.С., Гуренич Ю.Г. *Электроны и фононы в ограниченных полупроводниках*. Москва, Наука, 1984, 288 с.

**Чжо Зай** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawzay49@gmail.com.

**Гришин Юрий Кузьмич** – преп. КФМГТУ им. Н.Э. Баумана.

## **СЕКЦИЯ 4.**

# **ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ**

С.Г. Смоляр, А.В. Землянский

## **АНАЛИЗ РЫНКА, ВОЗМОЖНОСТИ И СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ГПА МОЩНОСТЬЮ СВЫШЕ 25МВт НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ**

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

**Введение.** Российская Федерация обладает большими запасами природного газа и имеет большую и весьма развитую систему трубопроводного транспорта для его транспортировки. Ранее, когда стоимость природного газа была сравнительно не высока, на отечественных компрессорных станциях (далее КС) получили широкое применение газоперекачивающие агрегаты (далее ГПА) малой мощности, что также обуславливает относительно не большое расстояние между КС. В современных реалиях Газпром (основной владелец газотранспортной системы РФ) нуждается в ГПА большей мощности.

**Сравнение ГПА малой и большой мощности.** В ходе анализа были выявлены плюсы и минусы ГПА высокой мощности, в сравнении с ГПА малой мощности.

Достоинства ГПА высокой мощности:

1. Высокая экономичность и КПД.
2. Высокая единичная мощность установки.
3. Более низкая удельная стоимость.
4. Возможность применения для транспортировки газа более высокого давления.

Недостатки ГПА высокой мощности:

1. Более высокие удельные параметры требуют более совершенных материалов и технологий при создании.
2. Большая масса и габариты конструкции.

В следствии этого обуславливаются основные причины перехода к ГПА большей мощности:

- возможно увеличение расстояния между КС и рабочего давления в газопроводе.
- становится возможным применение новых схем резервирования ГПА на КС, что может снизить капитальные затраты на ветку магистрального газопровода в целом.

**Анализ рынка отечественных ГПА** показал, что всего одно предприятие наладило выпуска ГПА свыше 25МВт – АО «РЭП Холдинг», являющееся дочерним предприятием ПАО «Газпром». Предприятие производит ГПА-32 «Ладога», разработанное на основе семейства газотурбинных установок MS5002. Производство и сборка ГПА-32 «Ладога» осуществляется на производственных мощностях «Невского Завода» по лицен-



зии и в сотрудничестве с GE Oil & Gas. Агрегат «Ладога-32» предназначен для транспортировки природного газа по магистральным газопроводам. КПД установки составляет порядка 36%. В составе ГПА используется нагнетатель природного газа 400-21-1С. В данный момент другие предприятия РФ не могут предложить привод для ГПА подобной мощности. В области нагнетателей высокой мощности – ряд отечественных предприятий проработали данный вопрос и готовы, при наличии спроса, организовать выпуск нагнетателей мощностью 32 МВт, с применением магнитного подвеса и сухих уплотнений.

На КС в России применяется различный, как по мощности, так и по типу привода, спектр ГПА. Большинство ГТУ для приводов нагнетателей природного газа являются конвертированными из авиационных, что обуславливает их лёгкость, простоту монтажа и транспортировки. В тоже время конвертированные установки обладают, как правило, менее высоким КПД относительно стационарных установок и меньшим сроком службы. Применение конвертированных ГТУ позволяет унифицировать основные узлы конструкции, снизить затраты на установку и эксплуатацию, однако подход к конвертированию на отечественных и зарубежных предприятиях различен: на отечественных – предпочитают вносить минимум изменений (ярким примером может служить НК-16-18СТ, созданный на основе НК-8-2У); иностранные предприятия используют более глубокую конвертацию, что позволяет получить более высокие показатели КПД (например, Trent 60).

Особо остро встаёт вопрос наличия ГПА высокой мощности при организации транзита газа через моря. Яркий пример - строительство КС «Портовая». Были применены исключительно иностранные ГПА. Согласно контракту, подписанному ООО «Газкомплекстимпэкс» (100%-ное дочернее предприятие ОАО «Газпром»), с 2002 г. централизованный поставщик материально-технических ресурсов для дочерних обществ и организаций «Газпрома») и компанией Rolls-Royce, в 2010 г. на объект были поставлены 6 ГПА с газотурбинными двигателями Trent 60 мощностью 50 МВт и 2 ГПА с газотурбинным приводом RB211 мощностью 27 МВт. Компания Rolls-Royce была признана победителем открытого конкурса в июне 2008 г., сделав лучшую заявку по соотношению цена-качество в рамках единого технологического цикла. Отечественные предприятия не смогли в полной мере участвовать в конкурсе, т.к. не производят ГПА мощностью 50 МВт.

В результате организации производства ГПА-32 «Ладога» - на рынок вышел отечественный производитель, чья продукция повсеместно внедряется. Так 14 ГПА должны быть поставлены на КС «Русская», также ГПА будет применяться на КС «Новый порт» и ряде других.

Однако, конкуренция – движитель прогресса и появление иных моделей отечественных ГПА мощностью свыше 25МВт, даст новый толчок в развитии отечественных ГПА.

**Анализ возможных вариантов создания отечественных ГПА** показал, что создание кардинально новых конструкций повлечёт большие материальные затраты и многие предприятия не рискуют начинать заниматься этим, учитывая, что конкретных заказов нет. Однако, возможно рассмотрение нескольких вариантов с применением уже существующих технологий.

1. Конвертирование энергетических, стационарных ГТУ под нужды ГПА. Может сопровождаться минимумом изменений. Например, существует газотурбинный привод ГТП-30-300, работающий в составе ГТЭ-30-300. Обеспечивающий показатели КПД порядка 36%, также установка может работать в когенерационном цикле, что позволяет достичь эффективности использования тепла 85.6%. Газотурбинный привод ГТП-30-300 создан на базе двухконтурного двигателя P79B-300, в котором установлен новый компрессор низкого давления большей напорности. ГТП рассчитан на ресурс 100000 часов. Стоит отметить, что MS5002E, применяемая в составе ГПА-32 «Ладога» - является турбиной многоцелевого назначения, применяемая, также и для привода электрогенераторов.

2. Форсирование уже существующих двигателей – один из самых распространённых способов создания установок большей мощности. Например, НК-16СТ был форсирован до НК-16-18СТ, который, в свою очередь, был форсирован до НК-16-20СТ. Стоит заметить, что у данного двигателя имеется возможность дальнейшего форсирования, путем повышения удельных параметров газа. Данный способ требует малых материальных затрат. При этом сохраняется конструкция и основные узлы двигателя, что позволяет в полной мере использовать базу знаний, полученную в ходе эксплуатации не форсированного варианта.

3. Масштабное моделирование – малоразвитое направление. Отличается сохранением принципов конструкции, но изменением их размеров, как привило, в данном случае сохраняется конструктивная схема и удельные параметры газа, но увеличивается его расход. Таким образом мы получаем ГТУ большей мощности, но с отработанной конструктивной схемой.

4. Совмещение нескольких газогенераторов для работы на одну силовую турбину. В данном случае требуется разработка нового агрегата силовой турбины и усовершенствование системы автоматического регулирования, т.к. требуется обеспечение высокой синхронности работы всех газогенераторов в установке. Несмотря на малые затраты на создание, имеет ряд существенных минусов: большая масса и габариты, высокая стоимость готовой установки (при создании 32МВт ГТУ с применением 2-х 16МВт газогенераторов стоимость установки превысит стоимость 2-х 16МВт уста-

новок, т.о. с увеличением мощности установки получим не снижение удельной стоимости агрегата, а увеличение таковой).

**Заключение.** В данный момент отечественными предприятиями предлагается только одно решение ГПА мощностью более 32МВт, однако, анализ возможных вариантов создания отечественных ГПА показал, что возможно создание подобных установок с применением отечественных технологий без высоких материальных затрат на конструкторскую разработку.

#### **Список использованных источников**

1. ОАО "АМНТК "Союз" [Электронный ресурс]. - <http://www.amntksoyuz.ru/>. – (дата обращения: 01.11.2015)
2. Официальный сайт ОАО КПП "Авиамотор". Республика Татарстан. г. Казань. [Электронный ресурс]. - <http://www.aviamotor.ru/>. – (дата обращения: 01.11.2015)
3. ПАО «Газпром» [Электронный ресурс]. - <http://www.gazprom.ru/>. – (дата обращения: 01.11.2015)
4. Журнал "Газотурбинные технологии" - Турбо Новости [Электронный ресурс]. - <http://www.gtt.ru/>. – (дата обращения: 01.11.2015)
5. РЭП Холдинг [Электронный ресурс]. - <http://www.reph.ru/>. – (дата обращения: 01.11.2015)
6. Rolls-Royce [Электронный ресурс]. - <http://www.rolls-royce.com/>. – (дата обращения: 01.11.2015)

**Смоляр Сергей Григорьевич**– студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: smolyar\_sergei@mail.ru.

**Землянский Анатолий Васильевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zemlyansky.k1kf@yandex.ru.

А.В. Землянский, Д.И. Филинков

## АНАЛИЗ СХЕМ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

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

Газотурбинные вспомогательные силовые установки – предназначены для пуска основных двигателей самолетов, питания сжатым воздухом систем кондиционирования, привода электрогенераторов и другого вспомогательного оборудования. ВСУ обеспечивает независимость самолета от наземных источников питания, надежный пуск основных двигателей и кондиционирование салонов самолета при базировании на аэродромах. В полете ВСУ может быть использована в качестве аварийного источника питания, что повышает безопасность самолета.

ВСУ состоит из маломощного газотурбинного двигателя и агрегатов для отбора от него механической (электрической) энергии и сжатого воздуха.

Газотурбинные ВСУ с отбором механической энергии выполняются по двум принципиальным схемам: одновальной и со свободной турбиной.

Газотурбинные ВСУ с отбором сжатого воздуха выполняются по следующим принципиальным схемам: одновальной с общим компрессором, одновальной с дополнительным компрессором, двухвальной с дополнительным компрессором, двухвальной с общим компрессором каскада низкого давления.

Требования по отбору сжатого воздуха определяют параметры ВСУ. Существующие ВСУ можно разделить на четыре основные группы (типоразмера):

1. ВСУ с расходом отбираемого воздуха  $G_{отб} \leq 0,5 \text{ кг/с}$  и давлением  $P_{отб}^* \approx 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , ( $N_{э.в.} \leq 60 \text{ кВт}$ );
2. ВСУ с  $G_{отб} = 0,8 - 1,0 \text{ кг/с}$  и  $P_{отб}^* \approx 3,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , ( $N_{э.в.} \approx 125 \text{ кВт}$ );
3. ВСУ с  $G_{отб} = 1,5 \text{ кг/с}$  и  $P_{отб}^* \approx (4,5 - 5,5) \cdot 10^5 \text{ Па}$ , ( $N_{э.в.} \approx 300 \text{ кВт}$ );
4. ВСУ с  $G_{отб} = 3,5 \text{ кг/с}$  и  $P_{отб}^* \approx (3,0 - 4,0) \cdot 10^5 \text{ Па}$ , ( $N_{э.в.} \approx 500 \text{ кВт}$ ).

Были проанализированы схемы с отбором сжатого воздуха, выявлены достоинства и недостатки.

В качестве примера взята схема одновальной газотурбинной ВСУ с дополнительным компрессором. Проведен термодинамический расчет при нормальных стандартных условиях. Принципиальная схема установки, показана на рис.1.

С целью улучшения массогабаритных показателей предложена схема, в которой компрессор двигателя и дополнительный компрессор превращены в компрессор двухстороннего входа. Схема показана на рис.2.

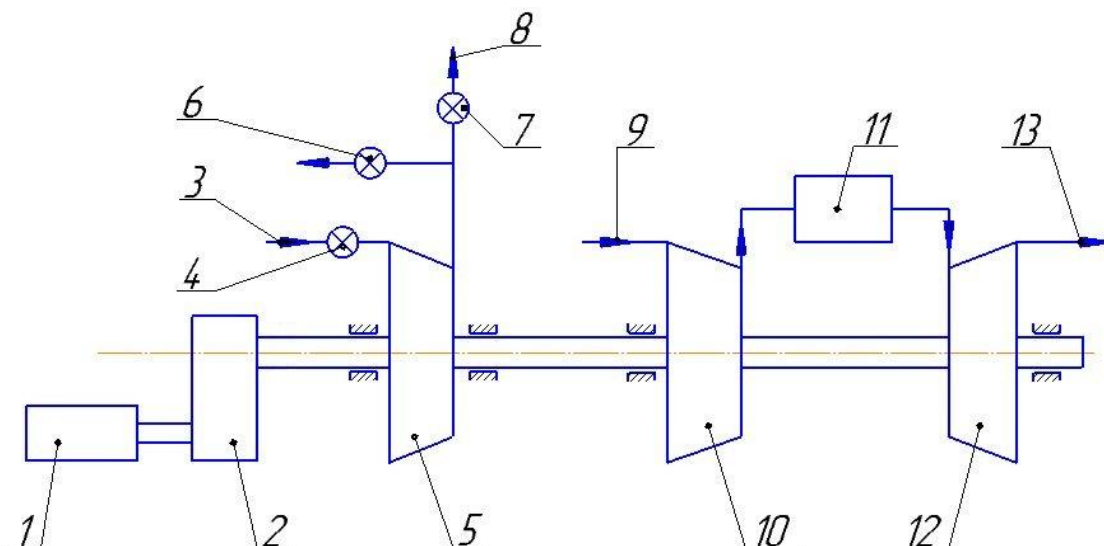


Рис. 1 Принципиальная схема одновальной ВСУ с дополнительным компрессором.

Где: 1 – потребитель механической энергии; 2 – редуктор; 3 – вход воздуха в дополнительный компрессор; 4 – поворотный входной направляющий аппарат; 5 – дополнительный компрессор; 6 – клапан перепуска; 7 – клапан отбора; 8 – сжатый воздух к потребителю; 9 – вход воздуха; 10 – компрессор; 11 – камера сгорания; 12 – турбина; 13 – выпуск газов.

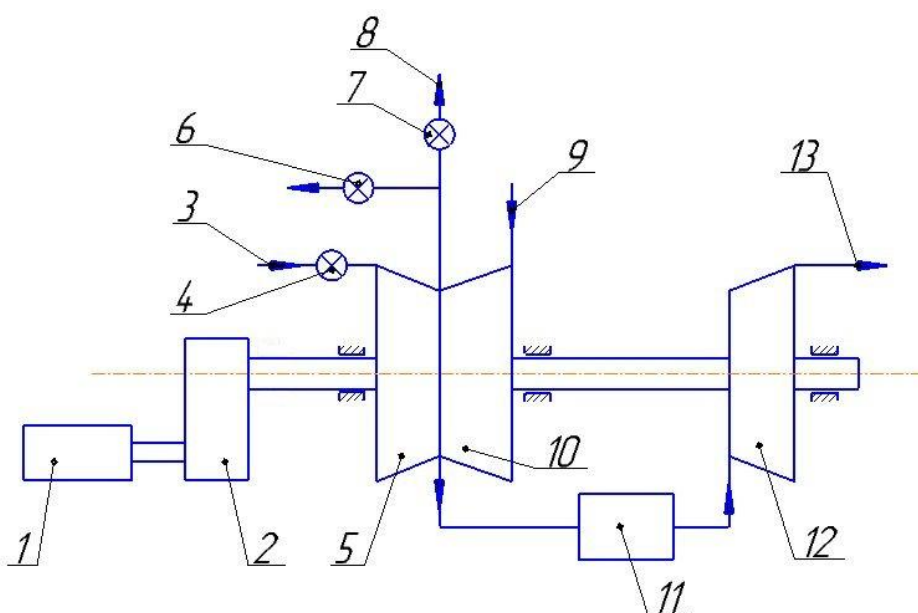


Рис. 2 Принципиальная схема одновальной ВСУ с дополнительным компрессором.

