

**БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.791.3.053

**ЛАТЬПОВА**

Елена Юрьевна

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ  
ПРИПОИ И ФЛЮСЫ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
ПАЙКИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ, СТЫКОВЫХ И  
НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.03.06

«Технологии и машины сварочного производства»

Могилев, 2009

Работа выполнена на кафедре «Порошковая металлургия, сварка и технология металлов» Белорусского национального технического университета

Научный руководитель: **Шелег Валерий Константинович**, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Официальные оппоненты: **Куликов Валерий Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства», Белорусско-Российский университет, г. Могилев

**Занковец Павел Васильевич**, кандидат технических наук, заведующий отделом компьютерных технологий ГНУ «Институт порошковой металлургии», г. Минск

Оппонирующая организация: ГНУ «Физико-технический институт»  
НАН Беларуси, г. Минск

Защита состоится 3 апреля 2009 года в 14-00 часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.18.01 при Белорусско-Российском университете по адресу: 212030, г. Могилев, проспект Мира 43, корп. 1, ауд.323, тел. (8-0222) 22-52-12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-Российского университета

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2009 г.  
Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций доктор

физ.-мат. наук



Борисов В.И.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Пайка является важной составной частью промышленного комплекса Республики Беларусь. Ее широко применяют во многих отраслях промышленности, особенно при получении неразъемных соединений цветных металлов и разнородных материалов, а также заготовок, имеющих защитное покрытие.

Современные тенденции развития пайки связаны в основном с разработками в области технологии высокотемпературной пайки и материалов, используемых для этой цели. При этом высокотемпературная пайка повышает энергоемкость процесса, увеличивает уровень термических напряжений, вызывает в соединяемых материалах сложные необратимые физико-химические процессы, которые часто обесценивают исходные свойства материалов. Особенно заметны недостатки высокотемпературной пайки при соединении материалов с защитными покрытиями.

Поэтому разработка новых конструкций и материалов для получения высокоэффективных соединений в условиях низкотемпературной пайки является актуальной научно-технической задачей, решение которой имеет важное практическое значение для различных отраслей машиностроения.

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Тема диссертационной работы включена в утвержденные научные планы работы УО «Белорусско-Российский университет» и соответствует следующим направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 годы (Перечень утвержден постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 г. № 512).

2. Механика машин, обеспечение надежности и безопасности технических систем, повышение конкурентоспособности продукции машиностроения;

3. Физические, химические, биологические и генетические методы и технологии получения новых веществ, материалов.

Работа выполнялась в соответствии с госбюджетной темой научно-исследовательской работы кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Белорусско-Российского университета ГБ – 0621 «Улучшение качества сварных соединений на нефтехимическом оборудовании и технологических трубопроводах» раздел «Новые конструкции паяных соединений, припои и флюсы, обеспечивающие повышенную работоспособность паяных узлов нефтехимического производства и технологических трубопроводов» (с 2005 по 2009 г.г.)

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка конструктивных элементов, композиционных припоев и флюсов, повышающих работоспособность телескопических, стыковых и нахлесточных низкотемпературных паяных соединений.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработать математическую модель напряженного состояния паяных телескопических соединений из разнородных материалов и рассчитать термические напряжения, обусловленные различием физико-механических свойств соединяемых материалов;

- разработать математическую модель и рассчитать рабочие напряжения в паяных соединениях нахлесточного типа методом конечных элементов;

- разработать методики испытаний паяных соединений на смачивание материалов расплавленным припоем, на длительную и циклическую прочность;

- разработать, провести испытания и внедрить в производство новые конструктивные элементы, композиционные припои и флюсы, повышающие работоспособность телескопических, стыковых и нахлесточных низкотемпературных паяных соединений;

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель напряженного состояния телескопических паяных соединений из разнородных материалов и результаты расчета термических напряжений в этих соединениях, позволившие учитывать различие в физико-механических свойствах соединяемых элементов при конструировании и разработке технологических процессов пайки.

2. Математическая модель, основанная на использовании метода конечных элементов и пакета прикладных программ «COSMOS-M», а также результаты оценки напряженного состояния паяных соединений, как при воздействии остаточных, так и рабочих напряжений, которые позволили выявить и оценить количественно концентрацию рабочих напряжений у краев паяного шва.

3. Новые конструктивные элементы паяных соединений телескопического, стыкового и нахлесточного типов, обеспечивающие снижение концентрации рабочих напряжений и повышение несущей способности, а также результаты исследования их работоспособности.

4. Методики испытания паяных соединений на смачивание материалов расплавленным припоем, на циклическую и длительную прочность, обеспечивающие повышение достоверности, снижение материалоемкости и трудоемкости при проведении испытаний.

5. Новые композиционные материалы для низкотемпературной пайки меди на основе оловянно-свинцового припоя с наполнителем в виде медного порошка в количестве до 20% по массе и канифольного флюса, модифицированного кубовым остатком производства капролактама в количестве до 50% от массы канифоли, позволившие повысить статическую, циклическую и длительную прочность, а также коррозионную стойкость паяных соединений.

6. Новые конструктивные элементы паяных соединений нахлесточного типа с усиливающими стержнями различной формы, а также стыковых паяных соединений замкового типа, обеспечивающих повышение статической прочности на 20...60%, и полное устранение явления ползучести соединений, паяных низкотемпературными оловянно-свинцовыми припоями,

## **Личный вклад соискателя**

При выполнении работы автором лично:

- получены математические зависимости для расчета осевой составляющей термических напряжений в паяных телескопических соединениях материалов, отличающихся величиной коэффициентов термического расширения;
- разработана математическая модель напряженного состояния телескопических соединений из разнородных материалов;
- разработана схема создания остаточных напряжений в телескопических соединениях путем предварительного деформирования внутренней детали в осевом направлении;
- предложена более эффективная конструкция инжектора газовых горелок и резаков, обеспечивающая повышение перепада рабочего давления путем закручивания потока кислорода, подаваемого в инжектор;
- разработаны методики проведения экспериментальных исследований процесса смачивания паяемых материалов расплавленным припоем и проведения испытаний на длительную прочность и прочность при циклических нагрузках;
- предложены конструкции образцов для проведения испытаний паяных соединений методом изгиба с вращением, обеспечивающие возможность совместного воздействия переменных нормальных и касательных напряжений на испытываемое соединение, а также устраняющие неопределенность в оценке получаемых результатов из-за одновременного нагружения двух паяных швов;
- разработана и внедрена технология пайки соединений в системе дистанционного контроля влажности тепловой изоляции предварительно изолированных труб;

Участие соавторов в совместных работах:

В.К. Шелег, как научный руководитель оказывал практическую помощь и содействие на всех этапах выполнения настоящей работы;

Ю.А. Цумарев участвовал в создании математической модели распределения рабочих напряжений в паяном телескопическом соединении, а также в разработке конструкций паяных соединений, образцов для их испытания на циклическую прочность и устройств для испытания на длительную прочность;

Т.С. Латун участвовала в разработке конструкций паяных соединений, а также образцов для испытания паяных соединений на циклическую прочность и установки для одновременного нагружения нескольких образцов при проведении испытаний на длительную прочность.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Новые конкурентноспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка» (Могилев, 2000г.); «Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов» (Могилев, 2001г.), «Современные технологии, материалы, машины и оборудование» (Могилев, 2002г.); «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2004, 2006, 2007 г.г.): на 4-м международном симпозиуме «Технологии, оборудование, качество» (Минск, 2001г.), на республиканских научно-

технических конференциях аспирантов, магистрантов и студентов «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2005 и 2006 г.г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 47 научных работах, в том числе в 5 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 2,4 авторских листа, 7 статьях в других журналах, 9 материалах и тезисах докладов научных конференций и симпозиумов, 13 патентах на изобретения и 13 патентах на полезную модель Республики Беларусь (всего 6 авторских листов).