Где: 1 – потребитель механической энергии; 2 – редуктор; 3 – вход воздуха в дополнительный компрессор; 4 – поворотный входной направляющий аппарат; 5 – дополнительный компрессор; 6 – клапан перепуска; 7 – клапан отбора; 8 – сжатый воздух к потребителю; 9 – вход воздуха; 10 – компрессор; 11 – камера сгорания; 12 – турбина; 13 – выпуск газов.

Проведен термодинамический расчет проточных частей двигателя и дополнительного компрессора в зависимости от температуры перед турбиной и степени повышения давления как при разных степенях повышения давления, так и при одинаковых.

**Заключение.** Проведенные расчеты позволили обосновано выбрать конструктивную схему вспомогательного газотурбинного двигателя для проектирования.

#### **Список использованных источников**

1. Поляков А. М., Шальман Ю. И., Кричакин В. И. *Авиационные газотурбинные вспомогательные силовые установки*. Москва, изд-во «Машиностроение», 1978, – 200 с., ил.
2. Ржавин Ю. А. *Осевые и центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов*. Москва, из-во МАИ, 1995. – 344 с., ил.
3. Скубачевский Г. С. *Авиационные газотурбинные двигатели*. Москва, из-во «Машиностроение», 1969, – 547 с., ил.
4. Лапин Ю. Д., Карышев А. К. *Расчет осевой газовой турбины*. Москва, из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002 – с.

**Землянский Анатолий Васильевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zemlyansky.k1kf@yandex.ru.

**Филинков Дмитрий Игоревич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: demon\_0178@mail.ru.

УДК 621.514

И.В. Филиппов, В.В. Дьячук, С.В. Клещев

## **ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЕ КАК ОДИН ИЗ СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ В ПНЕВМОУСТАНОВКАХ**

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

Возникающие в машинах вибрационные процессы высокоинформативны, достаточно полно отражают техническое состояние многих узлов и деталей, а также характер протекания рабочих процессов. Однако, определение необходимой для исследования информации, её получение, анализ и использование достаточно сложно и во многом обуславливается связями вибропроцессов с диагностируемыми параметрами, а эти связи отличаются многообразием [1].

В данной работе предлагается методика использования результатов вибродиагностирования для контроля технического состояния и предотвращения аварийных ситуаций при эксплуатации пневмоустановок, имеющих в своем составе винтовые компрессора (в дальнейшем – ВК). Примером таких установок могут служить компрессоры серии KB (KB-9/10, KB-10/8, KB-10/10, KB-10/12, KB-12/12), серий XAS, XRVS и XRXS фирмы «AtlasCopco», серии ДЭН. Все названные компрессоры широко применяются в строительной, горнодобывающей, газовой и др. отраслях и относятся опасным производственным объектам, на которые распространяется действие Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности, например, «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности», утвержденные 12 марта 2013 года №101.

Назначением вибродиагностирования ВК, по мнению авторов, является оценка отклонения технического состояния компрессора от основного режима по изменению свойств вибрационных процессов.

Применение вибродиагностики ставит перед исследователем множество задач: в том числе, какие параметры вибрационных процессов использовать для оценки; в каких точках машины или механизма производить их измерение; какой применить метод выделения и представления информации и т.д. Но в первую очередь, по всей видимости, необходимо ответить на вопрос о принципиальной возможности использования виброинформации для оценки состояния машины и протекающих в ней процессах (в нашем случае, машина – это ВК, процессы – это фаза нагнетания).

При работе ВК в аномальных режимах в момент соединения полостей сжатия с камерой нагнетания происходит процесс выравнивания давлений, который протекает весьма интенсивно и сопровождается сложными

газодинамическими явлениями – начальными разрывами (в дальнейшем – НР) и их распадами.

Экспериментальные исследования, проведённые на ВК типа 6ВКМ-25/8 обработка и анализ полученных данных, дали следующие результаты:

определены точки, вибрационные параметры в которых наиболее полно отражают техническое состояние компрессоров;

наиболее информативным для дальнейшего анализа вибропараметром определено виброускорение, а, именно, его пиковое значение;

с целью повышения отношения «сигнал/шум» и выделения пиковых значений виброускорений, использован метод стробирования;

установлено наличие достаточно тесной корреляционной связи между соотношением давлений внутреннего сжатия и в камере нагнетания  $K_d$ , характеризующим степень «анормальности» режима работы компрессора, и вибрационными параметрами.

Экспериментальные исследования вибрационных процессов проводились с использованием высокоточного трёхканального виброизмерительного комплекта SM231 (11003). Полученная информация о виброускорениях, вводилась в программу, работающую в среде математической системы MATLAB 6.0 (SignalProcessingToolbox). Метод стробирования реализовывался заданием фильтра, отслеживающего пиковые значения виброускорения в моменты времени, соответствующие фазе нагнетания компрессора. Результаты представлены на рисунках 1 и 2.

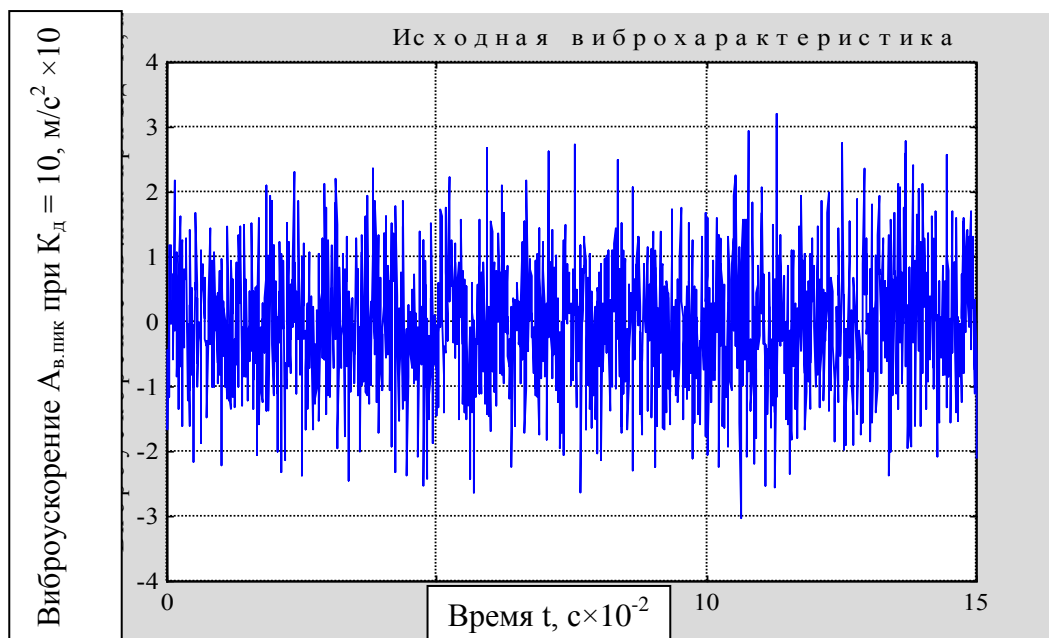


Рис. 1. Исходные данные





Рис. 2. Результаты стробирования виброинформации

В результате анализа виброинформации получены выборочные средние значения пикового виброускорения  $A_{в.пик}$  для различных значений  $K_d$ . Корреляционный анализ полученных данных показал наличие тесной связи между  $A_{в.пик}$  и  $K_d$ : коэффициент корреляции в среднем составил 0,969. Регрессионный анализ экспериментальных данных, позволил получить уравнение регрессии:

$$A_{в.пик} = -1767,6 + 1795,5 \exp\left[-\frac{(K_d - 20,13)^2}{277,8^2}\right], \text{ м/с}^2. \quad (1)$$

В таблице 1 приведены данные регрессионного анализа параметров газа после распада НР. В качестве исходных данных для поиска уравнений регрессии  $T_{ув} = f_2(K_d)$  и  $V_{ув} = f_3(K_d)$ , где  $T_{ув}$ , и  $V_{ув}$  – температура газа и скорость ударной волны (в дальнейшем – УВ), возникшей после распада НР, принимаются результаты вычислений [2, 3]. Итоги регрессионного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения регрессии типа  $Y = A + B \exp\{-[(K_d - C)/D]^2\}$

Y	A	B	C	D	R <sup>2</sup>
$T_{ув}$	-31900,5	32394,6	18,124	209,158	0,9752
$V_{ув}$	-62769,3	63441,8	18,653	195,947	0,9747
$A_{в.пик}$	-1767,60	1795,45	20,134	277,804	0,9914

Примечание:  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

Практически адекватная реакция параметров УВ ( $T_{ув}$  и  $V_{ув}$ ) и пикового значения виброускорения  $A_{в.пик}$  на изменение величины  $K_d$ , является об-

стоятельством, свидетельствующем о большой степени правдоподобия выдвинутой гипотезы о существовании начальных разрывов в ВК при работе в аномальных режимах.

Подводя итог проведённым теоретическим и экспериментальным исследованиям вибрационных процессов, происходящих в ВК при работе в аномальных режимах, можно сделать следующие выводы:

- вибродиагностика позволяет определить режим работы ВК по изменению свойств вибрационных процессов, а значит, предупредить о появлении возможности перехода ВК в аварийный режим;

- установлена достаточно тесная связь между параметрами газа после распада НР (а, значит, уровнем «анормальности» режима работы компрессора) и параметрами вибрационных процессов, сопровождающих работу ВК;

- стробирование виброинформации позволило установить, что пиковое значение виброускорения совпадает по времени с началом фазы нагнетания.

#### **Список цитированных источников**

1. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. –М.: Машиностроение, -1987. –288 с.

2. Филиппов И.В. Ударные волны в винтовых маслозаполненных компрессорах. // Изв. Вузов. Машиностроение. –1995, -№1-3, -С. 26-32.

3. Филиппов И.В. Начальный разрыв и его распад в винтовых компрессорах. // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. –1996, -№568, -С.118-123.

**Филиппов Иван Владимирович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fiv61@yandex.ru.

**Дьячук Виктор Васильевич** –директор ООО "Энергопрогресс". E-mail: kalygenergoprogress@yandex.ru.

**Клещев Сергей Владимирович** –эксперт по газовому оборудованию ООО "Энергопрогресс". E-mail: kie-tanya@mail.ru.

УДК 621.514

И.В. Филиппов, В.В. Дьячук, С.В. Клещев

## **К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ВЗРЫВОВ МАСЛООТДЕЛИТЕЛЕЙ**

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

Маслоотделители являются одним из наиболее важных узлов винтовых маслозаполненных компрессоров (в дальнейшем ВКМ). В них из компрессора поступает масловоздушная смесь с абсолютным давлением до 0,8 МПа и температурой (в номинальном режиме работы) 370 ... 390 К. Следовательно, они подпадают под Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением», утвержденные приказом Ростехнадзора от 25 марта 2014 года N 116.

Опыт эксплуатации ВКМ на ряде промышленных предприятий страны показал, что, несмотря на достаточно высокий уровень надёжности компрессоров этого типа, имеются случаи отказов (аварий), заключающиеся в воспламенении масловоздушной смеси. Анализ статистических данных натурных наблюдений за эксплуатацией сорока ВКМ типа 6ВКМ-25/8, работающих на карьерах Ингулецкого, Качканарского ГОКов и комбината «Ураласбест», показал, что вероятность безотказной работы ВКМ в течение 500 часов составляет 0,52, а наибольшее количество отказов приходится на маслоотделитель – 17%. Изучение материалов о наработках ВКМ типов 6ВКМ-25/8 (4 шт.) и 7ВКМ-32/8 (3 шт.), полученных авторами на карьере «Мукуланский» Тырныаузского комбината, даёт несколько лучшие показатели надёжности: коэффициент технического использования – 0,824, коэффициент технической готовности – 0,857. Пристальное внимание к проблеме надёжности (безопасности) ВКМ обусловлено тем обстоятельством, что на практике авария, заключающаяся в воспламенении масловоздушной смеси, зачастую приводила к взрыву компрессоров. Основная масса взрывов приходится на маслоотделитель и камеру нагнетания.

Исследования, проведенные авторами, позволили сделать вывод, что примененный в ВКМ типа 6ВКМ-25/8 способ регулирования производительности, сам регулятор и реализуемый им закон регулирования, не удовлетворяют условиям нормальной и эффективной работы компрессора, в частности, во время «глубокого» дросселирования нарушаются температурные режимы в камере нагнетания. Это продемонстрировано на рисунке 1.

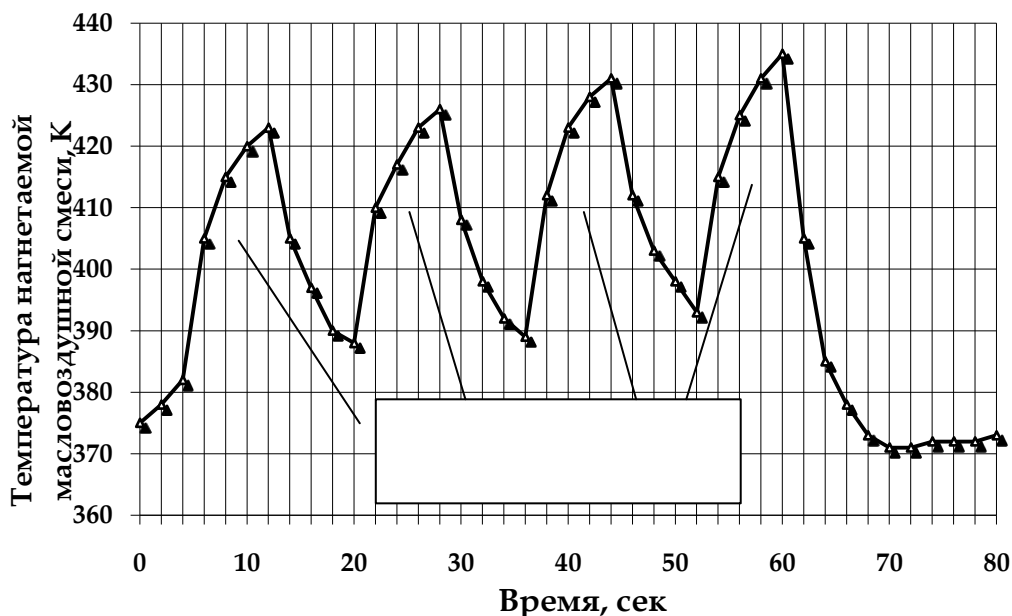


Рис. 1 Временная диаграмма температуры нагнетаемой масловоздушной смеси.

Из приведенных данных видно, что во время периодов «глубокого» дросселирования, температура масловоздушной смеси достигает 140 ... 150 °С. В тоже время, соотношение «масло – воздух»  $N_m$ , при обычной работе ВКМ составляющее 8 ... 10, достигает больших значений – 25 и более.

Согласно исследованиям, проведённым различными учёными, взрывоопасное содержание масла в воздухе составляет 30...42 мкг/литр [1 - 3]. Такое содержание масла в воздухе может быть достигнуто при массовом соотношении «масло - воздух»  $N_{mv} = 30...40$ .

После 1000 часов работы компрессора в режимах с «глубоким» дросселированием была взята проба компрессорного масла. Физико-химический анализ масла показал его неполное соответствие требованиям ПТЭ и ПТБ, а обследование маслобака и фильтров – наличие смолистых и нагаромазляных отложений.

Несомненно, все это негативно сказывается на надежности и безопасности работы ВКМ. В итоге можно сделать вывод, что одной из возможных причин взрывов маслоотделителей ВКМ может быть применение штатной системы автоматического регулирования производительности ВКМ, которая допускает режимы «глубокого» дросселирования.

### Список цитированных источников

1. Компрессорные машины. /Страхович К.И., Френкель М.И., Кондряков И.К. и др. –М.: Госторгиздат, -1961. –600 с.
2. Ильичёв А.С. Рудничные пневматические установки. В 3 т. Т. 3. – М.: Углетехиздат, -1953. –428 с.

3. Screw Compressor for Gas Turbine Fuel Gas Boosting.// Diesel & Gas Turbine Worldwide. –1999, №9, -С. 46-48.

**Филиппов Иван Владимирович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fiv61@yandex.ru.

**Дьячук Виктор Васильевич** –директор ООО "Энергопрогресс". E-mail: kalygenergoprogress@yandex.ru.

**Клещев Сергей Владимирович** –эксперт по газовому оборудованию ООО "Энергопрогресс". E-mail: kie-tanya@mail.ru.

УДК 621.438

Е.Г. Липихин, Д.В. Шевелев

## **КОГЕНЕРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА С ГАЗОВОЙ МИКРОТУРБИНОЙ ИЗМЕНЕННОЙ ОЧЕРЕДНОСТИ ПРОЦЕССОВ**

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

Обеспечение тепловой и электрической энергией малых жилых и производственных помещений является одной из важнейших задач энергетики. В настоящее время все больше потребителей стремится к независимости от сетей центрального энергоснабжения. Для решения этой задачи интенсивно разрабатываются различные типы систем [1]. Например, возможна замена стандартного водогрейного котла на когенерационную установку малой мощности (микроТЭЦ). В этом случае на первый план становится вопрос о типе первичного двигателя. Здесь могут вполне успешно применяться газовые микротурбины с полезной мощностью 3-10 кВт, использующие технологию серийных турбокомпрессоров (ТКР). Использование серийных технологий снижает затраты на производство, что делает турбомашину более конкурентоспособными по сравнению с другими типами двигателей.

Цель работы: анализ основных показателей эффективности работы газовой микротурбины обратной очередности термодинамических процессов, встроенной в систему водогрейного котла для совместной выработки тепловой и электрической энергии.

Схема когенерационной установки представлена на Рисунке 1а. В горелочном устройстве 1, размещенном в корпусе котла при атмосферном давлении происходит сжигание топлива, продукты сгорания направляются в энергетический модуль. В турбине 2, продукты сгорания совершают полезную работу при расширении до давления ниже атмосферного, и, затем, направляются в основной газо-водяной теплообменный аппарат котла 3 (ГВТА 1), где отдают часть своей тепловой энергии сетевой воде. После теплообменного аппарата продукты сгорания поступают в компрессор 4, в котором их давление повышается до уровня атмосферного, что необходимо для их выброса в окружающую среду. Переключение установки из когенерационного режима в тепловой и обратно происходит посредством перенаправления продуктов сгорания из горелочного устройства с помощью задвижек 5 и 6 соответственно. Выработка электроэнергии происходит с помощью электрогенератора 7.

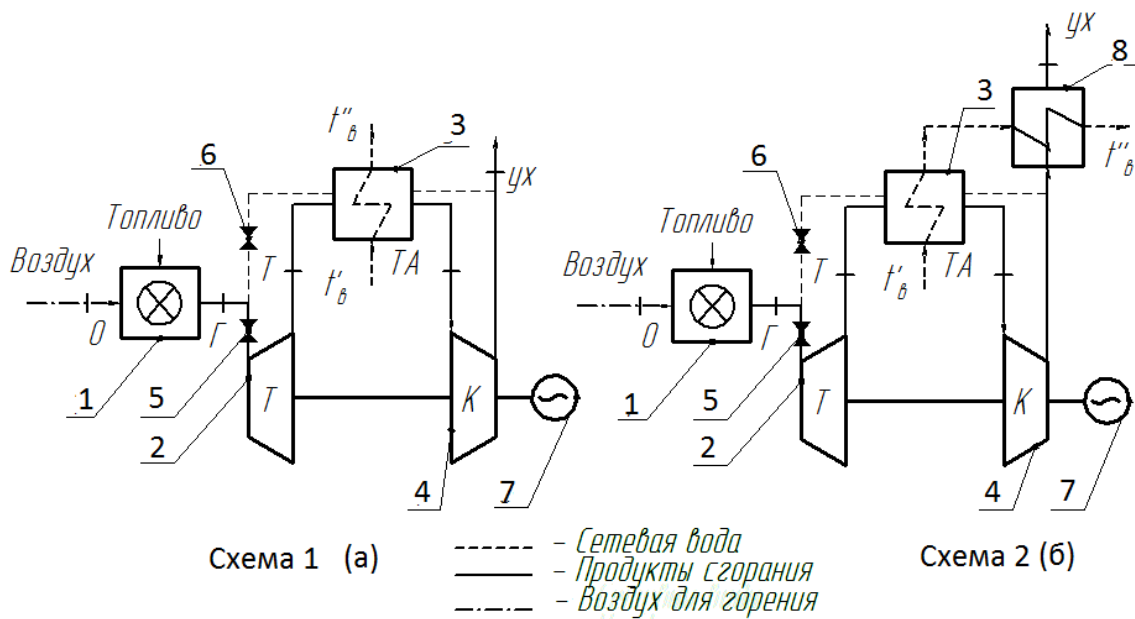


Рисунок 1 – Схема микро-ТЭЦ с микротурбиной измененной очередности процессов: 1 – горелочное устройство, 2 – турбина, 3 – главный газо-водяной теплообменник (ГВТА 1), 4 – компрессор, 5,6 – задвижки, 7 – электрогенератор, 8 – дополнительный газо-водяной теплообменник (ГВТА 2),

Представленная схема микроТЭЦ имеет следующие преимущества:

- 1) Горение топлива при атмосферном давлении позволяет использовать топливный газ напрямую из сетей газопотребления жилых домов [2].
- 2) Отсутствие собственной камеры сгорания микротурбины существенно упрощает и удешевляет конструкцию, так как создание мало-размерных камер сгорания с эффективным процессом горения достаточно затруднительно [3].
- 3) При сравнении со схемами когенерационных установок с высокотемпературными газоздушными теплообменными аппаратами, рассмотренными в [4,5], здесь не используются теплонапряженное теплообменное оборудование, а, следовательно, больше надежность и меньше цена.

МикроТЭЦ представленная по схеме 1 (Рисунок 1), имеет недостаток, заключающийся в высокой температуре уходящих в дымовую трубу газов, поэтому предложен второй вариант схемы установки (Рисунок 1 б), где добавлен газо-водяной теплообменник 8 (ГВТА 2), установленный за компрессором. Такое решение позволяет поднять тепловую мощность когенерационной установки за счет утилизации тепла выхлопных газов.

Для проведения анализа предлагаемых схем микроТЭЦ использовался программный комплекс GateCycle [6].

В выполненных расчетах принимались: расход воздуха  $G_g = 0,185 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  и температура газа на входе в турбину  $T_g^* = 950 \text{ К}$ , адиабатный КПД турбины и компрессора:  $\eta_T^* = 0,70$ ,  $\eta_K^* = 0,75$ , что характерно для серийных ТКР [7], потери полного давления в ГВТА 1 и ГВТА 2:  $\Delta \bar{p}_T = 2\%$ ,  $\Delta \bar{p}_{\text{Вод}} = 2\%$  по газовому и водяному тракту соответственно. Топливо – природный газ, в качестве переменной задана степень расширения турбины в диапазоне  $\pi_T = 1,6 \dots 2,4$ , что рекомендуется газотурбинных двигателей с обратной очередностью процессов [8].

Нагрев сетевой воды в микроТЭЦ осуществляется от температуры  $t'_g = 60^\circ \text{С}$  до  $t''_g = 80^\circ \text{С}$ , при этом предполагается, что продукты сгорания охладятся на выходе из ГВТА 1 до температуры  $t'_k = 70^\circ$ . Температура продуктов сгорания на выходе из ГВТА 2 принята  $t_{yx} = 120^\circ \text{С}$ , как стандартная температура уходящих газов для неконденсационных водогрейных котлов [9].

В результате расчета были получены зависимости электрической  $N_e$  и тепловой  $N_T$  мощности микроТЭЦ от степени понижения давления в турбине  $\pi_T$  (Рисунок 2), эффективного КПД, определенного по формуле  $\eta_e = \frac{N_e}{V_T \cdot Q_n^p}$  и удельной работы цикла  $l_e = \frac{N_e}{G_g}$  от степени понижения давления в турбине  $\pi_T$  (Рисунок 3). Расход топлива составил  $V_T = 14,56 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$ .

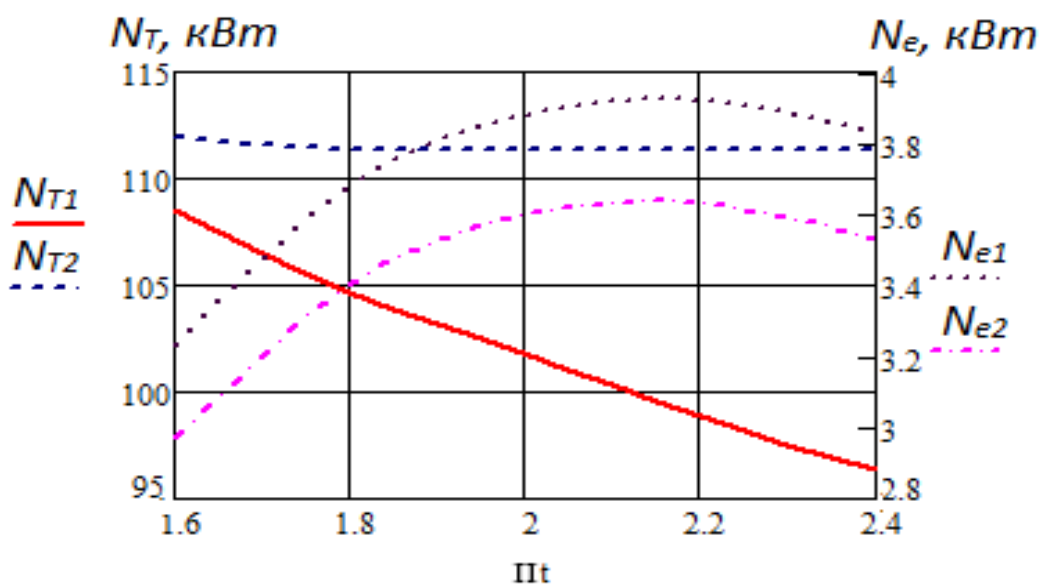




Рисунок 2 - Зависимость тепловой и электрической мощности микроТЭЦ от степени расширения в турбине  $\pi_T$  для схем 1 и 2.

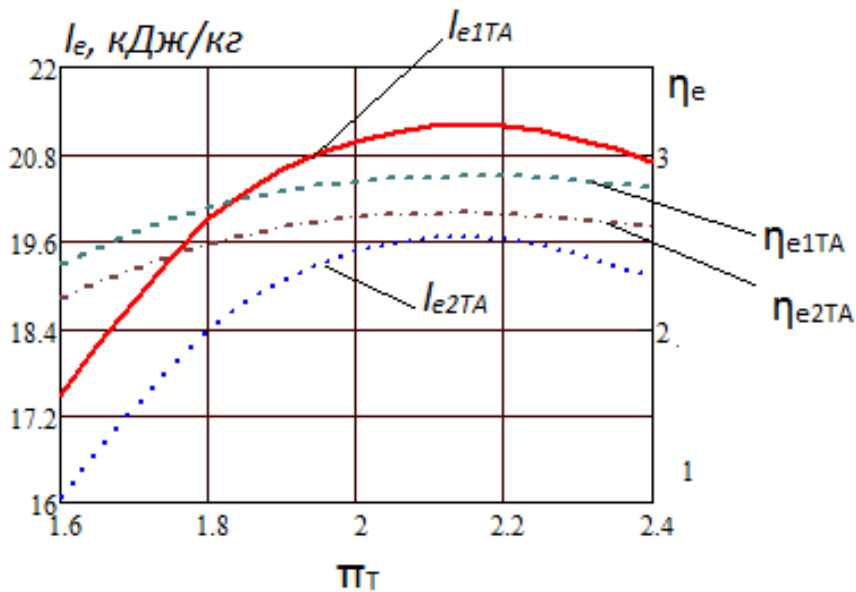


Рисунок 3 - Зависимость эффективного КПД и удельной работы в цикле от степени расширения в турбине  $\pi_T$  для схем 1 и 2

Схема 2 по сравнению со схемой 1 имеет на 4...14 % большую тепловую мощность, причем её тепловая мощность не зависит от степени повышения давления в цикле. Электрическая мощность обеих схем имеет максимум при  $\pi_T=2,1...2,2$ . Электрическая мощность и КПД схемы 2 на 5% меньше, чем в схеме 1. Это объясняется наличием дополнительного сопротивления по ходу движения газов в ГВТА 2.

При температуре газа перед турбиной  $T_T^* = 950 K$ , эффективный КПД  $\eta_e$  в рассматриваемом диапазоне  $\pi_T$  мало зависит от степени расширения в турбине  $\pi_T$ , поэтому рационально выбирать  $\pi_T$  минимальной из возможных, это уменьшает частоту вращения ротора, что благоприятно скажется на ресурсе и надежности микротурбины.

Проведенный термодинамический анализ показал, что вариант использования газовой микротурбины с измененной очередностью процессов, встроенной в водогрейный газовый котел, вполне реализуем. Низкий эффективный КПД микротурбины компенсируется высокой тепловой эффективностью, так как для рассматриваемой установки первостепенной задачей является нагрев сетевой воды для нужд теплоснабжения.

Выбор между вариантом установки, построенной по схеме 1 или 2 будет определяться исходя из конкретных требований к проектируемой микроТЭЦ. Так у схемы 1, лучше массогабаритные показатели, проще конструкция и ниже цена, а у микроТЭЦ выполненной по схеме 2 будет более высокая тепловая мощность и коэффициент использования энергии топлива.

### Список литературы

1. Small and micro combined heat and power (CHP) systems Advanced design, performance, materials and applications. Robert Beith. Woodhead Publishing limited, 2011, 528 с.
2. ГОСТ 54961-2012. Системы газораспределительные. Сети газопотребления. Общитребования к эксплуатации. Эксплуатационная документация. М.: Стандартинформ, 2013, 53 с.
3. R. Tuccillo, M. C. Cameretti, Comparing different solutions for the micro-gas turbine combustor, in: Proceedings of ASME Turbo Expo, Viena, Austria, 2004.
4. Абросимов К.А., Тумашев Р.З. Когенерационная газотурбинная установка в составе малой модульной биогазовой станции // Молодежный научно-технический вестник, №5, 2014 г.
5. Липихин Е.Г., Шевелёв Д.В., Когенерационная установка с газовой микротурбиной на базе водогрейного котла // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 21–23 апреля 2015 г. Т. 1. – Калуга: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015 с. 176–181.
6. GateCycle, GeneralElectric, [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <https://getotalplant.com/GateCycle/docs/GateCycle/index.html>
7. Григоров И.Н., Каминский В.Н., Каминский Р.В. и др. Влияние геометрии турбины ТКР на эффективный коэффициент полезного действия. Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». Книга 2. 2012 г., с. 73-78.
8. Тумашев Р.З., Моляков В.Д., Лаврентьев Ю.Л. Повышение эффективности компрессорных станций магистральных газопроводов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение", 2014. №1 с.68-79.
9. Водогрейные котлы серии RS-A описание, [Электронный ресурс]. -Режим доступа: URL: <http://gaztehnogroup.ru/p1766526-kotly-gazovye-a100.html> (Дата обращения 29.10.15).
10. А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Том 1, Общие сведения. Основные параметры и требования, Конструктивные и силовые схемы М.: Машиностроение, 2008, 207 с.

**Липихин Евгений Геннадьевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [Evgeny.Lipihin@yandex.ru](mailto:Evgeny.Lipihin@yandex.ru).