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 161 страницу. Она содержит 100 страниц основного текста, 64 рисунка на 23 страницах, 14 таблиц на 6 страницах, список использованных источников в количестве 204 наименований, включая 47 авторских работ, и 6 приложений на 19 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Показано, что процесс получения паяных соединений связан с рядом проблем в их конструировании, составах технологических материалов для пайки, а также в проведении испытаний готовых изделий и оценке получаемых результатов. Намечены основные направления повышения эффективности процесса пайки за счет создания новых типов паяных соединений, достоверной оценки их напряженного состояния, а также новых припоев и флюсов для пайки.

**В первой главе** изложены основные сведения о современном уровне процесса пайки, основных типах применяемых паяных соединений и технологических материалах, а также методах исследования процесса пайки и работоспособности паяных соединений. Рассмотрены также перспективы повышения эффективности использования паяных соединений. Показано, что основным фактором, определяющим эксплуатационные показатели паяных соединений и экономическую эффективность их применения, является конструктивный. Приведены сведения об основных типах паяных соединений – нахлесточных, телескопических и стыковых, а также наиболее применяемых комбинациях из них. Выявлены недостатки известных конструкций паяных соединений – значительная концентрация напряжений и связанная с ней недостаточная несущая способность, низкие показатели циклической и длительной прочности. Установлено отсутствие прогресса и заметного развития в этом важном направлении.

Изложены основные сведения о процессе образования паяного соединения, его закономерностях и путях совершенствования. Показано, что смачивание является свидетельством физико-химического взаимодействия расплавлен-

ного припоя с паяемым материалом и поэтому является необходимой стадией образования паяного соединения. Для количественной оценки этого явления используют краевой угол смачивания  $\Theta$ . При этом широко используется уравнение Юнга:

$$\cos \Theta = (\sigma_{тг} - \sigma_{тж}) / \sigma_{жг} \quad (1)$$

где:  $\sigma_{тг}$  - поверхностное натяжение на границе раздела твердое тело - газ,  $\sigma_{тж}$ ,  $\sigma_{жг}$  - поверхностное натяжение на границах твердое тело - жидкость и жидкость - газ соответственно (Н/м).

Установлено, что имеются сторонники иного подхода к оценке смачивающей способности, которые считают, что уравнение (1) лишено физического, практического и даже математического смысла. Проведен тщательный анализ их аргументации, выявлены ошибки, допущенные при этом, доказана обоснованность и правомерность применения формулы (1) для анализа процесса смачивания. Эта формула, в частности, показывает, что наиболее эффективным путем улучшения смачивания является воздействие на величину поверхностного натяжения  $\sigma_{тг}$  с целью его увеличения, что можно выполнить, подбирая соответствующий состав паяльного флюса.

Проведенный анализ литературных источников показал, что использование отходов производства, например капролактама в составах паяльных флюсов является перспективным направлением совершенствования процесса пайки путем создания композиционных припоев, состоящих из легкоплавкой основы, порошкообразного наполнителя и флюса.

Кроме того, были рассмотрены вопросы, связанные с перспективами повышения эффективности процесса пайки, а также приведены сведения о существующих методах исследования работоспособности паяных соединения, их достоинствах и недостатках. Исходя из этого анализа, была сформулирована цель исследования и его задачи.

Во **второй** главе приведено описание основных методов проведения экспериментальных исследований.

Для экспериментального определения термических напряжений были использованы рентгенографический и тензометрический методы. Исследования проводились на дифрактометре ДРОН-3, снабженном гониометрическим устройством, счетчиком интенсивности излучения и самопишущим электронным потенциометром. При определении макронапряжений производили сопоставление интерференционных кривых, снятых с паяного телескопического соединения алюминий-медь и алюминиевой трубки, свободной от термических напряжений. Обработка дифрактограмм включала разделение  $\alpha_1$  -  $\alpha_2$  - дублета и определение положений центров тяжести  $\alpha_1$ - профилей для каждого образца.

При использовании тензометрического метода исходили из плосконапряженного состояния в поверхностном слое трубы и обобщенного закона Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \\ \sigma_x &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  - главные деформации;  $\sigma_x, \sigma_y$  - главные напряжения.

Экспериментальное исследование процессов смачивания проводили по стандартным методикам с оценкой результатов по длине затекания в Т-образном соединении пластин и по растеканию капли. При оценке активности флюсов в качестве критерия использовали параметр  $\psi = h/d$ ,  $h$  - высота капли (м),  $d$  - ее диаметр (м). Расчет краевого угла смачивания  $\Theta$  проводили по формуле:

$$\cos\Theta = (1 - 4\psi^2)/(1 + 4\psi^2) \quad , \quad (3)$$

Такой подход позволил устранить влияние погрешности дозирования объема припоя на точность получаемых результатов. Были разработаны методы оценки точности результатов, получаемых при растекании припоев, которые показали, что высота капли может рассматриваться как критерий, эквивалентный по точности площади, смоченной припоем.

Испытания паяных соединений на циклическую прочность проводили методом изгиба с вращением, для чего были разработаны новые конструкции образцов, обеспечивающих экономию дорогостоящих паяемых материалов. Эти образцы исключают неопределенность оценок из-за наличия двух одинаковых испытываемых паяных швов, позволяют проводить испытания при совместном действии не только нормальных, но и касательных напряжений, более характерных для реальных условий эксплуатации. Кроме того, была предложена конструкция образца, позволяющая исследовать влияние концентрации напряжения на циклическую прочность паяных соединений за счет выполнения испытываемых паяных швов в виде правильного многоугольника. При определении циклической прочности соединений, паянных с применением предлагаемых технологий, проводили ускоренные испытания по методу Локати, основанном на гипотезе линейного суммирования относительных долговечностей при ступенчатом нагружении. Этот метод обеспечивает значительное сокращение объема испытаний, а также хорошее совпадение результатов с данными, полученными при испытании по полной программе.

Соединения, паянные легкоплавкими припоями системы Pb-Sn, подвержены ползучести даже при комнатной температуре. Поэтому в работе проводились сравнительные исследования длительной прочности известных и разработанных технических решений в области низкотемпературной пайки. В процессе проведения этих экспериментов было установлено, что известные методики, предусматривающие раздельное нагружение паяных соединений, требуют больших затрат времени и не обеспечивают высокой достоверности, т.к. трудно обеспечить стабильные температурные условия испытаний для различных образцов. Поэтому нами после проведения предварительных исследований эта методика была усовершенствована. В ней было реализовано одновременное нагружение нескольких паяных соединений и предусмотрено измерение деформаций ползучести каждого соединения. Это позволило определять скорость ползучести и использовать ее в качестве критерия, характеризующего длительную прочность паяного соединения. Следует отметить, что при одновременном нагружении все образцы находятся в абсолютно одинаковых условиях и по ве-



личине нагрузки, и по температуре испытания. Все это самым благоприятным образом сказывается на достоверности результатов сравнительных испытаний.

На основании анализа литературных данных были выбраны следующие материалы для исследований: медь М1, низкоуглеродистая сталь 08 кп, алюминиевый сплав АМг 2, оловянно-свинцовые припои ПОС 40, ПОС 61 и канифоль живичная.