**Шевелёв Денис Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [denis.v.shevelev@gmail.com](mailto:denis.v.shevelev@gmail.com).

С.В. Ибрагимов, В.Ю. Ильичев

## **ЛАБИРИНТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ ТУРБОМАШИН И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ**

КФМГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Актуальным вопросом в турбиностроении является повышение экономичности работы турбин за счет увеличения коэффициента полезного действия (КПД) отдельных узлов. Одним из путей, позволяющих повысить КПД, является сведение к минимуму паразитных утечек рабочего тела в турбомашине, для чего применяют различные типы уплотнений. В условиях высоких окружных скоростей и больших перепадов давления обычно используют лабиринтные уплотнения.

Лабиринтные уплотнения служат для ограничения утечек рабочей среды вдоль вала из корпуса турбомашин и перетечек между ступенями и лопаточными венцами ротора и статора. Они принадлежат к бесконтактным уплотнениям и представляют собой ряд последовательно расположенных друг за другом узких кольцевых щелей – зазоров и камер достаточно большого объема. Зазоры между ротором и статором образуются их кольцевыми поверхностями и заостренными кромками гребней, разделяющих камеры.

Рабочий процесс в уплотнении (дросселирование) заключается в преобразовании потенциальной энергии среды разделяемых полостей в кинетическую энергию в узких зазорах, а затем в тепло за счет гашения скорости и турбулизации потока в камерах. Ограничение утечки может достигаться, например, уменьшением величины зазора, уменьшением сечения струи в зазоре за счет создания отрывного течения заострением кромок гребней и резким изменением направления потока или уменьшением скорости в зазоре путем дробления перепада давлений между полостями за счет увеличения числа гребней.

В попытке решить проблему поиска рациональной и надежной конструкции уплотнения Ч. Парсонс применил лабиринтное уплотнение в конструкции 1887 года, и до сих пор эта проблема остается актуальной в турбиностроении.

Постоянно пополняющееся разнообразие конструкций лабиринтовых уплотнений свидетельствует о трудностях в разрешении противоречия между требованиями экономичности (обеспечения минимальной протечки) и надежности (уменьшения опасности и облегчения последствий задеваний вращающихся элементов о неподвижные). С возрастанием единичной мощности оборудования выявилось еще одно отрицательное качество уплотнений с радиальными зазорами – при вращении ротора возникают неконсервативные

циркуляционные силы, которые во многих случаях являются причиной вибрации с частотой, примерно в два раза меньшей частоты вращения ротора.

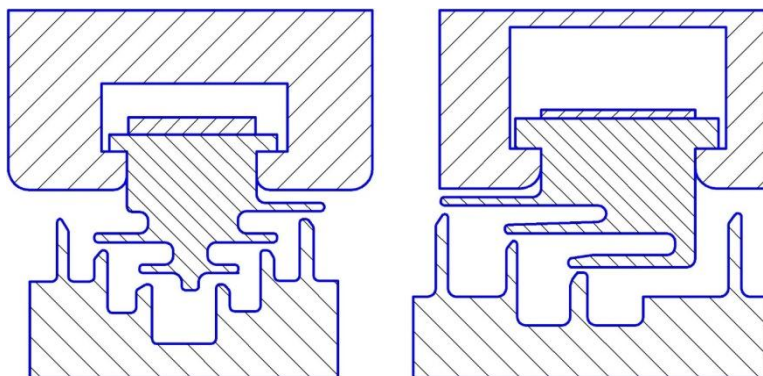
Для повышения конструктивной надёжности уплотнений могут использоваться различные материалы. Например, с целью модернизации лабиринтных уплотнений компрессора на предприятиях, кроме традиционных алюминиевых материалов, применяют полимерный композиционный материал полиамид – капролон. Данный материал обладает повышенной износостойкостью, низким динамическим коэффициентом трения, повышенной стойкостью к химической коррозии и благодаря своей гибкости позволяет поддерживать стабильными зазоры, установленные при монтаже. Во время касания с ротором гребешки лабиринтного уплотнения отклоняются, перемещаясь вместе с ротором. После касания гребешки восстанавливают свою первоначальную конфигурацию, при этом повреждений ротора не происходит. При значительном перемещении ротора в результате повышенной вибрации (нарушение технологического режима эксплуатации компрессора, помпаж, выход на рабочий режим работы и т.д.) гребни уплотнения в местах касания с ротором истираются. Это свойство материала позволяет установить величину радиального зазора в лабиринтном уплотнении в пределах от нуля до 0,05 мм и тем самым снизить перетекание рабочего тела по ступеням [1]. Капролон вполне может быть применен и для уплотнения радиальных зазоров последних ступеней паровых турбин, так как температура плавления данного материала более 200 °С.

Способами решения проблемы повышения КПД являются изменение конфигурации лабиринта с целью создания вихревых потоков рабочего тела (что повышает потери давления в уплотнении) и создания препятствий для его утечек путем изменения геометрических размеров и формы уплотняющей части лабиринтных гребней, увеличение гидравлического сопротивления потока рабочего тела на входе в лабиринтное уплотнение посредством генератора вихрей.

Ещё одним интересным решением являются конструкции концевых уплотнений и уплотнений диафрагм, в которых лабиринтные гребни втулок, посаженных на вал, работают напротив угольных вкладышей, установленных в корпусе турбины. При сборке установка уплотнения производится без зазоров между гребнями и угольными вкладышами; в процессе работы гребни протачивают во вкладышах небольшие канавки, в которых и происходит дросселирование пара.

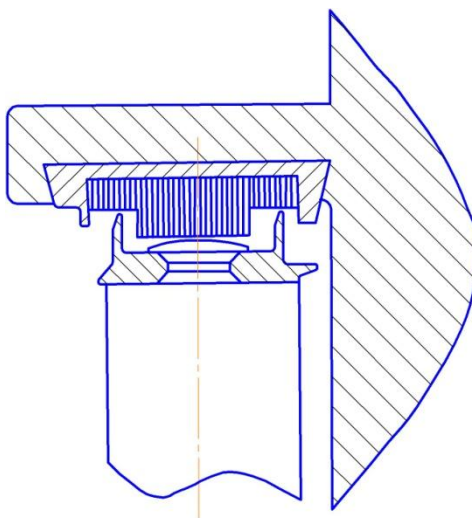
Также свое применение нашли так называемые эластичные лабиринтные уплотнения. К эластичным относятся уплотнения ёлочного типа. На вал турбины надета втулка, снабжённая рядом заостренных гребней различной высоты (Рис. 1). Уплотнительное кольцо состоит из сегментов, которые вставлены в пазы обоймы и отжаты к центру пластинчатыми пружинами. Обойма состоит из двух половин и устанавливается в пазы вкладыша, вставленного в пазы корпуса турбины. Обойма удерживается пружиной, которая

не даёт ей возможности поворачиваться, однако обойма может свободно расширяться при нагревании. Уплотнения ёлочного типа отличаются компактностью, достаточной надёжностью в эксплуатации, но сложны в изготовлении и трудоёмки в сборке - для них необходима гребенчатая втулка [2].



*Рис. 1. Ёлочные уплотнения*

В настоящее время развитие получили сотовые уплотнения (Рис. 2), которые используются в качестве надбандажных и концевых уплотнений цилиндров высокого давления паровых турбин. Данный вид уплотнений отличается многообразием размеров и формы сотовых ячеек.



*Рис. 2. Сотовое уплотнение*

Ячеистая структура сотового уплотнения позволяет без опасности поломки при задевании вращающихся частей ротора о элементы статора сокращать величину радиальных зазоров в уплотнениях до минимальных значений с целью уменьшения утечки рабочего тела.

Сотовая конструкция обеспечивает наибольшую прочность уплотнения при минимальной массе материала. Это позволяет применять сотовые уплотнения при высоких перепадах давления, не увеличивая в этом случае их размер, кроме того, упрощается сборка при монтаже и ремонте турбоаг-

регата. Сотовая структура размещается или непосредственно на сегментах уплотнения, или на пластинах с фиксацией пластинчатыми пружинами, как правило в одной точке. В большинстве случаев сотовая структура имеет соотношение глубины ячейки к её диаметру больше трёх («глубокие соты»). Для уменьшения жесткости касания сотовые уплотнения снабжаются упругими элементами, способствующими первоначальной приработке без разрушения структуры уплотнения.

Таким образом, сотовые уплотнения являются достаточно технологичными в производстве, удобными при монтаже и имеют повышенную эффективность [3]. Однако, этот вид уплотнений имеет и недостатки. Один из них проявляется при применении в сотовые структуры неоптимальных соотношений глубины ячейки к ее диаметру. Это может привести к росту расхода утечки через уплотнение.

Применение одной пластинчатой пружины не обеспечивает устойчивого положения сотового уплотнения при касании вращающихся частей ротора и возвращения пластины на прежнее место при ее короблении в результате касания. Характерным дефектом пластинчатых пружин является потеря упругости и изменение формы плоских пружин в процессе эксплуатации, особенно при воздействии высоких температур [4].

Дальнейшим направлением совершенствования сотовых уплотнений является уменьшение утечек рабочего тела и тем самым повышения эффективности, которых можно достичь за счёт подбора сотовой структуры с оптимальным соотношением глубины ячейки к ее диаметру.

### Список литературы

1. Абдельбаки Н., Беллауар А., Копей Б. В. Совершенствование конструкции лабиринтного уплотнения газоперекачивающего агрегата. *Проблемы трения и износа*, 2010. - № 53.– С. 100–101.

2. Уплотнения турбин. URL: <http://vdvzhke.ru/sudovye-parovye-turbiny/koncevye-chasti-turbiny/uplotnenija-turbin.html>

3. Буглаев В. Т., Перевезенцев В. Т., Довлетбаев Р. И., Казьмин А. Н., Подолов А. А., Сметанко В. В. *Сотовое уплотнение и способ его применения при замене уплотнений с гребнями по валу турбоустановок*. Пат. № 2355892 Российская Федерация, опубл. 20.05.2009.

4. Буглаев В.Т. *Сотовые уплотнения в турбомашинах: монография* / В. Т. Буглаев, В. Т. Перевезенцев, С. В. Перевезенцев, Д. В. Даниленко, А. Л. Карташов, А. А. Климцов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Брянск: БГТУ, 2006. - 192 с.

**Ибрагимов Станислав Валерьевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [ibragish94@gmail.com](mailto:ibragish94@gmail.com).

**Ильичев Владимир Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [patrol8@yandex.ru](mailto:patrol8@yandex.ru).

## **НОРМАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВИНТОВЫХ МАСЛОЗАПОЛНЕННЫХ КОМПРЕССОРОВ**

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

Опыт эксплуатации винтовых маслозаполненных компрессоров (в дальнейшем ВКМ) на ряде промышленных предприятиях страны показал достаточно высокий уровень надёжности компрессоров этого типа.

Однако, примененный в ВКМ отечественного производства способ регулирования производительности, сам регулятор и реализуемый им закон регулирования, не удовлетворяют условиям нормальной и эффективной работы компрессора, в частности, во время «глубокого» дросселирования нарушаются температурные режимы в камере нагнетания.

Штатный регулятор представляет собой релейный двухпозиционный регулятор: «загрузка» - 100 % производительности и «глубокое» дросселирование - масса сжимаемого воздуха определяется протечками воздуха через неплотности. В тоже время, масса впрыскиваемого масла остается практически прежней, т.к. зависит от давления воздуха в маслобаке.

Работа ВКМ в режиме «глубокого» дросселирования (пусть даже непродолжительное время) представляет собой работу компрессора в режиме внегеометрического дожатия с изменяющейся во времени степенью несоответствия давлений  $K_d$ . [1]. Переход компрессора в режим «глубокого» дросселирования (закрытие дроссельного клапана) сопровождается срабатыванием обратного клапана, расположенного между камерой нагнетания и маслоотделителем. Вследствие этого, после перевода в режим «глубокого» дросселирования, компрессор начинает работать в режиме с небольшим по величине (близким к единице) соотношением давления в камере нагнетания к давлению внутреннего сжатия - коэффициентом  $K_d$ , но уже по истечению некоторого времени (несколько рабочих циклов) отмечается рост этого коэффициента вплоть до значений  $K_d = 15...20$ . Ситуация не может рассматриваться как абсолютно нормальная: температурный режим компрессора нарушается – в зависимости от продолжительности «глубокого» дросселирования, температура нагнетаемой масловоздушной смеси может достигать опасных значений (430...450 К); создаются условия для возникновения начального разрыва, распад которого может привести к формированию в полостях сжатия ударных волн [2].

Вывод: требуется совершенствование штатной системы автоматического регулирования производительности (в дальнейшем САРП).

Авторами были предложены и реализованы на экспериментальном компрессоре типа 6ВКМ-25/8 изменения в конструкции дроссельного клапана. В основе изменений лежит следующее решение: механическим путем был ограничен (уменьшен) ход штока дроссельного клапана, что физически исключило существование режима «глубокого» дросселирования. Кроме этого, имеется возможность изменения хода штока для задания допустимой "глубины" дросселирования. Для реализации этого требования, ограничитель хода штока дроссельного клапана, был выполнен регулируемым, что, в дальнейшем, оказалось не только удобным, но и целесообразным.

После внесения описанных изменений, компрессор прошел испытания при различной "глубине" дросселирования. Снижение "глубины" дросселирования, несомненно, повлечет за собой следующие, "прогнозируемые" последствия: уменьшение численного значения  $K_0$  в периоды "глубокого" дросселирования; снижение температуры нагнетаемой масло-воздушной смеси в эти же периоды.

Таблица 1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований компрессора 6ВКМ-25/8 во время работы САРП.

Параметры	Давление после дроссельного клапана $p_в$ , Па			
	$p_в = 7270$ Па (базовый вариант)	$p_в = 10520$ Па	$p_в = 20830$ Па	$p_в = 31090$ Па
Давление внутреннего сжатия $p_а$ , Па	38320	55590	110820	166540
Температура после внутреннего сжатия $T_а$ , К	309	311	312	314
Температура нагнетания $T_н$ , К	370..450	370...425	365...405	365...395

Анализируя данные, содержащиеся в таблице 1, можно констатировать наличие прогресса в плане нормализации температурных режимов (уменьшение  $T_н$ )

### Список литературы

1. Филиппов И.В. Ударные волны в винтовых маслозаполненных компрессорах. // Изв. Вузов. Машиностроение. –1995, -№1-3, -С. 26-32.



2. Филиппов И.В. Начальный разрыв и его распад в винтовых компрессорах. // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. –1996, -№568, -С.118-123.

**Филиппов Иван Владимирович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fiv61@yandex.ru.

**Дьячук Виктор Васильевич** –директор ООО "Энергопрогресс". E-mail: kalygennergoprogress@yandex.ru.

**Клещев Сергей Владимирович** –эксперт по газовому оборудованию ООО "Энергопрогресс". E-mail: kie-tanya@mail.ru.

М.И. Супельняк

## ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕПЛООТДАЧИ С ПЕРЕМЕННОЙ ВО ВРЕМЕНИ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

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

Циклическое изменение знака теплового потока через поверхность твердого тела возбуждает в нем тепловые волны и термоциклические напряжения, которые могут вызвать усталостное разрушение материала. С подобным явлением приходится часто сталкиваться на практике, поскольку работа ряда технических устройств и конструкций сопровождается периодическим изменением температуры их элементов во времени [1].