**Третья глава** посвящена разработке математических моделей и расчету напряженного состояния паяных телескопических соединений. Одной из составляющих напряженного состояния при пайке разнородных материалов являются остаточные напряжения, обусловленные различием в коэффициентах термического расширения соединяемых материалов. Ввиду значительного влияния, которое эти напряжения оказывают на работоспособность изделий, нами были получены формулы для расчета остаточных термических напряжений. В результате анализа известных зависимостей было установлено, что необходимо изменить подход к расчету осевой составляющей этих напряжений. Первоначально нами были получены формулы, полученные на основании суперпозиции осевых напряжений от различного температурного сокращения соединяемых труб, охлаждающихся после пайки, и сжимающих напряжений в основном материале, обусловленных литейной усадкой кристаллизующегося припоя. В дальнейшем эти зависимости были обобщены, что позволило применять их для пайки припоями, увеличивающими свой объем при кристаллизации. Проведенный анализ показал, что процесс изменения объема при кристаллизации припоя оказывает незначительное влияние на величину термических напряжений из-за низкого предела текучести припоя в нагретом состоянии и малого поперечного сечения паяного шва. Таким образом, окончательно выражения для осевых напряжений  $\sigma_z$  в наружной и внутренней трубах записаны нами в следующем виде:

$$\sigma_{zn} = \frac{E_n(\alpha_n - \alpha_6)(T - T_o)}{2\mu - a + (c - 2\mu)} \cdot \frac{a - bc}{1 - b}; \quad (4)$$

$$\sigma_{z6} = \frac{E_6 b(\alpha_n - \alpha_6)(T - T_o)}{2\mu - a + (c - 2\mu)} \cdot \frac{a - bc}{1 - b}, \quad (5)$$

где  $E_n$  и  $E_6$  – модули упругости материалов соединяемых труб;

$\alpha_n$  и  $\alpha_6$  -коэффициенты линейного расширения;

$T$  и  $T_o$  – температуры солидуса припоя и эксплуатации соединения соответственно.  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $\psi = E_6 / E_n$ ;  $s$  – паяльный зазор;  $a, b, c$  – безразмерные параметры, значения которых определяются по следующим формулам:

$$a = 1 + D_1^2 / D_2^2; \quad b = \frac{D_2^2 - D_1^2}{\psi \Delta_6^2}; \quad c = 1 + D_3^2 / D_2^2;$$

$D_1$  и  $D_2$  – наружный и внутренний диаметры охватывающей трубки,  $D_3$  – внутренний диаметр охватываемой трубки.

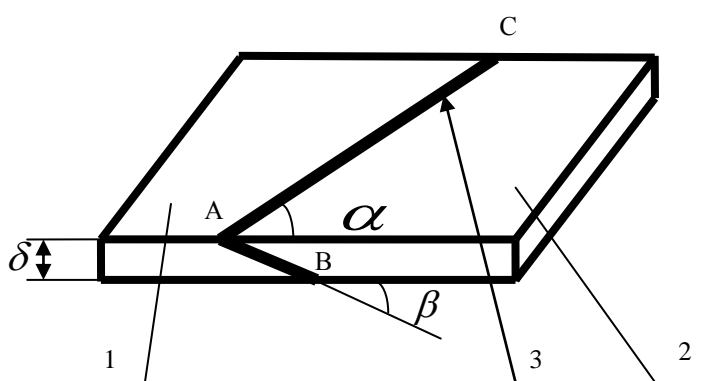
В этих формулах индекс «н» относится к наружной, а индекс «в» - к внутренней трубкам соответственно. Для расчета окружных и радиальных напряжений можно использовать известные зависимости. Сравнение результатов расчета показало, что предложенные нами формулы дают лучшее совпадение с экспериментальными результатами, чем известные. В зависимости от величины паяльного зазора погрешность расчетов уменьшилась с величины 7...13% до 1...4%.

Для получения более полной и объективной картины были выполнены расчеты остаточных термических напряжений в паяном телескопическом соединении медь - сталь с использованием метода конечных элементов и современного программного комплекса «Cosmos-M». Это позволило более полно учесть в расчетах свойства материала прослойки припоя, изменение механических свойств соединяемых материалов, связанное с изменением их температуры, а также произвести расчеты для труб более сложной формы, чем цилиндрическая. Сравнение результатов, полученных методом конечных элементов, с данными расчета по формулам (4) и (5) показало хорошее их совпадение. Погрешность, которая имела место при сравнении результатов, не превышала 5...6%. Следует отметить только небольшую концентрацию напряжений на концах нахлестки, не учтенную формулами (4) и (5). При этом было установлено, что напряженное состояние оказывается более благоприятным (с меньшим уровнем напряжений), если внутри находится деталь из материала с меньшим КТР и большим модулем упругости.

Распределение рабочих напряжений рассчитывали в телескопических соединениях сталь-сталь, находящихся под действием равномерно распределенной осевой нагрузки, также методом конечных элементов с помощью программы «Cosmos-M». В результате расчетов было установлено, что паяное соединение труб без подготовки кромок характеризуется значительной концентрацией напряжения у краев паяного шва. Коэффициент концентрации напряжений, введенный как отношение максимальных напряжений к минимальным, для этого соединения достигает значительной величины 4,4. При этом в основном металле обеих труб имеются значительные области практически свободные от рабочих напряжений, что указывает на низкую эффективность использования конструкционного материала. Поэтому дальнейшие расчеты проводили для аналогичных соединений, у которых области, не воспринимающие рабочих нагрузок, были удалены путем придания соединяемым трубам конической формы с притуплением. Результаты расчета показали, что такая подготовка кромок соединяемых труб обеспечивает выравнивание рабочих напряжений с соответствующим снижением значения коэффициента концентрации напряжений. Наибольшее выравнивание поля рабочих напряжений имеет место при ве-

личине притупления, составляющей  $\delta/6 \dots \delta/3$ , где  $\delta$  - толщина трубы. Коэффициент концентрации напряжений в зоне паяного шва в этом случае уменьшается до 2,35, т.е. в 1,87 раза. Максимальные рабочие напряжения при этом уменьшились с 550 до 400 МПа. Эти результаты позволяют рекомендовать для более эффективного использования пайки подготовку кромок на всей длине нахлестки с притуплением на торцовых поверхностях труб величиной от  $1/6$  до  $1/3$  толщины соединяемых деталей.

**Четвертая глава** посвящена разработке новых конструктивных элементов, композиционных припоев и флюсов, повышающих работоспособность паяных телескопических, стыковых и нахлесточных соединений. На первом этапе этих разработок были созданы новые конструктивные элементы для стыковых, нахлесточных и телескопических соединений. При этом новые конструкции стыковых паяных соединений разбиты на две группы. Первая группа новых разновидностей соединений стыкового типа основана на повышении несущей способности за счет увеличения площади спая. Наиболее характерным представителем этой группы является паяное соединение, показанное на рис. 1, отличительной особенностью которого является то, что плоскость спая наклонена ко всем граням соединяемых листов. Площадь спая такого соединения определяется в зависимости от размеров, показанных на рис. 1, по следующей



формулой:

$$F_{ин} = b\delta\sqrt{(1 + ctg^2\alpha + ctg^2\beta)} \quad (6)$$

1, 2 – соединяемые пластины; 3 – паяный шов

**Рисунок 1- Паяное стыковое соединений с увеличенной площадью спая**

Площадь спая у такого соединения в 2,65 раза превышает площадь поперечного сечения соединяемых пластин. На основе идеи скоса кромки стыкуемых листов по ширине листа были также внесены изменения в конструкцию соединений гребенчатого типа, в которых выступы одной детали размещаются в пазах другой. Здесь предлагаемый нами скос кромки по ширине листа существенно улучшает работу соединения на изгиб за счет вовлечения основного металла в деформацию изгиба.

Наиболее существенное повышение несущей способности стыкового паяного соединения связано с разработкой соединений замкового типа, показанных на рис. 2. Такое соединение нельзя разрушить только по паяному шву поэтому его несущая способность включает в себя прочность части поперечного сечения соединяемых пластин. Так как предел прочности основного металла выше, чем предел прочности легкоплавкого припоя при низкотемпературной пайке, рассматриваемое соединение будет иметь прочность на 50...70% боль-

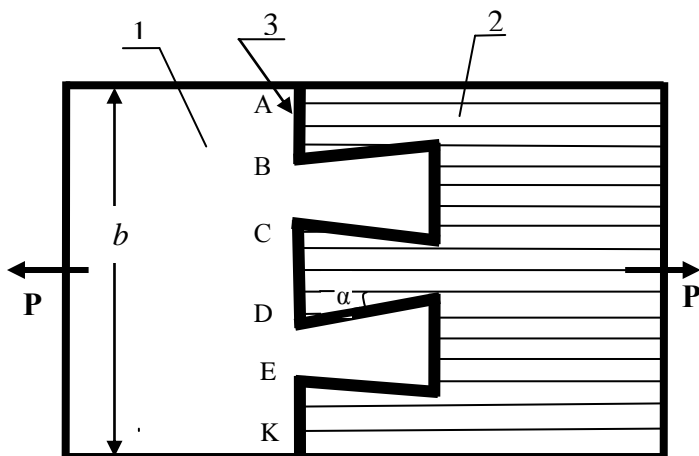


Рисунок 2 – Схема стыкового паяного соединения замкового типа

1,2 – соединяемые детали; 3 – паяный шов

шую, чем известное.

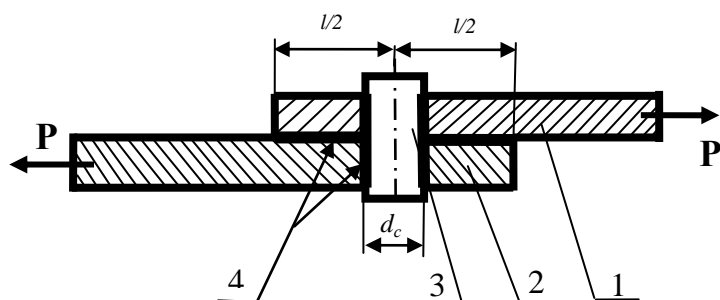
Анализ прочности опасных сечений показал, что при проектировании паяных соединений замкового типа необходимо стремиться к уменьшению угла наклона боковых плоскостей по отношению к продольной оси, обозначенного на рис. 2, как угол  $\alpha$ . При этом в качестве минимального значения можно принять  $\alpha = 6^\circ$ , что соответствует уклону 1:10.

Еще одно изменение внесено нами в конструкцию нахлесточного соединения и основано на использовании усиливающих стержней, изготовленных из материала, более прочного, чем припой (рисунок 3). За счет концентрации напряжений, обусловленной отверстием для стержня, данная конструкция обеспечивает перераспределение рабочих напряжений и создает условия более полной загрузки средней части паяного шва. Кроме того, более половины разрушающего усилия воспринимается стержнем 3. Подбирая соответствующим образом материал стержней 3, их диаметр и количество можно добиваться равнопрочности паяного соединения основному материалу. Условие равнопрочности нахлесточного соединения запишется следующим образом:

$$\sigma_{\epsilon} a \delta = \pi n \tau_{cm}^{\epsilon} \frac{d_c^2}{4} + a l \tau_{np}^{\epsilon}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\epsilon}$  - предел прочности основного материала на растяжение (МПа);  $a$  и  $\delta$  - соответственно ширина и толщина соединяемых пластин (м);  $n$  - число стержней;  $\tau_{cm}^{\epsilon}$  - предел прочности при срезе материала стержней (МПа);  $d_c$  - диаметр стержней (м);  $\tau_{np}^{\epsilon}$  - предел прочности припоя при испытании на срез (МПа);  $l$  - величина нахлестки (м).

Предлагаемая конструкция обладает многими преимуществами техноло-



1,2 – соединяемые детали; 3- стержень; 4 – паяные швы

Рисунок 3 – Паяное соединение с усиливающими стержнями

гического и функционального характера. Такое соединение, будучи собранным под пайку, становится самозакрепляющимся, и соответственно более технологичным. Другим технологическим преимуществом является возможность использования зазора между соединяемой деталью и стержнем 3 для ввода припоя сразу в центральную часть нахлестки, а также для выхода газов и исключения газовых пробок. Экономические преимущества обусловлены тем, что такое соединение при прочих равных условиях, требует нахлестки, меньшей на 40 – 60%. Соответствующим образом уменьшается расход припоя для его изготовления.

Степень упрочнения паяного соединения зависит от прочностных характеристик используемого припоя и получаемого паяного шва. С увеличением разницы в пределах прочности основного материала и паяного шва она возрастает, и в случае пайки стали оловянно-свинцовым припоем может достигать 40 – 50%. Материал стержня не связан с температурными параметрами технологического процесса пайки, поэтому его можно выбрать по критерию максимальной прочности при минимальной стоимости. В большинстве случаев этому требованию удовлетворяют обычные углеродистые стали, например, сталь 45. По нашему мнению, работоспособность такого соединения аналогична известным из практики контактной точечной сварки клеесварным соединениям. Некоторые особенности могут иметь место из-за более высокой прочности припоев по сравнению с прочностью клеевых швов, а также из-за меньшей величины нахлестки (на 30 – 40% в зависимости от толщины пластин) в паяном соединении. Соединения с усиливающими стержнями могут быть успешно применены и при пайке труб. Здесь требуемое количество стержней распределяют равномерно по окружности, добиваясь с их помощью упрощения операции сборки и центровки соединяемых труб. Следует отметить, что материал стержней можно выбрать так, чтобы повысить коррозионную стойкость паяного соединения за счет протекторной защиты. Несущая способность такого соединения складывается из несущей способности паяного шва, соединяющего детали 1 и 2, и несущей способности стержней 3. Величину разрушающей осевой нагрузки  $P$  можно определить из выражения:

$$P = \pi n \tau_{cm}^e \frac{d_c}{4} + \pi D_2 l \tau_{np}^e, \quad (8)$$

где  $D_2$  – диаметр меньшей трубы (м).

При условии равнопрочности соединения с основным металлом можно записать следующее соотношение:

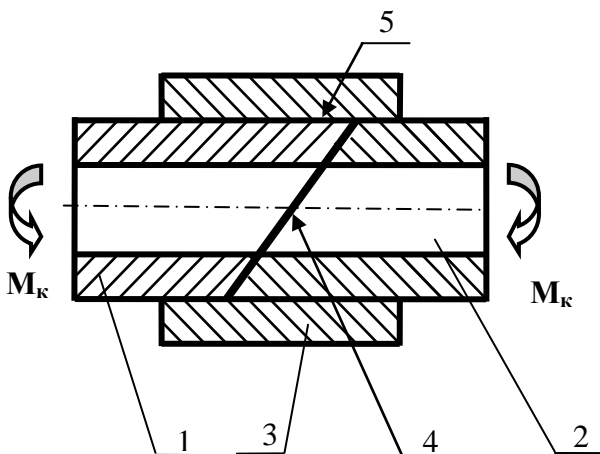
$$\sigma_s F = \pi n \tau_{cm}^s \frac{d_c}{4} + \pi D_2 l \tau_{np}^s, \quad (9)$$

где  $\sigma_s$  - предел прочности материала трубы на растяжение;

$F$  – площадь поперечного сечения менее прочной из соединяемых труб.