Первым этапом исследования термоусталостной прочности детали является определение ее поля температуры, которое находится из решения третьей краевой задачи теплопроводности без начальных условий

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T, \quad (x, y, z) \in V, \quad t > -\infty,$$
$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha (T_w - T_{\text{ж}}), \quad t > -\infty,$$

где  $T = T(x, y, z, t)$  – температура твердого тела, К;  $(x, y, z)$  – координаты точки тела, м;  $t$  – время, с;  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $V$  – занятая телом область пространства;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали к поверхности тела;  $\alpha = \alpha(x_w, y_w, z_w, t) > 0$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; индексом  $w$  обозначены параметры на поверхности тела  $F = \partial V$ ;  $T_{\text{ж}} = T_{\text{ж}}(x_w, y_w, z_w, t)$  – температура жидкой среды, К. В общем случае как температура жидкости, так и коэффициент теплоотдачи изменяются во времени по периодическому закону, т.е.

$$\alpha(x_w, y_w, z_w, t + \tau) = \alpha(x_w, y_w, z_w, t),$$
$$T_{\text{ж}}(x_w, y_w, z_w, t + \tau) = T_{\text{ж}}(x_w, y_w, z_w, t),$$

где  $\tau$  – период циклического процесса теплообмена, с.

Нестационарность коэффициента теплоотдачи существенно усложняет решение задачи теплопроводности, поскольку создает трудности принципиального характера [2]. В связи с этим возникает закономерный вопрос о возможности замены нестационарного коэффициента теплоотдачи таким стационарным, при котором поле колебаний температуры не искажалось бы существенным образом. В ходе исследований было установлено, что

искомый эквивалентный постоянный коэффициент теплоотдачи при высокой частоте процесса может быть найден по формуле

$$\alpha' = \int_0^{\tau} \left[ \alpha (\langle T_{\text{ж}} \rangle_{\alpha} - T_{\text{ж}}) - (\bar{\alpha} - \alpha) \Delta_{T_w} \right] (\bar{T}_{\text{ж}} - T_{\text{ж}}) dt \Big/ \int_0^{\tau} (\bar{T}_{\text{ж}} - T_{\text{ж}})^2 dt,$$

где

$$\langle T_{\text{ж}} \rangle_{\alpha} = \int_0^{\tau} \alpha T_{\text{ж}} dt \Big/ \int_0^{\tau} \alpha dt, \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \alpha dt, \quad \bar{T}_{\text{ж}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} T_{\text{ж}} dt,$$

$$\Delta_{T_w} = -\frac{\lambda}{\bar{\alpha}} \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} \right)_w, \quad \bar{T} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} T dt.$$

Средняя за период температура тела определяется из решения краевой задачи

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = a \nabla^2 \bar{T}, \quad (x, y, z) \in V,$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} \right)_w = \bar{\alpha} (\bar{T}_w - \langle T_{\text{ж}} \rangle_{\alpha}).$$

### Список литературы

1. Теория тепломассообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 683 с.
2. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.

**Супельняк Максим Игоревич** – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max2901@mail.ru.

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КПД ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

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

Паротурбинные установки (ПТУ) на сегодняшний день можно по праву считать неотъемлемой частью энергетической отрасли. По выработке электроэнергии они занимают передовые позиции, как в России, так и в других странах, имеющих развитую теплоэнергетику. Эффективность паротурбинного агрегата и компонентов его тепловой схемы тесно взаимосвязаны, они в значительной степени определяют величину термического КПД установки. Увеличение этого КПД - одна из наиболее актуальных задач в теплоэнергетике.

Одно из самых перспективных направлений совершенствования энергоустановок - создание комбинированных парогазовых установок (ПГУ), включающих в себя как паротурбинные части, работающие по традиционному термодинамическому циклу Ренкина, так и газотурбинные установки (ГТУ), работающие по циклу Брайтона. Термический КПД парогазовых комбинированных установок достигает 60...62%, при условии использования в них наиболее совершенных в настоящее время паротурбинных и газотурбинных частей.

Широкое внедрение ПГУ в отечественной энергетике встречает ряд трудностей: отсутствие конкурентоспособных отечественных энергетических ГТУ большой мощности, необходимость использования дорогого жидкого или газообразного топлива в газотурбинной части, сложность создания энергоустановок большой единичной мощности, сложности установки ПГУ на действующих ТЭС и ТЭЦ и др. Тем не менее, в последние годы в России вводится в эксплуатацию большое количество ПГУ. При этом актуальной остается задача повышения КПД как паротурбинных установок, работающих в составе ПГУ, так и блочных ПТУ.

Экономичность паротурбинной установки во многом определяется степенью совершенства самой паровой турбины. Например, применение современных методов профилирования лопаточного аппарата [1] и меридиональных обводов проточной части позволяет повысить относительный внутренний КПД турбины на 2...3%.

Совершенствование систем уплотнений в турбине (надбандажных, диафрагменных, концевых уплотнений) с использованием разношаговых и «ёлочных» лабиринтных уплотнений, сотовых и регулируемых уплотнений, позволяет повысить КПД турбины еще на 2...3%.

Применение увеличенной площади выхлопа из турбины, за счет увеличения высоты лопаток последней ступени до 1600...1800 мм [2], позволяет значительно уменьшить потери энергии с выходной скоростью, что существенно увеличивает ее КПД.

Одним из традиционных путей повышения эффективности цикла ПТУ является повышение начальных параметров рабочего тела. Сегодня перспективным является разработка ПТУ со суперсверхкритическими параметрами пара (ССКП). При этом давление пара на входе в турбину может достигать 30...32 МПа, а его температура 600...700°C. Такие высокие параметры рабочего тела требуют применения современных жаропрочных и жаростойких сталей в пароперегревателе котла и элементах паровпуска турбины. КПД цикла ПТУ при применении ССКП может достигать 50...55%. Еще большего роста начальных параметров и КПД возможно достичь, применяя водородный перегрев пара непосредственно перед турбиной [3]. Разрабатываются ПТУ с ССКП со сжиганием метана в среде пара для увеличения начальной температуры [4]. В этих схемах, как правило, кроме жаростойких материалов требуется применение специальных систем охлаждения элементов турбины (лопаток, дисков, ротора и т.п.) не характерных для паровых турбин. Кроме того, в схеме установки появляются нетипичные для традиционных ПТУ пароохладители и дополнительные системы удаления неконденсирующихся газов.

Одним из перспективных способов повышения эффективности ПТУ остается оптимизация тепловой схемы и совершенствование отдельных ее элементов. Так, развитая система регенерации и введение промежуточного перегрева пара всегда повышают эффективность ПТУ, хотя и требуют дополнительных затрат и оборудования.

В системе регенерации ПТУ перспективно применение смешивающих подогревателей. Отличие такого подогревателя от традиционного - поверхностного в том, что в нем происходит непосредственный контакт между нагреваемой и греющей средой. С точки зрения термодинамики, использование смешивающих подогревателей более целесообразно, так как позволяет нагреть питательную воду до температуры конденсации греющего пара, что является невозможным для поверхностных подогревателей.

На протяжении многих десятилетий даже небольшое содержание кислорода в питательной воде ПТУ считалось недопустимым, поэтому деаэрации всегда уделялось большое внимание. Возможность отказа от деаэрации воды дает бездеаэрационная схема паротурбинной установки [5]. Такая схема лишена дорогого и затратного в эксплуатации теплообменного аппарата - деаэратора и, наоборот, предполагает внедрение нейтрально-кислородного водного режима (НКВР) с дозированием в тракт основного конденсата избыточного количества кислорода. При оптимальной концентрации НКВР улучшается коррозионное состояние питательного тракта, а при избыточной концентрации происходит образование защит-

ных пленок сталей, что в свою очередь значительно подавляет коррозию. Бездеаэрационные схемы повышают экономичность турбоустановки, снижают расход электроэнергии на собственные нужды, исключают необходимость предпусковой деаэрации воды.

Схемы включения питательных насосов оказывают существенное влияние на эффективность работы ПТУ. Перспективным является использование двухподъемной схемы [6]. В таких схемах, питательные насосы разделяются на насосы первого и второго подъемов. Давление, развиваемое насосами первого подъема, может быть существенно ниже давления пара перед турбиной. В этом случае увеличивается надежность работы регенеративных подогревателей, через которые прокачивает питательную воду насос первого подъема, упрощается их изготовление и уменьшается стоимость. За счет применения данной схемы потери на привод более мощных питательных насосов первого и второго подъемов покрываются существенным увеличением КПД турбогенератора. Однако насосу второго подъема приходится в этом случае работать в гораздо более жестких условиях. Двухподъемные схемы целесообразно применять в ПТУ с начальным давлением пара перед турбиной более 15 МПа.

Значительные потери тепловой энергии происходят в традиционном, поверхностном конденсаторе ПТУ, вследствие чего снижается КПД цикла Ренкина. Применение смешивающих конденсаторов позволяет снизить такие потери [7]. В смешивающих конденсаторах отсутствует трубчатая охлаждающая поверхность, трубные решетки и все связанные с этим элементы конструкции, характерные для поверхностных конденсаторов и определяющие в основном их высокую стоимость. В смешивающих конденсаторах, конденсация пара осуществляется непосредственным смешением отработанного пара с охлаждающей водой, которая впрыскивается в камеру. Основными их достоинствами являются: простота изготовления и обслуживания; меньший расход охлаждающей воды; увеличение величины температурного напора, при большой кратности охлаждения.

Наличие в стране больших запасов относительно дешевого угля делает его более широкое использование в энергетике более перспективным в будущем. Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию технологий сжигания твердого топлива: в котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) [8], а также микроугольное сжигание. На энергоблоках мощностью до 300 МВт себестоимость электрической энергии, с применением котлов с ЦКС, на 7...8 % ниже традиционных.

Многие способы повышения КПД ПТУ и идеи, описанные выше, были предложены еще советскими инженерами-теплоэнергетиками. Но до настоящего времени многие из них так и не реализованы в полном объеме. Применение описанных способов повышения КПД ПТУ в их различных сочетаниях, как при проектировании электростанций, так и при модернизации существующих, имеющих в своем составе блочные паротурбинные

установки, а также ПТУ, работающие в составе ПГУ, позволит значительно повысить эффективность энергоустановок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов Е.В., Жинов А.А.* Проектирование и применение лопаток сложной формы в паровых турбинах // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, 25—27 ноября 2014 г. Т.1. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 216 с.

2. Разработка для мощных паровых турбин ЦНД повышенной пропускной способности / *Пичугин И.И., Неженцев Ю.Н., Трояновский Б.М.* // Теплоэнергетика. -1990. - № 5, с. 9-14.

3. Разработка научных основ проектирования электростанций с высокотемпературными паровыми турбинами: Сборник статей. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, - 300 с.

4. *Жинов А.А., Крылов В.С.* Выбор тепловой схемы высокотемпературной паротурбинной установки большой мощности // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы всероссийской научно-технической конференции— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, Т.1. - с. 187-189.

5. *Ефимочкин Г.И.* Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.

6. *Стерман Л.С., Тевлин С.А., Шарков А.Т.* Тепловые и атомные электростанции. – М.: Энергоиздат, 1982. – 456 с.

7. *Лосев С.М.* Паровые турбины и конденсационные устройства. – М.: Энергия, 1964. – 376 с.

8. *Трухний А.Д., Макаров А.А., Клименко В.В.* Современная теплоэнергетика. - М.: Издательство МЭИ, 2003. – 376 с.

**Тарасов Евгений Витальевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tarasovevgeniy@outlook.com.

**Жинов Андрей Александрович** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru.

А.А. Лужецкий, Ф.Г. Завальный, Н.В. Гридчин

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК ПУТЕМ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА**

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

В настоящее время газотурбинные установки (ГТУ) нашли широкое применение в авиационном, морском и наземном транспорте, а также в качестве электрического и механического привода. В связи с этим актуальны вопросы повышения их термодинамической эффективности.

Газотурбинные установки работают по одному и тому же термодинамическому тепловому циклу – циклу Брайтона. В этом цикле атмосферный воздух сжимается в компрессоре, подогревается при постоянном давлении в камере сгорания и, расширяясь в турбине, совершает полезную работу, идущую на привод компрессора и полезную нагрузку.

Основными путями повышения эффективности ГТУ являются:

- увеличение температуры газа перед турбиной;
- повышение КПД компрессоров и турбин, уменьшение потерь давления в газоздушном тракте;
- полезное использование теплоты уходящих газов;
- комбинированная выработка тепловой и электрической энергии;
- усложнение простого цикла, создание комбинированных установок;
- впрыск воды или пара в проточную часть двигателя.

Одним из эффективных перечисленных способов улучшения эксплуатационных характеристик ГТУ (повышения их мощности, уменьшения расхода топлива и увеличения ресурса) является применение испарительного охлаждения рабочего тела путем впрыска воды в проточные части основных узлов ГТУ с целью охлаждения рабочего тела [1].

Суть этого способа охлаждения заключается в следующем: вода под высоким давлением впрыскивается в ненасыщенный воздушный поток. Из-за разности парциальных давлений водяного пара на поверхности капель впрыскиваемой воды и в воздушной среде вода испаряется, отбирая теплоту у циклового воздуха. При этом впрыскиваемая вода выполняет две функции: отбирает теплоту у охлаждаемого воздуха и возвращает её в цикл ГТУ в виде добавочного рабочего тела – пара. Дополнительно интенсифицировать процесс испарения можно путём предварительного нагрева воды в котле-утилизаторе.

Впрыск воды может осуществляться:

- на входе в компрессор (испарение капель воды осуществляется до входа в компрессор);



- ввод избыточного количества воды на входе в компрессор и постепенное ее испарение по проточной части ("влажное" или "мокрое" сжатие);
- впрыск воды в переходном патрубке между каскадами компрессора;
- за компрессором перед регенератором;
- в камере сгорания;
- в патрубке за турбиной (перед котлом-утилизатором);
- в системе воздушного охлаждения деталей газовой турбины [2].

Впрыск воды перед компрессором стабилизирует температуру поступающего в компрессор воздуха, что позволяет уменьшить падение мощности ГТУ при высоких температурах окружающей среды.

Промежуточное испарительное охлаждение воздуха уменьшает мощность, затрачиваемую на привод компрессора при постоянной степени повышения давления, либо, при неизменной мощности, увеличивает ее.

В газотурбинных установках с высокими степенями повышения давления испарительное охлаждение воздуха за компрессором делает возможным применение регенерации выхлопных газов. Кроме того, более низкая температура воздуха за компрессором, а, следовательно, более низкая температура воздуха в системе охлаждения турбины, позволяет уменьшить расход охлаждающего воздуха, что положительно влияет на КПД установки в целом.

Впрыск воды в камеру сгорания (в зону горения) приводит к снижению вредных выбросов оксидов азота от 20 до 33% [3].

Охлаждение воздуха в системе охлаждения газотурбинного двигателя путем впрыска воды можно осуществлять:

- с целью повышения температуры газа перед турбиной при неизменном уровне отбираемого воздуха на охлаждение и неизменного ресурса;
- с целью снижения расхода отбираемого воздуха на охлаждение при неизменной температуре газа перед турбиной и неизменном ресурсе;
- с целью повышения ресурса двигателя при неизменной температуре газа и неизменном расходе охлаждающего воздуха [4].

Ввод воды в затурбинный диффузор может оказаться целесообразным для ГТУ с водогрейным котлом-утилизатором. Если требуется получение воды невысоких параметров (например, для технологических процессов или нужд теплофикации), то разработка теплообменного аппарата, работающего с высоким градиентом температур теплоносителей не всегда целесообразна. Понижение температуры выхлопных газов впрыском воды в затурбинный диффузор позволяет упростить конструкцию водогрейного котла, увеличить его ресурс. Кроме того, улучшаются условия работы затурбинного диффузора из-за аэротермокомпрессорного эффекта, и, следо-

вательно, увеличивается мощность турбины. Немаловажен и экологический фактор – понижение температуры выхлопных газов уменьшает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Это особенно актуально для теплоэнергетических установок, расположенных в современных мегаполисах.

### Список литературы

[1] Гридчин Н.В., Землянский А.В., Жинов А.А. Исследование испарительного схлаждения рабочего тела в проточной части когерационной газотурбинной установки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, №1, с. 81-87.