Как следует из соотношений (8) и (9), для повышения прочности паяного соединения в целом необходимо увеличивать диаметр стержней, их количество и прочность материала, из которого они изготовлены. Конкретные варианты реализации схемы паяного соединения, представленного на рис. 3, отличаются значительным разнообразием за счет различной формы стержней и возможности использования не только сквозных, но и глухих отверстий.

Для повышения работоспособности паяных соединений труб, воспринимающих нагрузку в виде крутящего момента, было разработано техническое решение, основанное на комбинации муфты и косоугольного стыка (рис. 4). Высокая прочность при кручении объясняется отсутствием осевой симметрии в конструкции паяного соединения. Поэтому воздействию крутящего момента в нем сопротивляется прежде всего основной материал, а косоугольный стык 4 можно даже не заполнять припоем. Помимо рационального конструирования разработка высокоэффективного процесса пайки включала в себя создание технологических



1, 2 – соединяемые трубы; 3 – муфта; 4 – косоугольный стык; 5 – паяный шов.

Рисунок 4 – Паяное соединение труб, работающее на кручение

материалов – припоев и флюсов, которые кроме высоких характеристик работоспособности отличаются низкой стоимостью. При этом был разработан состав композиционного припоя на основе порошкообразного сплава Pb-Sn с упрочняющим порошковым наполнителем (меди) и флюса на основе канифоли. Для повышения активности канифоли и снижения стоимости флюса была исследована возможность использования в этой композиции одного из отходов Гродненского ПО «АЗОТ» - кубового продукта дистилляции капролактама (капрола). Результаты исследований, проведенных с использованием метода многофакторного эксперимента, показали, что капрол хорошо совместим с канифолью, повышает ее активность и может заменить до 50% по массе канифоли в составах паяльных флюсов. Оловянно-свинцовые припои хорошо растекаются по медным паяемым деталям и затекают в зазоры при использовании флюса на основе канифоли с добавками капрола. Хоро-

шей смачивающей способностью при использовании флюсов системы канифоль-капрол обладают оловянно-свинцовые припои, содержащие до 20% по массе медного порошка ПМС-1. При этом оптимальное содержание флюса в композиции составляет 5% по массе.

На основе сопоставления и обобщенного анализа результатов исследования работоспособности паяных соединений установлено, что разработанные рекомендации по их конструированию и изготовлению обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики изделий. Приведенные в таблице 1 данные показывают, что введение медного порошка и капрола в состав композиционного припоя обеспечивают повышение статической прочности (на 60 %) и ударной вязкости в 2,6 раза. Было также установлено, что все разработанные конструктивные элементы паяных соединений в сочетании с композиционным припоем обеспечивают повышение циклической прочности в 1,3 раза, длительной прочности на 27...100% , а также уменьшение потери прочности при длительном воздействии коррозионной среды с 35% до 8...11%. Все это позволило рекомендовать разработанные конструктивные элементы паяных соединений и композиционные припои для промышленного применения в различных областях машиностроения.

При проведении экспериментов, опытно-промышленных испытаниях и внедрении результатов в производство были усовершенствованы конструкции газопламенных горелок для пайки путем закручивания газовых потоков в

Таблица 1 - Влияние наполнителя и состава флюса на механические характеристики паяных стыковых соединений.

№ опыта	Содержание компонентов, % по массе		Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_s$ , МПа
	ПОС 40	ПМС-1		
1	95	0	0,34/0,39	80/98
2	90	5	0,37/0,44	85/95
3	85	10	0,43/0,51	95/110
4	80	15	0,6/0,87	114/128
5	75	20	0,46/0,71	100/119
6	70	25	0,22/0,34	60/77
7	65	30	0,1/0,19	20/33

Примечание: в числителе приведены данные, полученные при использовании чистой канифоли, в знаменателе флюс в виде смеси канифоли с капролом.

канале инжектора и мундштуке. Это позволило повысить стабильность работы аппаратуры, улучшить однородность горючей смеси и ускорить процесс нагрева обрабатываемых изделий на 10%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1 На основании анализа литературных данных обоснована возможность усовершенствования процесса низкотемпературной пайки, повышения его экономичности и характеристик работоспособности паяных соединений путем создания новых конструктивных решений, разработки композиционных припоев с наполнителем и высокоактивных флюсов на основе отходов производства

капролактама, а также эффективных методов проведения исследований на паяемость с воздействием на напряженное состояние изделий. Установлена необходимость повышения эффективности испытаний на циклическую и длительную прочность паяных соединений путем сокращения их продолжительности, повышения достоверности и сокращения затрат, что в совокупности с анализом напряженного состояния обеспечит создание условий для более широкого применения пайки в промышленности /1, 7, 27, 15, 21/.

2 На базе математических моделей, разработанных для оценки напряженного состояния паяных соединений нахлесточного типа как при воздействии остаточных, так и рабочих напряжений, а также аналитических выражений для расчета термических напряжений в телескопических соединениях разнородных материалов разработаны новые конструктивные элементы нахлесточных и телескопических паяных соединений, обеспечивающие снижение в 1,9 раза концентрации напряжений, образующихся в процессе эксплуатации /2, 10, 14, 16, 17, 30/.

3 На основе всестороннего анализа процессов, происходящих при образовании паяного соединения или проведении испытаний, предложены новые эффективные методики исследования процесса смачивания с оценкой точности получаемых результатов, а также методы ускоренных испытаний на циклическую и длительную прочность с одновременным повышением достоверности результатов из-за уменьшения погрешности их оценки в 1,4...3 раза. Предложены и разработаны конструкции образцов для испытания методом изгиба с вращением и установок для проведения испытаний на ползучесть при комнатной температуре, высокая эффективность которых обусловлена одновременным испытанием нескольких образцов. /3, 4, 8, 9, 15, 20, 22 – 29, 35 – 37, 46, 47/.

4 Полученные теоретические и экспериментальные данные позволили предложить и разработать новые композиционные припои для низкотемпературной пайки меди на основе оловянно-свинцового припоя с наполнителем медного порошка марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) в количестве до 20% по массе и канифольного флюса, модифицированного кубовым остатком производства капролактама в количестве до 50% от массы канифоли. С помощью многофакторного эксперимента определено оптимальное содержание ингредиентов в композиционном припое и проведены испытания паяных соединений, результаты которых показали высокие показатели их работоспособности в условиях статического, циклического и длительного нагружения, а также при воздействии коррозионно-активных сред /5, 18, 19, 21/.