[2] Серeda С.О., Гельмедав Ф.Ш., Мунтянов И.Г. Экспериментальное исследование влияния впрыска воды во входной канал многоступенчатого осевого компрессора на его характеристики. *Теплоэнергетика*, 2004, №5, с. 66-71.

[3] Богорадовский Г. И. Экспериментальное исследование влияния впрыска пара в камеру сгорания ГТУ на характеристики агрегата. *Теплоэнергетика*, 1996, №10, с. 43 - 44.

[4] Ван Фоссен. Применение впрыска воды в систему охлаждения турбины для повышения мощности газовой турбины в аварийных условиях. *Энергетические машины*, 1983, т. 105. №3, с. 154 - 162.

**Лужецкий Александр Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [aleksandr.luzheczkij.98@gmail.com](mailto:aleksandr.luzheczkij.98@gmail.com).

**Завальный Федор Геннадьевич** — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [fedor.zavalnyj1995@gmail.com](mailto:fedor.zavalnyj1995@gmail.com).

**Гридчин Николай Викторович** –ст. преп КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [gridchin2610@gmail.com](mailto:gridchin2610@gmail.com).

Н.Э. Емельянов, А.К. Карышев

## **ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛОВОГО АППАРАТА В СИЛОВОЙ ТУРБИНЕ ГТУ**

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В научно-технической литературе довольно часто упоминается о регулировании газотурбинных установок с помощью поворота лопаток соплового аппарата силовой турбины [1, 3, 4]. Однако имеющиеся теоретические сведения и экспериментальные данные не достаточны для более полного описания его преимуществ. Именно это обстоятельство, наряду с техническими сложностями, определяет скептическое отношение к использованию РСА у отечественных производителей. В зарубежной практике турбиностроения, напротив, установки с регулируемым сопловым аппаратом давно и успешно применяются. Примером может послужить машина PGT-10 компании GeneralElectric.

Регулирование поворотом лопаток РСА помогает более эффективно эксплуатировать двигатель на частичных нагрузках [5], способствует увеличению маневренности и приспособляемости к переменным погодным условиям, приводит к снижению расхода топлива.

Поворот лопаток соплового аппарата турбины позволяет [4, 6]:

- 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 (помимо топливного клапана), при разных программах регулирования позволяет эксплуатировать двигатель в широком диапазоне режимов без существенного снижения КПД и с минимальным расходом топлива. Это особенно актуально для ГПА, которые часто работают при переменной нагрузке.

В [7] описан принцип изменения расхода рабочего тела, как при использовании РСА в первой ступени силовой турбины, так и в промежуточной и последней ступенях.

Из приведенных расчетов видно, что для изменения расхода достаточно осуществить поворот лопатки СА первой ступени на определенный угол, тем самым изменив площадь проходного сечения СА. Если же РСА используется в промежуточной, либо последней ступени ССТ, то для такого же изменения расхода, потребуется поворачивать лопатки СА на больший угол, т.е. до тех пор, пока проходное сечение не изменится настолько, что перепад давления в первой ступени будет соответствовать требуемому изменению расхода. Как следствие - работа ступеней с большими углами

атаки и меньшими внутренними КПД (Рисунок 1). Исходя из этого, и принимая во внимание то, что в настоящее время чаще применяются двух- и трехступенчатые силовые турбины, более эффективным будет применение РСА в первой ступени силовой турбины.

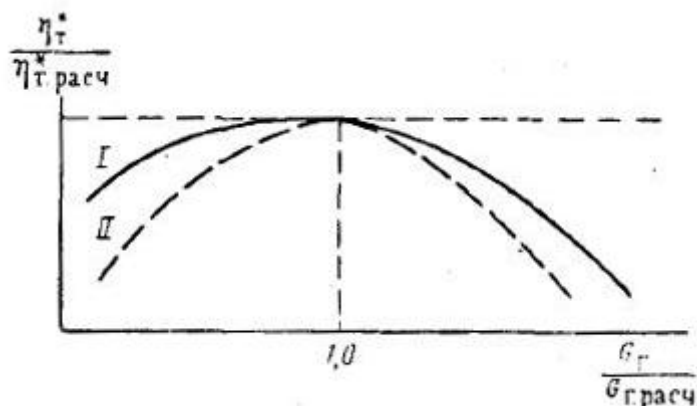


Рисунок 1 – Сравнение регулирования двухступенчатой турбины поворотом лопаток РСА: I - регулируется первый СА; II - регулируется второй СА

Преимуществами установки РСА в первой ступени являются:

- изменение расхода рабочего тела не требует значительного изменения угла установки сопловых лопаток, что приводит к небольшому падению эффективности ступени и турбины;
- поворот лопаток соплового аппарата первой ступени не вызывает изменение степеней понижения давления в последующих ступенях;
- более активное влияние поворота сопловых лопаток первой ступени на характеристики турбины газогенератора и возможность изменения (поддержания) ее параметров.

При повороте сопловых лопаток турбинной ступени происходит изменение угла  $\alpha_1$ , а значит - угла атаки при натекании потока на рабочие лопатки и внутреннего КПД ступени. В [7] проанализировано влияние прикрытия либо раскрытия лопаток соплового аппарата на преобразование формы треугольников скоростей (Рисунок 2), изменение степени реактивности и удельной работы. Кроме качественного анализа, в научно-технической литературе практически не представлены количественные соотношения, отражающие влияние изменения угла  $\alpha_1$  на характеристики ступени турбины.

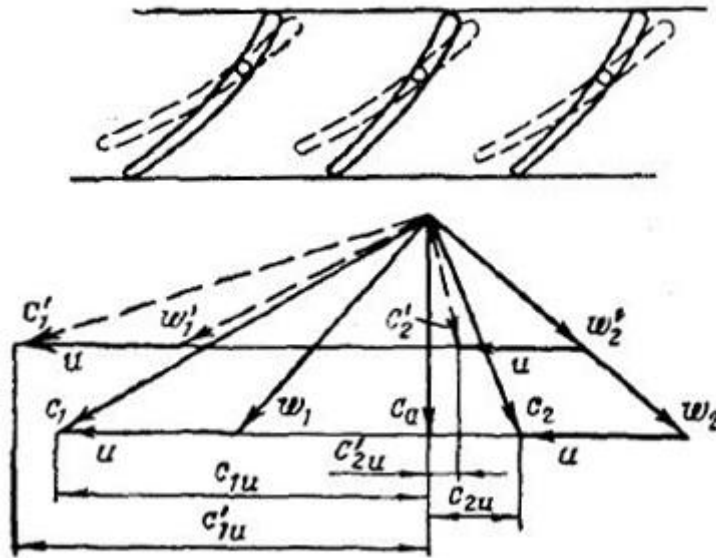


Рисунок 2 – Изменение треугольников скоростей ступени турбины при повороте лопаток соплового аппарата: - - - для  $\alpha_1 < \alpha_{1РАСЧ}$

При уменьшении угла выхода из соплового аппарата снижение степени реактивности происходит на всех диаметрах турбины, что приводит к уменьшению внутреннего КПД ступени. Особенно сильно КПД начинает снижаться, после того как степень реактивности в корне уменьшается до нуля или становится отрицательной. Следовательно, диапазон регулирования в сторону прикрытия РСА ограничивается значением угла  $\alpha_1$ , при котором  $\rho$  близка к нулю.

Анализ приведенных в литературе данных показал, что в настоящее время нет обоснованных представлений о диапазоне регулирования (изменениях  $\alpha_1$ ).

Регулирование турбины с помощью РСА приводит к перераспределению работы между ступенями [6] (или перераспределению степеней понижения давления  $\pi_{T^*}$ ). Это явление рассматривается в связи с изменением характеристик ступени (Рисунок 3).

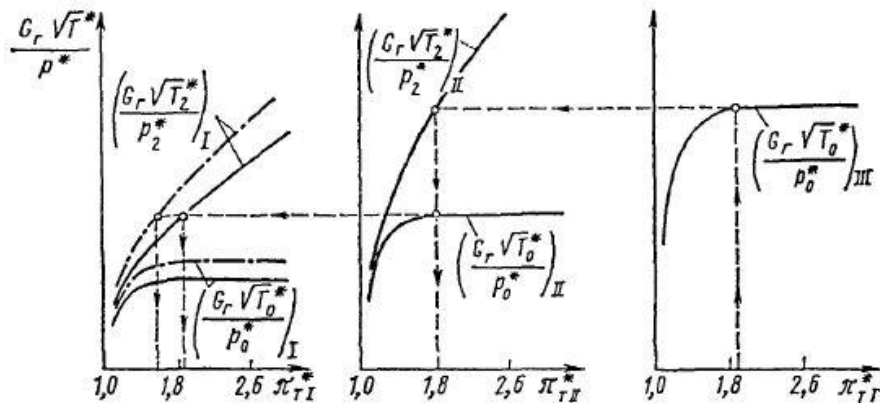


Рисунок 3 – Распределение степени понижения давления по ступеням

Раскрытие СА увеличивает расход и, следовательно, мощность турбины, закрытие СА оказывает обратное влияние. Из рисунка следует, что при раскрытии СА ступени турбины и  $G_{np} = const$  (если расход газа через турбину ограничивается каким-либо проходным сечением) происходит резкое уменьшение ее мощности.

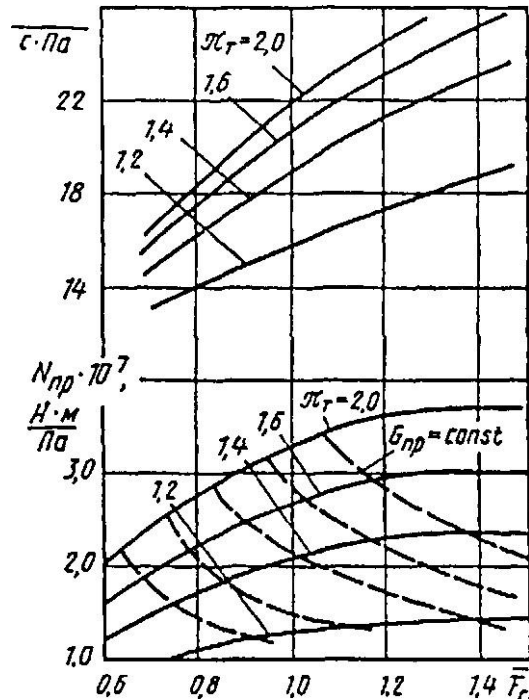


Рисунок 4 – Характеристика турбины с регулируемым сопловым аппаратом первой ступени

Таким образом, применение регулируемого соплового аппарата в силовой турбине ГТУ обладает неоспоримыми преимуществами – стабильная работа установки на переменных режимах, снижение расхода топлива на 4% в среднем за год [1], более высокие значение КПД на переменных режимах работы, по сравнению с регулированием только топливным клапаном. Однако, остается еще ряд проблем, которые требуют более детального решения:

- 1) Нужно разработать надежную конструкцию системы поворота СА, которая обеспечит работу установки на протяжении всего срока эксплуатации.
- 2) Разработать методику профилирования лопаток, слабо чувствительных к углам входа потока  $\alpha_1$ .
- 3) Создать эффективную программу регулирования двигателя, которая позволит динамически изменять как положение РСА ССТ, так и ВНА компрессора.

### Список использованных источников

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. Ревзин Б.С. *Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом*. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2002. 269 с.
6. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. *Теория и расчет авиационных лопаточных машин*. Москва, Машиностроение, 1986. 432 с.
7. 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.

А.В. Кондратьев, А.В. Птахин, В.С. Крылов

## **РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА В НАКЛОННОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ТРУБЕ**

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

В настоящее время в связи с экологическими требованиями, а также дефицитом воды во многих районах мира возрастает интерес к воздушно-конденсационным установкам (ВКУ) как замене для классических водоохлаждаемых конденсаторов. Использование конденсаторов с водяным охлаждением приводит к тепловому загрязнению рек, а использование оборотных систем водоснабжения связано с уносом и выпаром влаги в атмосферу. И то и другое явление влечёт негативные экологические последствия. ВКУ лишены этих недостатков, что делает их развитие перспективным направлением в энергетике.

В настоящее время конструкции ВКУ всё ещё не до конца проработаны и имеют ряд недостатков, например, возможность замерзания и разрыва теплообменных труб при работе в зимних условиях. Коэффициент теплопередачи воздушного конденсатора (ВК) может снижаться из-за накопления в теплообменных трубах неконденсирующихся газов, мешающих теплообмену.

Расчёт течения пара в теплообменных трубах обычно производится по формуле Бойко-Кружилина.

Однако при конденсации водяного пара внутри оребренных труб воздушных конденсаторов паротурбинных установок [1-3], скоростной напор пара на входе в теплообменные трубы  $\frac{\rho'' \cdot w''_{BX}}{2} \leq 550 \text{ Па}$ , число Рейнольдса по пару  $Re'' = \frac{w''_{BX} \cdot d}{\nu''} \leq 12500$ , по конденсату  $Re' = \frac{w' \cdot d}{\nu'} \leq 200$ , где  $\nu', \nu''$  – кинематические вязкости конденсата и пара, соответственно;  $w', w''_{BX}$  – скорости конденсата при пара на входе в трубу при по отношению к полному сечению трубы,  $d = 21 \text{ мм}$  – внутренний диаметр труб,  $x_1, x_2$  – расходные массовые паросодержания на входе и выходе из трубы. В [4] предложена физическая модель течения водяного пара внутри трубы, сочетающая одновременное существование перегретого и конденсирующегося пара с  $x_1 \geq 0.05$  при  $Re' \leq 200$ .

Цель работы – исследование влияния неравномерности охлаждения стенки трубы на процесс конденсации водяного пара в наклонной охлаждаемой трубе.



Опыты проводились с двумя рабочими участками: моделью с кольцевым охлаждением и моделью с полукольцевым охлаждением и теплоизоляцией между охлаждаемой и неохлаждаемой частями трубы.

Сечения кольцевой и полукольцевой моделей приводятся на рисунке 1.

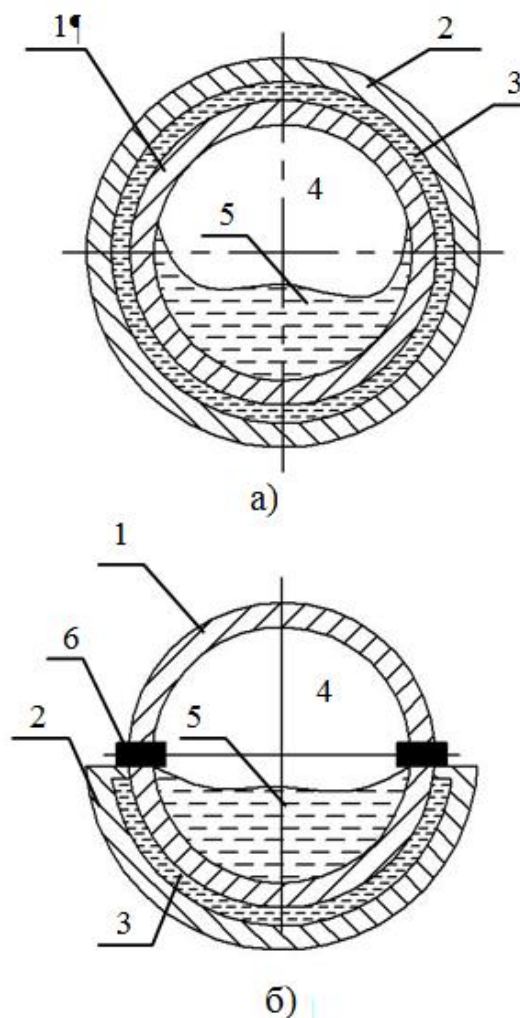


Рис. 1. Поперечные сечения рабочего участка с кольцевым охлаждением(а) и разрезного рабочего участка с полукольцевым охлаждением (б):

1 – паровая труба, 2 – внешняя труба рубашки охлаждения, 3 – охлаждающая вода, 4 – пар, 5 – конденсат 6 – теплоизоляционная вставка.

В результате экспериментов было установлено, что:

- при подаче перегретого пара на вход в теплообменную трубу и конденсации до 95% пара в трубе, на выходе из неё пар сохраняет некоторый перегрев;
- были получены графики температур в среднем поперечном сечении теплообменной трубы, свидетельствующие об одновременном наличии в трубе перегретого пара и переохлаждённого конденсата;

- был поставлен острый опыт, в котором охлаждалась только нижняя часть теплообменной трубы, а также исключён теплообмен за счёт теплопроводности между верхней и нижней половинами трубы;
- были получены графики зависимости средних по поверхности коэффициентов теплопередачи от скорости охлаждающей воды в кольцевом (полукольцевом) зазоре.

### **Список литературы**

1. В.А. Федоров, О.О. Мильман, П.А. Ананьев, С.Н. Дунаев, Н.В. Колесников, Б.А. Шифрин / Теплогидравлические процессы в воздушных конденсаторах паротурбинных установок // Вестник МЭИ. М.: Изд-во МЭИ. 2012. № 2. С. 5-12.

2. В.А. Федоров, О.О. Мильман, Н.В. Колесников, П.А. Ананьев, С.Н. Дунаев, А.М. Михальков, А.В. Мосин, А.В. Кондратьев / Результаты экспериментальных характеристик воздушных конденсаторов паротурбинных установок // Теплоэнергетика. 2013. № 2. С. 1-7.

3. Milman O.O., Spalding D.B., Fedorov V.A. Steam Condensation in Parallel Channels with Nonuniform Heat Removal in Different Zones of Heat-Exchange Surface // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. V.55. Iss.21-22. pp.6054-6059.

4. В.А. Фёдоров, О.О. Мильман, Б.А. Шифрин, П.А. Ананьев, С.Н. Дунаев, А.В. Кондратьев, А.В. Птахин. / Результаты экспериментальных исследований теплогидравлических процессов при конденсации перегретого пара внутри наклонной трубы // ТВТ. 2014. Т. 52. №2. С. 1-4.

**Кондратьев Антон Викторович** – ассистент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: barbarian66@ya.ru.

**Птахин Антон Викторович** — ассистентка кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dr.ago.suv@mail.ru.

**Крылов Виктор Сергеевич** — ассистентка кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: spray\_92@mail.ru.

А.А. Сидоров, А.С. Голиков

## СОЗДАНИЕ РЕШЕТКИ ПРОФИЛЕЙ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ АЭРОУПРУГИХ ЯВЛЕНИЙ

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

В настоящее время, достигнут большой прогресс в области моделирования течений различных сред. Однако даже мощные программные комплексы не могут в полной мере создать картину движения потока в каналах сложной формы или при фазовых переходах.

Поэтому, не теряет своей актуальности натурный или частично натурный эксперимент.

Одна из областей, требующих натуральных испытаний, является исследование течения в выхлопном патрубке турбомашин. Экспериментальным исследованиям в этой области посвящено большое количество работ, например, [1, 2].

В рамках данных экспериментов рассматривается и эффект возникновения неравномерности давления по окружности выхлопного патрубка при повороте потока на выходе из проточной части турбины, а также его влияние на вибрационную надежность турбоагрегата.

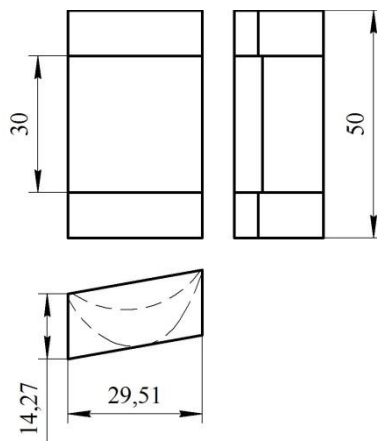


Рис. 1. Элемент экспериментальной решетки.

На рисунке 1 представлен элемент экспериментальной решетки, состоящий из элементов закрепления в виде четырехугольников, для крепления в корпусе установки и элемента, находящегося непосредственно в потоке.

Эти решетки будут использоваться в экспериментальной установке, предназначенной, в том числе, и для определения степени влияния неравномерности давления на вибрационное состояние рабочих лопаток.

Эта часть представляет собой профиль турбинной лопатки. Для проведения эксперимента будут изготовлены несколько серий профилей, характерных для корневой, средней и периферийной частей лопаток.

Данные элементы будут собраны в пакеты общим количеством 6 штук. В середине пакета будет находиться профиль турбинной лопатки, подвешенный на плоской пружине, к которой прикреплены тензодатчики [рис. 2].

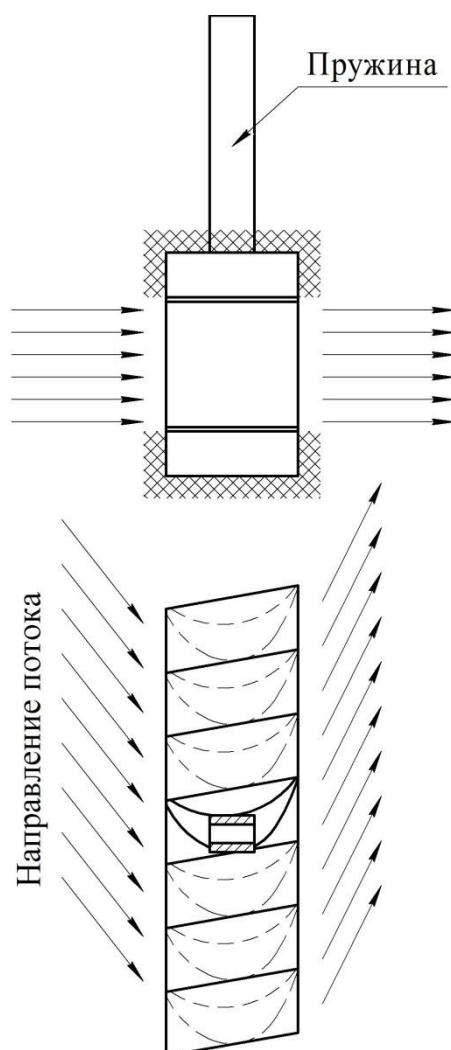


Рис. 2. Экспериментальная решетка в сборе с подпружиненным профилем.

Результаты, полученные в ходе экспериментов, позволят выявить закономерности и величину степени влияния различных аэроупругих явлений на вибрационную надежность рабочих лопаток.

### Список литературы

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин, М.: изд. Энергия, с- 383.
2. Сидоров А. А., Голиков А. С. // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 5, с. 25–32.

**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.a.s@yandex.ru.

А.Ф. Заричный, В.Ю. Ильичев

## СОТОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ ТУРБОУСТАНОВОК И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

КФ МГТУим. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В проточной части (ПЧ) паровой или газовой турбины используются следующие виды уплотнений:

Концевые – устанавливаются в местах выхода концов ротора из корпуса и служат для предотвращения протечек рабочего тела (РТ) из ПЧ и для устранения подсоса воздуха (если давление в ПЧ меньше атмосферного).

Диафрагменные – служат для уменьшения перетекания РТ с одной стороны диафрагмы на другую в местах прохода вала.

Уплотнения рабочей решетки, включающие в себя надбандажные и осевые уплотнения – предназначены для уменьшения потерь от утечек РТ в ступени.

В качестве всех трёх видов традиционно применяются лабиринтные уплотнения. Однако, в настоящее время возможности совершенствования таких уплотнений практически исчерпаны и для достижения большей эффективности сопротивления утечке требуются новые подходы.

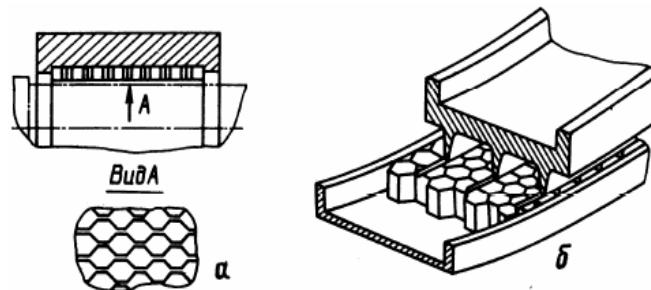


Рис. 1 Сотовые уплотнения:

а) гладкий ротор; б) ротор с лабиринтными гребнями

Перспективным видом уплотнений являются сотовые (СУ), которые представляют собой одно или несколько листовых оснований с внутренним сотовым наполнителем. Сотовую обойму применяют в комбинации либо с гладким валом (рис. 1, а), либо с валом, имеющим лабиринтные гребни (рис. 1, б).

СУ применяются, начиная с 1960-х годов в газотурбинных установках различного назначения, в паровых турбинах - с середины 1990-х годов.

Основные достоинства уплотнений сотовой конструкции:

- наибольшая прочность при минимальных затратах материалов;
- уменьшение поверхности контакта при касании вращающихся частей турбомшины со статором;

- при касании за счет истирания и интенсивного отвода тепла сотовой поверхностью не происходит повреждения уплотнительных гребней, торцев лопаток, а также местного разогрева места контакта;
- уменьшение величины зазоров, благодаря чему снижается уровень аэродинамических сил, действующих на ротор;
- при увеличении радиальных зазоров в процессе эксплуатации обнаруживается меньшая их чувствительность к изменению величины зазора;
- отсутствие автоколебаний вала, вызванных циркуляцией РТ в уплотнении.

Исследованием и совершенствованием сотовых уплотнений в России занимаются многие предприятия и научно-исследовательские организации.

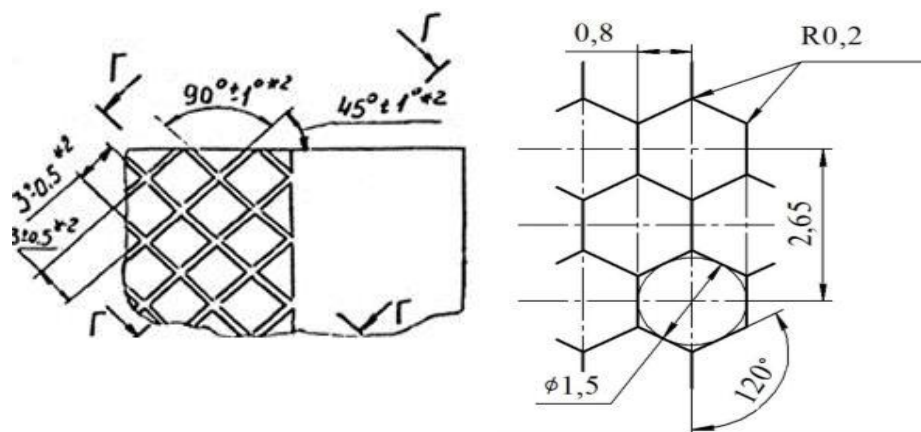


Рис. 2 Четырёхугольные и шестиугольные ячейки

Наиболее часто встречаются СУ с четырёхугольными и шестиугольными ячейками (рис. 2). Производством первого вида занималось предприятие ООО «Невский» [2]. Толщина стенок ячеек составляла  $0,3 \pm 0,1$  мм, результатом чего стала их высокая жёсткость, что могло привести к повреждению торца лопатки при задевании. Уплотнения второго типа производило ОАО «Уралтурбо» [2]. Его стенки изготовлялись из фольги малой толщины 0,05 мм, поэтому при задевании не вызывали повреждения торца лопатки, подвергаясь только смятию или истиранию.

Широким спектром внедрения и ремонта СУ в нашей стране занимается НПП «АРМС» (с 1992 г.) [3]. По его оценкам, применение сотовых надбандажных уплотнений обеспечивает повышение внутреннего относительного КПД цилиндра для различных типов турбин на 0,6-1,7%.

В 2004 г. в период капитального ремонта паровой турбины К-300-240 Каширской ГРЭС на 3-12 ступенях ЦВД были установлены сотовые надбандажные уплотнения НПП «АРМС». Для оценки эффективности модернизации в 2004-2010 гг. выполнено три этапа сравнительных тепловых испытаний (до, после модернизации и через 6 лет эксплуатации перед выводом в капремонт).

Анализ результатов испытаний показал, что расхождение значений относительного внутреннего КПД ЦВД в опытах с включенной и отключенной регенерацией до реконструкции (1 этап) составляет от 1,0% до 1,5%, в то время как в опыте после реконструкции (2 этап) оно близко к нулю.

Анализ результатов 3 этапа и сравнение с результатами, полученными во 2 этапе, показали, что расхождение значений относительного внутреннего КПД ЦВД в опытах с включенными и отключенными ПВД практически отсутствует, из чего сделано заключение, что за шесть лет эксплуатации не произошло существенного увеличения протечек через надбандажные сотовые уплотнения.

В 2012г. в период капитального ремонта турбины Т-250/300-240 ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго» на 2-12 ступенях ЦВД были установлены сотовые надбандажные уплотнения НПП «АРМС».

Прирост внутреннего относительного КПД ЦВД турбины отмечен во всем диапазоне нагрузок, при этом величина прироста увеличивается с ростом расхода свежего пара. При максимальной паровой нагрузке, прирост внутреннего относительного КПД ЦВД составляет 1,68%, что соответствует приросту мощности приблизительно на 1,5 МВт. Сопоставление значений внутреннего относительного КПД ЦВД на режимах с включенными и отключенными ПВД, до и после модернизации показало, что расхождение указанных величин уменьшилось с 1,1% до 0,2%.

В 2012г. в период капитального ремонта турбины К-800-280-5 Пермской ГРЭС на 3-10 ступенях ЦВД были установлены сотовые надбандажные уплотнения НПП «АРМС». Анализ показывает стабильный прирост относительного внутреннего КПД во всем диапазоне расхода свежего пара, но наиболее значительное его приращение 1,28% (около 3,8 МВт) зафиксировано на номинальных режимах работы турбоагрегата.

Расчётные данные, полученные полученными специалистами СКБ «Турбина», указывают на увеличения внутреннего относительного КПД ЦВД на  $0,5 \div 0,7\%$ .

Таким образом, около половины прироста КПД произошло из-за установки СУ, другая половина – следствие ремонта ПЧ.

Оценка эффективности внедрения концевых СУ ЦСД-2 и ЦНД выполнена специалистами «Мосэнергоналадка» в 2003 году на турбоагрегатах Т-250/300-240 ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго».

В ходе проведения испытаний зафиксированы следующие результаты:

- прекращение присосов воздуха в вакуумную систему через концевые уплотнения (КУ) ЦНД и ЦСД-2
- снижение давления в конденсаторе на  $0,005 \text{ кг/см}^2$ , что обеспечило увеличение КПД блока на 0,17% на конденсационном режиме работы;

- расширение рабочего диапазона относительных перемещений РНД и РСД-2 с устранением риска возможных задеваний на переходных режимах.
- устранение обводнения масла вследствие нормализации работы эжекторов отсоса пара из КУ.

Приведённые примеры доказывают существенный положительный эффект от замены традиционных лабиринтных уплотнений на сотовые.

Для дальнейшего повышения эффективности и надёжности работы сотовых уплотнений необходимым является выявление их оптимальных конструктивных характеристик на основе исследования происходящих в них процессов.

В 1980-х годах исследователи Института атомной энергии им. И.В. Курчатова [1] обнаружили физический эффект, заключающийся в том, что нагретая поверхность с неглубокими лунками («сотовая») резко интенсифицирует теплообмен не только за счет турбулизации потока, но и за счет появления в потоке самоорганизующихся смерчеобразных струй. При этом на самоорганизацию таких течений затрачивается сравнительно малое количество энергии потока.