5 На основании проведенных экспериментов предложены новые конструктивные элементы паяных соединений нахлесточного типа с усиливающими стержнями различной формы, а также стыковых паяных соединений замкового типа и установлено, что они обеспечивают повышение статической прочности на 20...60%, ударной вязкости в 2,6 раза, длительной прочности на 27...100%, а также предела выносливости в 1,3 раза при снижении уровня потерь механической прочности под воздействием коррозионного разрушения в 4,4 раза. Приоритет соискателя на новые конструкции паяных соединений за-



щищен четырьмя патентами Республики Беларусь на изобретения и семью патентами на полезные модели. /31, 32, 33, 38-43/.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1 Разработанные конструктивные элементы паяных соединений вместе с композиционным припоем для пайки меди позволяют повысить как эксплуатационные показатели паяных изделий, так и экономические показатели процесса их изготовления. В результате использования результатов диссертации на Могилевском заводе полимерных труб за счет снижения стоимости материалов для пайки, сокращения расхода электроэнергии и повышения производительности труда получен фактический годовой экономический эффект в сумме 3877000 рублей. Использование устройства для газопламенной обработки материалов, изготовленного по результатам исследований, дало возможность повысить качество обработки, производительность труда при одновременном сокращении затрат на кислород и горючий газ за счет закручивания потоков кислорода и горючей смеси /5, 11, 34, 44, 45/. За счет этого на ОАО «Могилевский завод сантехзаготовок» треста «Белсантехмонтаж» № 1 получен фактический годовой экономический эффект в размере 1 877000 рублей. Применение образца для испытания паяных соединений на циклическую прочность обеспечило Московскому ФГУП «НИИграфит» возможность проведения ускоренных испытаний фрагментов паяных конструкций графитовых материалов с металлами, предназначенных для газотурбинных двигателей /47/.

2 Предложенные конструкции узлов оборудования для газопламенной обработки, предусматривающие использование закрученных потоков рабочей среды с целью повышения интенсивности теплообмена, можно рекомендовать для успешного применения в системах нагрева и охлаждения, в частности, в электродных узлах машин для контактной точечной сварки /5, 11, 34, 44, 45/.

3 Конструкцию устройства для проведения испытаний паяных соединений на циклическую прочность, предложенную в данной диссертационной работе, можно рекомендовать также для испытания сварных соединений, например, сваренных контактной точечной сваркой /26/.

4 Композиционный припой, содержащий медный порошок в своем составе, рекомендуется использовать при пайке соединений радиоэлектронной аппаратуры и разнообразных электрических установок, т.к. высокая электропроводность меди соответствующим образом снижает электрическое сопротивление спая и тем самым сокращает непроизводительные потери электроэнергии /21/.

5 Разработанные методики проведения испытаний на смачивание припоями паяемых материалов, составы паяльных флюсов, содержащих отходы производства капролактама, а также конструктивные элементы паяных соединений рекомендуются для использования в учебном процессе Белорусско-Российского университета при чтении лекций и проведении лабораторных работ по дисциплинам «Микросварка и пайка», «Ресурсосберегающие технологии в сварочном производстве».

Список публикаций по теме диссертации

### *Статьи в научных журналах*

1. Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. Анализ критериев оценки смачивающей способности материалов при испытаниях на паяемость // Сварочное производство, 2007, № 2.- с. 18 – 22.
2. Латыпова Е.Ю. Расчет осевой составляющей термических напряжений в телескопических паяных соединениях разнородных материалов // Сварка и родственные технологии. Мн., 2006.- с. 12 – 14.
3. Латыпова Е.Ю., Шелег В.К., Цумарев Ю.А. Расчет геометрических характеристик капель при растекании припоев // Сварка и родственные технологические процессы, № , 2006.- с. 31 – 35.
4. Latypova E. Yu., Tsumarev Yu. A. Analysis of the criteria for evaluating the wetting capacity of materials in brazeability tests //Welding International, 2007, № 9.- s. 675 – 679.
5. Цумарев Ю.А., Латун Т.С., Павлюк С.С., Латыпова Е.Ю. Эффективность использования закрученных потоков жидкостей и газов в сварочных процессах. Вестник Белорусско-Российского университета.- 2008, № 4.

### *Статьи в других журналах*

6. Тарасенко И.В., Латыпова Е.Ю. Новый флюс для низкотемпературной пайки меди // Сварочные технологии и оборудование.- Мн.- октябрь-декабрь 2005- с. 28 – 30.
7. Цумарев, Ю.А., Логвина Е.В., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С.. Экономия припоев при производстве паяных конструкций // Сварочные технологии и оборудование.- Мн. -январь – февраль 2004.- с. 15-21.
8. Шелег В.К. Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. К вопросу смачивания материалов припоями // Сварочные технологии и оборудование.- Мн.- май – июнь 2004.- с. 22-24.
9. Латыпова Е.Ю., Шелег В.К., Цумарев Ю.А. Выбор информационных параметров при проведении испытаний паяных соединений // Новости стандартизации и сертификации, 2006, № 2.- с. 46 – 49.
10. Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А., Латун Т.С., Котликов А.М. Расчет осевой составляющей остаточных напряжений в паяных телескопических соединениях разнородных материалов // Сварочные технологии и оборудование. Мн.- август-сентябрь 2004.- с. 39-40.
11. Цумарев Ю.А., Павлюк С.С., Логвина Е.В., Латыпова Е.Ю., Латун Т.С. Повышение эффективности работы сварочного оборудования закручиванием используемых в нем потоков жидкости или газа // Сварочные технологии и оборудование.- ноябрь – декабрь 2004.- с. 33-37.
12. Цумарев, Ю. А. Оптимальная конструкция паяного телескопического соединения / Ю. А. Цумарев, Т. С. Латун, В. К. Шелег, Е. Ю. Латыпова. — Могилев, 2008. — 19 с. — Библиогр.: (3 назв.). —Деп. в ГУ «БелИСА» 10.07.2008 г., № Д200826.

### *Материалы и тезисы конференций*

13. Тарасенко И.В., Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. Оценка результатов механических испытаний // Новые конкурентноспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: Материалы международной научно-технической конференции. – Могилев, 18 - 19 мая 2000г. С. 225.

14. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Тарасенко И.В., Герасимов И.И. Расчет осевых напряжений в трубах из разнородных материалов, соединяемых пайкой. Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов. Материалы международной НТК, Могилев, 2001 г.

15. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С., Щемелев С.Л. Длительная прочность соединений, паянных по никелевому покрытию. Материалы международной НТК «Современные технологии, материалы, машины и оборудование», Могилев, 2002г.- с. 239.

16. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Тарасенко И.В. Расчет термических напряжений в паяных телескопических соединениях разнородных материалов. Материалы 4 международного симпозиума «Технология, оборудование, качество», Мн.: Экспофорум, 2001, стр. 145-146.

17. Латун Т.С., Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. Расчет осевой составляющей остаточных напряжений в паяных телескопических соединениях разнородных материалов. Материалы международной НТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», ч. 1, Могилев, 19 – 20 апреля 2004 г. – с. 241.

18. Латыпова Е.Ю. Ресурсосберегающие мероприятия в производстве паяных конструкций. Материалы республиканской НТК аспирантов, магистрантов и студентов. «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев, 2005 г. с.- 124.

19. Латыпова Е.Ю. Использование отходов производства Гродненского ПО «АЗОТ» в качестве компонентов паяльных флюсов. Материалы республиканской НТК аспирантов, магистрантов и студентов. «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев, 2006 г. с.- 97.

20. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю. Поверхностное натяжение и его роль в явлении смачивания. Материалы международной НТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», ч.1. с.- 278-279. Могилев, 20-21 апреля 2006 г.

21. Латыпова Е.Ю., Тарасенко И.В., Цумарев Ю.А. Влияние капрола-М на механические свойства соединений, паянных композитным припоем. Материалы международной НТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», ч. 1, Могилев, 19 – 20 апреля 2007 г. – с. 242.

### *Патенты на изобретения*

22. Тарасенко И.В., Березиенко В.П., Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. Составной образец для определения циклической прочности паяных соединений. Патент № 6996 (С1), (ВУ), МПК G 01 N 3/32, заявка № а 20000508 от 01.06.2000 г., опубл. 30.12. 2001 г.

23. Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А., Леванович Н.А., Тарасенко И.В., Образец для испытания паяных соединений на циклическую прочность. Патент № 6822 (С1), (ВУ), МПК G 01 N 3/32, заявка № а 20000749 от 08.08.2000 г., опубл. 30.03. 2005 г.

24. Цумарев Ю.А., Тарасенко И.В., Латыпова Е.Ю. Образец для определения циклической прочности паяных соединений. Патент № 6270 (С1), (ВУ), МПК G 01 N 3/32, заявка № а 20000751 от 08.08.2000 г., опубл. 30.06. 2004 г.

25. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С. Образец для определения циклической прочности паяных соединений. Патент № 6052 (С1), (ВУ), МПК G 01 N 3/32, заявка № а 20010890 от 24.10.2001 г., опубл. 30.03.2004.

26. Тарасенко И.В., Латыпова Е.Ю., Березиенко В.П., Цумарев Ю.А., Фурманов С.М. Способ испытания на циклическую прочность неразъемных соединений и устройство для его осуществления. Патент № 6823 (С1), (ВУ), МПК G 01 N 27/61, заявка № а 20001003 от 08.11.2000 г., опубл. 30.03. 2005

27. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С. Способ подготовки образца телескопического паяного соединения к испытанию. Патент № 6051 (С1), (ВУ), МПК G01 N 1/28.- № а 20010600; Заявл. 10.07.2001; Опубл. 30.03.2004.

28. Шелег В.К., Латыпова Е. Ю., Цумарев Ю.А., Борд Н.Ю. Способ определения краевого угла смачивания. Решение о выдаче патента по заявке № а 20041110, МПК G01 N 13/00. Приоритет от 30.11.2004.

29. Шелег В.К., Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. Способ испытания на смачивание материала припоем. Патент № 9955 (С1), ВУ. Заявка № а 20040981. МПК G 01 N 13/00. Опубл. 30.10.2007.

30. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С. Конструкция паяного соединения. Патент № 6248 (С1), (ВУ), МПК В 23 К 3/00.- № а 20010891; Заявл. 24.10.2001; Опубл. 30.06.2004.

31. Шелег В.К., Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Борд Н.Ю. Стыковое паяное соединение. Патент № 10034 (С1), (ВУ), МПК В 23 К 3/00. Заявл. 29.07.2005 опубл. 27.08.2007 г.

32. Латыпова Е.Ю., Шелег В.К., Цумарев Ю.А., Борд Н.Ю. Паяное соединение встык. Решение о выдаче патента по заявке № а 20050536, (ВУ), МПК В 23 К 3/00. Заявл. 31.05.2005.

33. Латыпова Е.Ю., Шелег В.К., Цумарев Ю.А., Борд Н.Ю. Косостыковое паяное соединение. Решение о выдаче патента по заявке № а 20050535, (ВУ), МПК В 23 К 3/00. Заявл. 31.05.2005.

34. Березиенко В.П. Папсуев С.Л., Латыпова Е.Ю., Червякова Ю.В. Резак для кислородной резки металлов. Патент № 5366 (С1), (ВУ), МПК В 23 К 7/02.- № а 19991086; Заявл. 07.12.1999; Опубл. 30.09.2003.

#### *Патенты на полезные модели*

35. Латыпова Е.Ю. Паяный образец для испытания на циклическую прочность. Патент № 2724 (U), (ВУ), МПК G01 N 3/32.- № и 20050590; Заявл. 10.10.2005; Опубл. 30.06.2006.

36. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С., Щемелев С.Л. Устройство для проведения испытаний паяных соединений на длительную прочность. Патент № 747 (U), (BY), МПК G 01 N 3/32.- № и 20020103; Заявл. 11.04.2002; Оpubл. 30.12.2002.

37. Цумарев Ю.А., Кузменко И.М., Латыпова Е.Ю., Хатамцов С.В., Могилевчик А.В. устройство для испытания паяных соединений на длительную прочность. Патент № 919 (U), (BY), МПК G01 N 3/32.- № и 20020357; Заявл. 27.11.2002; Оpubл. 30.06.2003.

38. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С. Лозовцов Д.В. Телескопическое паяное соединение. Патент № 748 (U), (BY), МПК В 23 К 3/00.- № и 20020104; Заявл. 11.04.2002; Оpubл. 30.12.2002.

39. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Решетников В.Н. Паяное соединение. Патент № 3411 (U), (BY), МПК В 23 К 3/00.- № и 20060486; Заявл. 25.07.2006; Оpubл. 30.04.2007.

40. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С. Клепча В.В., Ульянова А. А. Паяное соединение труб. Патент № 749 (U), (BY), МПК В 23 К 3/00.- № и 20020107; Заявл. 12.04.2002; Оpubл. 30.12.2002.

41. Шелег В.К., Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А., Борд Н.Ю. Паяное соединение внахлестку. Патент № 2126 (U), (BY), МПК В 23 К 3/00.- № и 20040630; Заявл. 24.12.2004; Оpubл. 30.09.2005

42. Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А., Кибкова Д.П., Тарасенко И.В., Радченко А.А. Соединение встык пайкой. Патент № 4392 (U), BY, МПК В 23 К 3/00. Заявл. 20.09.2007, опубл. 3.03.2008 г.

43. Цумарев Ю.А., Зинкевич Л.Я., Червякова Е.В., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С., Трифунтов В.А. Нахлесточное паяное соединение. Патент № 784 (U), (BY), МПК В 23 К 1/00. Заявл. 2.04.2002, опубл. 30.03.2003 г.

44. Латыпова Е.Ю., Мешкова Е.В., Цумарев Ю.А., Цумарева Т.С., Бансюкова Е.Л, Шевченко А.А. Горелка для газовой сварки и пайки. Патент № 1281 (U), (BY), МПК В 23 К 5/00.- № и 20030158; Заявл. 9.04.2001, опубл. 30.03.2004.

45. Цумарев Ю.А., Павлюк С.С., Латыпова Е.Ю., Ульянова А.А., Цумарева Т.С. Газопламенная горелка. Патент № 1059 (U), МПК В 23 К 7/00.- № и 20030021. Заявл. 22.01.2003, опубл. 30.12.2003.

46. Латыпова Е.Ю. Образец для испытания паяных соединений на циклическую прочность Патент № 2725 (U), (BY), МПК G 01 N 3/32.- № и 20050591. Заявл. 10.10.2005, опубл. 30.06. 2006.

47. Цумарев Ю.А., Латыпова Е.Ю., Цумарева Т.С., Кулешов В.А. Образец для испытания паяных соединений на циклическую прочность. Патент № 750 (U). МПК G 01 N 3/32.- № и 20020108. Заявл. 12.04.2002, опубл. 30.12. 2002.

## РЭЗІЮМЭ

Латыпава Алена Юр'еўна

### Канструктыўныя элементы, кампазіцыйныя прыпоі і флюсы для нізкатэмпэратурнай пайкі тэлескапічных, стыкавых і нахлестачных злучэнняў

Ключавыя словы: пайка, паяныя злучэнні, канструктыўныя элементы, прыпой, флюс, мадэліраванне, астаткавыя тэрмічныя напружанні, канцэнтрацыя напружанняў, трываласць, працаздольнасць, тэхналогія.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка канструктыўных элементаў, кампазіцыйных прыпояў і флюсаў, павышаючых працаздольнасць тэлескапічных, стыкавых і нахлестачных нізкатэмпэратурных паяных злучэнняў.