Дальнейшие исследования объяснили феномен роста энергии крупного вихря (смерча), возникающего в лунке: мелкие вихри, порожденные трением вязкого потока об обтекаемую поверхность, поглощаются этим вихрем, создавая «порядок из беспорядка».

Результаты практических и теоретических исследований показывают, что мелкомасштабные вихри в пространстве сотовых ячеек могут существенным образом влиять на сопротивление каналов с такими поверхностями. Причем в зависимости от конфигурации ячеек и их размеров это влияние может увеличивать или уменьшать сопротивление таких каналов.

Целью экспериментов, проведённых в Брянском Государственном техническом университете (БГТУ) [4] являлось сравнение по эффективности работы гладких и сотовых уплотнений при различных величинах радиальных зазоров, а также сопоставление двух конструктивно различных типов сотовых уплотнений между собой.

КПД ступени с сотовым уплотнением в области оптимальных значений  $u/C_0((u/C_0)_{opt}=0,6...0,7)$  оказался выше, чем КПД ступени с уплотнением «гладкая стенка». Однако при радиальном зазоре  $\delta = 0,5$  мм КПД ступени с гладким уплотнением оказался выше, чем КПД ступени с сотовым уплотнением с  $d_{я} = 2,5$  мм, но все же ниже, чем при использовании сотового уплотнения с  $d_{я} = 4$  мм. Указанное явление объясняется некоторыми особенностями течения потока через радиальный зазор при различных конструктивных параметрах сотового уплотнения.

В результате внедрения СУ в ПЧ ТВД агрегата ГТ-750-6 на компрессорной станции «Воскресенск» [5] выявлено увеличение относительного внутреннего КПД проточной части на 2%. Эффективный абсолютный КПД



установки до модернизации  $\eta_e = 0,292$ , а после модернизации  $\eta_e = 0,298$ . При разборке после наработки более 6000 часов дефектов уплотнений не обнаружено.

Московский энергетический институт совместно с ОАО «Силловые машины» и ранее упомянутым «АРМС» также проводил испытания сотовых уплотнений [6].

Сравнивались надбандажные СУ, идентичные установленным на ЦВД Т-100-130, ПТ-60(80)-130, К-200-130 с радиальными уплотнениями, применяемыми в ЦВД ПТ-60(80)-130, Р-50-130 и осерадиальными, установленными в ЦВД Т-100-130, К-300-240.

В результате полученных зависимостей выявлено, что расход через СУ при  $\delta=0,5$  мм составляет 40% от расхода через радиальное уплотнение с зазором 1,5 мм. Жесткость аэродинамических сил СУ при зазорах, меньших 0,5 мм имеет тенденцию к резкому снижению по сравнению с жесткостью прямоточного уплотнения с  $\delta=1,5$ мм.

Анализ результатов испытаний сотового и осерадиального уплотнений показал, что расход через СУ при рабочем зазоре  $\delta=0,5$ мм практически равен расходу через осерадиальное уплотнение с рабочим радиальным зазором 0,8-1,0 мм, при этом жесткость неконсервативной составляющей аэродинамической силы СУ ниже на 10-15% по сравнению с осерадиальным уплотнением.

В ходе экспериментов были измерены скорости и направления потока в надбандажной камере на границах статора и ротора. Оказалось, что в сотовом уплотнении интенсивность вихря значительно ниже, чем в уплотнении с гладкими стенками надбандажной камеры, при этом на некоторых режимах снижение составляло до 30%. При малых радиальных зазорах ( $\delta \leq 0,5$ мм) в камерах устанавливалось практически канальное течение.

Приведённые результаты исследований, проведённых ведущими разработчиками сотовых уплотнений, позволяют сделать следующие выводы:

1. При радиальных зазорах  $\delta=0,5$ мм и меньше сотовое уплотнение снижает утечки рабочего тела эффективнее, чем лабиринтное.
2. Сотовое уплотнение снижает величину окружной составляющей потока, что способствует уменьшению величины неконсервативной составляющей аэродинамической силы и, как следствие, уменьшает низкочастотную вибрацию ротора.
3. Установка экспериментально отработанных конструкций сотовых уплотнений позволяет повысить относительный внутренний КПД ступеней и турбины в целом.
4. Для дальнейшего совершенствования сотовых уплотнений необходимо более детальное исследование и объяснение происходящих в них физических процессов. Для этого планируется применение современных методов математического моделирования.

### Список литературы

[1]. В.В. Алексеев, И.А. Гаччиладзе, Г.И. Кикнадзе, В.Г. Олейников. Смерчевой энергообмен на трёхмерных вогнутых рельефах – структура самоорганизующихся течений, их визуализация и механизмы обтекания поверхностей. *Труды Второй Российской конференции по теплообмену. Т.6.* Изд-во МЭИ, 1998, с. 37-42.

[2]. Перевезенцев В.Т., Шилин М.А. Совершенствование конструкции уплотнения зазоров в проточной части газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4. *Вестник Брянского государственного технического университета*, 2015, №1, с. 35-40.

[3]. *Эффективность внедрения сотовых уплотнений* URL: [http://www.armstech.ru/cat/jeffektivnosti\\_vnedrenija\\_sotovykh\\_uplotnenijj/](http://www.armstech.ru/cat/jeffektivnosti_vnedrenija_sotovykh_uplotnenijj/) (дата обращения 21.10.2015).

[4]. Буглаев, В.Т., Перевезенцев В.Т. и др. *Сотовые уплотнения в турбомашинах: монография.* Брянск, Изд-во БГТУ, 2006, 192с.

[5]. Буглаев В.Т., Климов А.А., Перевезенцев В.Т., Перевезенцев С.В. Внедрение сотовых уплотнений в проточной части ТВД ГТ-750-6. *Отчет о НИР №2466.* Брянск, 1999, 89 с.

[6]. В.Г.Грибин, С.С.Дмитриев, А.Г.Костюк, Б.Н.Петрунин, С.В. Ушинин. Экспериментальное исследование новых типов уплотнения для паровых турбин. *Отчет о НИР*, М.: Изд-во МЭИ, 2011.

**Заричный Александр Фёдорович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sefanK790@yandex.ru.

**Ильичев Владимир Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СЕКЦИЯ 1. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....</b>	<b>3</b>
<i>Свитка А.С., Соколова И.Д.</i> Анализ американского подхода к модернизации станков .....	4
<i>Вяткин А.Г., Бычков Д.И.</i> Анализ структуры переналаживаемых приспособлений .....	7
<i>Тягунова З.В.</i> Анализ технологичности форм деталей, получаемых литьем под давлением.....	10
<i>Савина Ю.А., Мусохранов М.В.</i> Влияние финишных операций на качественные показатели деталей .....	13
<i>Санова Л.А.</i> Выбор материалов для изготовления пресс-форм.....	16
<i>Вяткин А.А., Вяткин В.А.</i> Выбор способа настройки гидравлического пресса .....	20
<i>Волков А.В., Устинов И.К.</i> Границы применимости общего вида модели волочения микропроволоки .....	22
<i>Шаталов В.К., Сорокин С.П., Штокал А.О.</i> Испытания на износ при торцовом трении цилиндрической колодки, вырезанной из наплавки ВТ6св по наплавке из диборида титана .....	25
<i>Попова Т.В., Вяткин А.Г.</i> Контактное (пластическое) трение при холодной обработке давлением и его влияние на формообразование. ....	28
<i>Устинов И.К., Филимонов И.Ю.</i> Контроль качества износостойкого покрытия на режущем инструменте ..	31
<i>Прохоров А.Н., Малышев Е.Н.</i> Обоснование выбора варианта обработки сложной корпусной детали .....	33
<i>Савосто В.В., Зыбин И.Н.</i> Оптимизация операций сборки и сварки узлов держателя передней панели автомобиля .....	35
<i>Малышев Е.Н., Бысов С.А.</i> Организация технологических систем на основе концентрации обрабатывающих и сборочных процессов .....	38
<i>Калмыков В.В., Мусохранов М.В., Юсупова К.Н.</i> Основные методы контроля остаточных напряжений в поверхностном слое металла.....	42

<i>Малышев Е.Н., Калмыков В.В., Мусохранов М.В.</i>	
Остаточные напряжения и поверхностная энергия деталей.....	45
<i>Малышев Е.Н., Колков И.Е.</i>	
Перспективы использования и производства изделий из вспененного полистирола .....	47
<i>Калмыков В.В., Мазенков А.А.</i>	
Повышение эксплуатационных характеристик деталей машин и механизмов технологическими операциями .....	51
<i>Потемкин В.Ю., Соколова И.Д.</i>	
Расчет инструмента методом конечных элементов в SolidWorks .....	54
<i>Федорова О.С., Калмыков В.В.</i>	
Роль экспериментов в обеспечении качества изделий и требования к ним .....	57
<i>Скорская Ю.Н., Иванов Ю.В.</i>	
Фрезерование поверхностей дисков специальной фрезой .....	60
<i>Свитка А.С., Устинов И.К., Базалиева Ю.В.</i>	
Эксплуатация инструмента из быстрорежущих сталей с покрытием TiN .....	62
<i>Тягунова З.В.</i>	
Эффективность применения червячных модульных фрез клееных конструкций .....	64
<i>Скорская Ю.Н., Святкин И.С.</i>	
Эффективность процесса проектирования подсистемы инструментообеспечения .....	67
<b>СЕКЦИЯ 2.</b>	
<b>ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>69</b>
<i>Егоров Д.И., Труханов К.Ю., Царьков А.В.</i>	
Автоматизация и роботизация сварочных технологий в автомобилестроение.....	70
<i>Сапожников А.Ю., Орлик Г.В., Дьячук В.В.</i>	
Анализ методов получения сварных швов типа труба - трубная доска .....	73
<i>Ткачев Д.А., Бойко В.Н.</i>	
Анализ системы аттестации сварочного производства Калужской области.....	77
<i>Соловьев Н.И., Труханов К.Ю.</i>	
Влияние геометрии и качества поверхности электрода на процессы сварки.....	80
<i>Зыбин И.Н.</i>	
Восстановление шлицев валов дуговой наплавкой под слоем флюса .....	83

<i>Коваленко А.С., Зыбин И.Н.</i> Выбор скорости охлаждения при сварке в зависимости от предварительного подогрева кронштейна .....	85
<i>Дубровский В.А., Потапов А.В., Амеличева А.Ю.</i> Выбор технологии восстановления наружных поверхностей в деталях типа «втулка» .....	88
<i>Бохан Д.Е., Максимов Н.Н.</i> Газопламенная правка металлов .....	94
<i>Легостов В.В., Труханов К.Ю., Царьков А.В.</i> Изучение влияния различных факторов на процессы сварки алюминиевых и магниевых сплавов в среде инертных газов .....	96
<i>Соловьев Н.И., Зверев П.С., Труханов К.Ю.</i> Обзор технологий лазерной резки .....	101
<i>Парамонов С.С., Максимов Н.Н.</i> Особенности точечной контактной сварки изделий из алюминиевых сплавов .....	106
<i>Ненарокомов Г.К., Максимов Н.Н.</i> Повышение технологических свойств дуги и её стабильности при сварке неплавящимся электродом в инертных газах .....	111
<i>Орлик Г.В., Орлик А.Г., Дандин О.В.</i> Применение современных материалов для повышения работоспособности износостойких деталей .....	115
<i>Иванов А.А., Григорян К.А., Труханов К.Ю.</i> Применение модульной системы LTR для исследования высокотемпературных сварочных процессов .....	120
<i>Иванов А.А., Григорян К.А., Труханов К.Ю.</i> Применение термопар при исследованиях сварочных процессов .....	123
<i>Ткачев Д.А., Максимов Н.Н.</i> Совершенствование технологии контактной сварки деталей из меди и латуни .....	127
<i>Царьков А.В., Дьячук В.В., Клещев С.В.</i> Сопоставление отечественных и международных стандартов в области на- плавки сваркой .....	130
<i>Хохлов Т.М., Трунков А.С., Труханов К.Ю.</i> Устройство и система управления установки лазерной резки ЛТ-400И...	135
<b>СЕКЦИЯ 3.</b> <b>ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ</b> .....	139
<i>Йе Еинт Ко Ко, Твердова С.М.</i> Анализ некоторых характеристик полупроводниковых лазерных диодов .....	140

<i>Чернова Н.Н., Андреев В.В.</i> Влияние параметров кремниевой пластины на характеристики фотодиодов.....	144
<i>Аунг Пьо</i> Влияние температуры на выходные характеристики солнечных элементов CdS-CdTe .....	146
<i>Андреев В.В., Столяров А.А., Романов А.В., Ахмелкин Д.М.</i> Метод определения интегральной поглощенной дозы радиационного излучения с использованием МДП-сенсоров.....	147
<i>Андреев Д.В.</i> Моделирование стекания заряда в элементах энергонезависимой памяти на основе МДП-структур .....	152
<i>Шагаев В.В., Тун Тун Лин</i> Поверхностные магнитостатические волны с термостабильными частотами.....	156
<i>Аунг Пьей Зон, Мазин А.В.</i> Термодинамические соотношения термо-электрических явлений.....	162
<i>Андреев В.В., Дмитриев В.Г., Чернова Н.Н., Рытикова А.В.</i> Тестовые структуры для контроля качества КМДП ИМС с поликремневым затвором .....	166
<i>Чжо Зай, Гришин Ю.К.</i> Электродвижущая сила побочных эффектов .....	171
<b>СЕКЦИЯ 4.</b> <b>ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ .....</b>	<b>175</b>
<i>Смоляр С.Г., Землянский А.В.</i> Анализ рынка, возможности и способов создания ГПА мощностью свыше 25МВт на базе технологий отечественных производителей.....	176
<i>Землянский А.В., Филинков Д.И.</i> Анализ схем проточной части вспомогательных силовых установок.....	180
<i>Филиппов И.В., Дьячук В.В., Клещев С.В.</i> Вибродиагностирование как один из способов предотвращения аварий в пневмоустановках.....	183
<i>Филиппов И.В., Дьячук В.В., Клещев С.В.</i> К вопросу о возможных причинах взрывов маслоотделителей.....	187
<i>Липихин Е.Г., Шевелев Д.В.</i> Когенерационная установка с газовой микротурбиной измененной очередности процессов .....	190
<i>Ибрагимов С.В., Ильичев В.Ю.</i> Лабиринтные уплотнения турбомашин и перспективы их совершенствования .....	195

<i>Филиппов И.В., Дьячук В.В., Клещев С.В.</i>	
Нормализация работы винтовых маслозаполненных компрессоров.....	199
<i>Супельняк М.И.</i>	
Особенности высокочастотной циклической теплоотдачи с переменной во времени интенсивностью .....	202
<i>Тарасов Е.В., Жинов А.А.</i>	
Перспективные способы повышения КПД паротурбинных установок ....	204
<i>Лужецкий А.А., Завальный Ф.Г., Гридчин Н.В.</i>	
Повышение эффективности цикла газотурбинных установок путем испарительного охлаждения рабочего тела.....	208
<i>Емельянов Н.Э., Карышев А.К.</i>	
Преимущества использования регулируемого соплового аппарата в силовой турбине ГТУ .....	211
<i>Кондратьев А.В., Птахин А.В., Крылов В.С.</i>	
Режимы течения двухфазной смеси при конденсации водяного пара в наклонной охлаждаемой трубе .....	216
<i>Сидоров А.А., Голиков А.С.</i>	
Создание решетки профилей турбинных лопаток для экспериментальной установки по исследованию аэроупругих явлений .....	219
<i>Заричный А.Ф., Ильичев В.Ю.</i>	
Сотовые уплотнения турбоустановок и направления их совершенствования .....	221
<b>СОДЕРЖАНИЕ</b> .....	227

**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 11.11.2015.

Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. 14,5. Усл. п. л. 13,49. Тираж 50 экз. Заказ № 163

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