Тэарэтычная частка працы зроблена на аснове выкарыстання фундаментальных палажэнняў тэорыі пругкасці, пластычнасці, механікі безупыўнага асяроддзя. Лічбавыя разлікі выконваліся з выкарыстаннем сучасных прыкладных праграм і сродкаў вылічальнай тэхнікі. Пры правядзенні эксперыментальных даследаванняў і выпрабаванняў выкарыстоўвалася прамысловае абсталяванне і спецыяльна распрацаваныя ўстройства і аснастка. Для паскарэння выпрабаванняў, якія адрозніваюцца значнай працягласцю, былі распрацаваны новыя метадыкі, канструкцыі устаноў і абразцоў.

Атрыманыя формулы для разліку астаткавых тэрмічных напружанняў у злучаемых элементах паянага тэлескапічнага злучэння разнародных матэрыялаў, абумоўленыя розніцай у каэфіцыентах тэрмічнага расшырэння матэрыялаў. Распрацаваны матэматычныя мадэлі для аналізу астаткавых і працоўных напружанняў, заснаваныя на метадзе канечных элементаў і пакеце прыкладных праграм «Cosmos - M». Распрацаваны эфектыўныя метадыкі даследавання працэсаў змочвання і правядзення выпрабаванняў на цыклічную і працяглую трываласць.

Распрацаваны шэраг новых канструктыўных элементаў паяных злучэнняў стыкавога, нахлестачнага і тэлескапічнага тыпаў, якія валодаюць больш раўнамерным полем працоўных напружанняў. Паказана, што гэтыя канструктыўныя элементы валодаюць павышанымі характарыстыкамі працаздольнасці пры іх эксплуатацыі ва ўмовах статычнай, ударнай, цыклічнай нагрузкі, працяглага нагружэння і ўздеяння каразійна-актыўнага асяроддзя.

Прапанаваны кампазіцыйныя прыпоі і флюсы, якія дазваляюць атрымаць паяныя злучэнні з высокімі характарыстыкамі працаздольнасці. На базе новых матэрыялаў і канструктыўных элементаў паяных злучэнняў распрацаваны рэсурсазберагаючыя тэхналагічныя працэсы, а таксама апаратура для газополымнай апрацоўкі, якія выкарыстоўваюцца на прадпрыемствах, а таксама ў даследчых устаноў і вышэйшых навучальных устаноў Рэспублікі Беларусь і Расійскай Федэрацыі.

Вынікі працы могуць быць выкарыстаны ў розных галінах машынабудавання.

## РЕЗЮМЕ

Латыпова Елена Юрьевна

### Конструктивные элементы, композиционные припои и флюсы для низкотемпературной пайки телескопических, стыковых и нахлесточных соединений

Ключевые слова: пайка, паяные соединения, конструктивные элементы, припой, флюс, моделирование, остаточные термические напряжения, концентрация напряжений, прочность, работоспособность, технология.

Целью работы является разработка конструктивных элементов, композиционных припоев и флюсов, повышающих работоспособность телескопических, стыковых и нахлесточных низкотемпературных паяных соединений.

Теоретическая часть работы выполнена на основе использования фундаментальных положений теории упругости, пластичности, механики сплошной среды. Численные расчеты выполнялись с использованием современных прикладных программ и средств вычислительной техники. При проведении экспериментальных исследований и испытаний использовалось промышленное оборудование и специально разработанные устройства и оснастка. Для ускорения испытаний, отличающихся большой длительностью, были разработаны новые методики, конструкции установок и образцов.

Получены формулы для расчета остаточных термических напряжений в соединяемых элементах паяного телескопического соединения разнородных материалов, обусловленные различием в коэффициентах термического расширения материалов. Разработаны математические модели для анализа остаточных и рабочих напряжений, основанные на методе конечных элементов и пакете прикладных программ «Cosmos - M». Разработаны эффективные методики исследования процессов смачивания и проведения испытаний на циклическую и длительную прочность.

Разработан ряд новых конструктивных элементов паяных соединений стыкового, нахлесточного и телескопического типов, обладающих более равномерным полем рабочих напряжений. Показано, что эти конструктивные элементы обладают повышенными характеристиками работоспособности при их эксплуатации в условиях статической, ударной, циклической нагрузок, длительного нагружения и воздействия коррозионно-активных сред.

Предложены композиционные припои и флюсы, позволяющие получить паяные соединения с высокими характеристиками работоспособности. На базе новых материалов и конструктивных элементов паяных соединений разработаны ресурсосберегающие технологические процессы, а также аппаратура для

газопламенной обработки, используемые на предприятиях, а также в исследовательских организациях и высших учебных заведениях Республики Беларусь и Российской Федерации.

Результаты работы могут быть использованы в различных отраслях машиностроения.

## SUMMARY

Latypova Elena Yuryevna

Structural elements, composite solders and fluxes for lowtemperature soldering of telescopic, butt and lap joints

Keywords: soldering, soldered joints, composite elements, solder, flux, simulation, residual stress, stress concentration, strength, servicability, technology

The aim of the research work is to develop structural elements, composite solders and fluxes increasing the servicability of telescopic, butt and lap lowtemperature soldered joints.

Theoretical part of the research was carried out on the basis of application of fundamental principles of the theory of elasticity, plasticity, mechanics of a continuous medium. Number calculations were made through using modern application programs and computer technology. While making experimental research and testing, an industrial equipment were used. New techniques, structures and samples have been developed to speed up the testing distinguished by longer duration.

There have been made formulas for calculating of residual thermal stress in joined elements of the soldered telescopic joint of dissimilar materials having different coefficients of thermal expansion. Mathematical models for the analysis of the residual and working stresses based on the method of finite elements and software package «COSMOS-M» have been developed. Efficient research techniques of wetting processes and testing for cyclic and long strength have been used.

The number of new structural elements of soldered joints of a butt, lap and telescopic type possessing more uniform field of working stresses have been developed. It has been shown that these structural elements possess increased characteristics of working capacity under conditions of static, impact, cyclic loads, long loading and the influence of the corrosion-active media.

Composite solders and fluxes enabling to obtain soldered joints with high characteristics of servicability are offered. On the basis of new materials and structural elements of soldered joints there have been developed resource –saving technological processes as well as the apparatus for gas-plasma treatment which are used at enterprises and research organizations, higher educational establishments in the Republic of Belarus and Russian Federation.

The results of the work can be used in different fields of mechanical engineering.



ЛАТЫПОВА Елена Юрьевна

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ  
ПРИПОИ И ФЛЮСЫ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
ПАЙКИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ, СТЫКОВЫХ И  
НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.03.06 - Технологии и машины сварочного производства

Ответственный за выпуск Н.В. Скок  
Технический редактор И.В. Голубцова  
Компьютерная верстка И.А. Алексеенос

Подписано в печать 18.02.2009.

Формат 60x84 Бумага офсетная

Ризография. Гарнитура Таймс.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1, 63. Уч.-изд. л. 1,6. Тираж 75 экз. Заказ № 105

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»

Лицензия ЛИ № 02330/375 от 29.06.2004 г.

212030, г. Могилев, пр. Мира, 43

© ГУВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2009

