

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

ЛАБАРТКАВА ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.791.01.6

**ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ ПАЯННЯ
МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ГЕРМОВВОДІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ
ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ**

Спеціальність 05.03.06 –
зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2015

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано на кафедрі зварювального виробництва Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор **Квасницький Віктор Вячеславович**, НТУУ «Київський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Зварювального виробництва».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Чигарьов Валерій Васильович**, Приазовський державний технічний університет, завідувач кафедри «Металургії і технології зварювального виробництва»;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Максимова Світлана Василівна**, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних процесів паяння.

Захист відбудеться «19» січня 2016 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 при Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України за адресою: НУК, проспект Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України за адресою: НУК, проспект Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна.

Автореферат розіслано «17» грудня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Л.І. Коростильов

Актуальність теми. У сучасній промисловості широко використовують конструкції з металу і кераміки. Для з'єднання цих матеріалів застосовують паяння та дифузійне зварювання. Більш широко використовують паяння. При цьому завжди необхідно вирішувати дві основні проблеми: погане змочування кераміки припоєм і виникнення у з'єднаннях при охолодженні власних напружень внаслідок відмінності фізико-механічних властивостей (ФМВ), зокрема температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) металу і кераміки. Ці напруження можуть викликати руйнування виробу.

Одним із шляхів зниження цих напружень є паяння металізованої кераміки і застосування узгоджених спаїв, зокрема, з коваром. Однак металізація кераміки є трудомісткою і дорогою операцією (металізація кераміки пастою при температурі до 1600 °C), а при високотемпературному паянні рівень залишкових напружень може перевищувати допустимий, оскільки ТКЛР коvara при температурах 400...460 °C різко зростає і при 900 °C в 1,8 рази стає більше ТКЛР кераміки.

Над вирішенням зазначених проблем працювали Найдич Ю.В., Журавльов В.С., Перевертайло В.М., Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Махненко В.І. Квасницький В.В., Єрмолаєв Г.В., Конюшков Г.В., Чигарьов В.В. та ін. Було розроблено адгезійно-активні припої, досліджено закономірності формування власних напружень, головним чином розрахунковими методами на основі теорії пружності. На початку ХХІ століття під керівництвом академіка НАН України В.І. Махненка почали широко використовувати комп'ютерні методи моделювання напружено-деформованого стану (НДС) при дифузійному зварюванні (ДЗ) і паянні різнорідних матеріалів, що дозволяє враховувати вплив пластичних деформацій, ФМВ та ін. факторів і їх зміни залежно від температури.

У техніці широко використовують гермовводи різного призначення, у тому числі високовольтні гермовводи електронно-променевих гармат в установках для зварювання і напильовання. В існуючих конструкціях гермовводів було передбачено застосування коварових струмопідводів товщиною 0,3 мм. Виготовлення та випробування таких гермовводів в умовах експлуатації показали, що вони не мають достатньої жорсткості, і не забезпечують необхідної точності переміщення променю по стику. Як показали експерименти, збільшення товщини струмопідводу підвищує жорсткість конструкції з одночасним ростом залишкових напружень. Тому оптимізація конструкції і технології паяння на основі аналізу термодформаційних процесів і НДС з урахуванням особливостей гермовводу, зміни ФМВ його матеріалів та пластичних деформацій є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» у рамках плану НДР Національного університету кораблебудування (НУК) по темам № 1673 «Дослідження термодформаційних і термодинамічних процесів при дифузійному зварюванні, паянні та наплавленні однорідних і різнорідних матеріалів» (2008...2010 р.р., № ДР0108U001168); № 1812 «Дослідження термодформаційних процесів і залишкових напружень при зварюванні тиском та паянні з проміжними прошарками однорідних і різнорідних матеріалів» (2011...2013 р.р., № ДР0111U002312); по замовленню НВП «Технобім» тема № 1670, 09/12/1763, 1778, 1872 на розробку технології, оптимізацію та паяння з тиском промислової партії металокерамічних вузлів (2008...2013 р.р., № ДР0108U001173); № 1965 «Наукові основи з'єднання різнорідних матеріалів з керованим напружено-деформованим станом та активацією поверхонь» (2014...2015р.р., № ДР0114U001501); по замовленню ТОВ «Вітова ЛТД» тема № 2017 «Розробка технології паяння та виготовлення промислової партії металокерамічних вузлів» (2015р., № ДР 0115U004721).

Дисертант брав участь у перерахованих роботах як виконавець.

Мета та задачі дослідження. Мета дисертації – оптимізація конструкції і технології адгезійно-активного паяння високовольтних гермовводів електронно-променевих гармат з керованим НДС, що забезпечує необхідну жорсткість і працездатність гермовводів.

У відповідності з метою роботи необхідно було вирішити наступні завдання:

- проаналізувати існуючі технології з'єднання різнорідних матеріалів і методи моделювання НДС у зоні з'єднання;
- визначити параметри повзучості коvara та їх зміну в процесі охолодження спаяних з'єднань;
- установити закономірності формування НДС з урахуванням деформацій миттєвої пластичності і повзучості при паянні з тиском і вплив товщини коvara на залишкові напруження вузла, та жорсткість гермовводу електронно-променевої гармати;
- визначити вплив режиму охолодження і величини тиску на формування НДС при охолодженні металокерамічного вузла;
- дослідити характеристики змочування коvarу та кераміки, формування з'єднань у процесі контактнo-реактивного плавлення фольги титану і міді, та склад, структуру і властивості спаяного з'єднання;

- оптимізувати конструкцію металокерамічного гермовводу електронно-променевої гармати і технологію паяння, розробити документацію на Типову технологію активного високотемпературного паяння з тиском, яка підвищує ефективність конструкції і процесу, та виконати паяння партії штатних деталей.

Об'єкт дослідження – процеси паяння з тиском і формування з'єднань металокерамічного гермовводу електронно-променевої гармати.

Предмет дослідження – структура, параметри повзучості коvara, напружено-деформований стан, фізико-механічні властивості спаяного з'єднання.

Методи дослідження. Комп'ютерне моделювання проводилося методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням двомірного вісесиметричного елемента типу *Plane 182*. Характеристики змочування досліджувалися методом краплі, що перебуває у стані спокою. Структурні дослідження проводили за допомогою оптичної металографії, растрової електронної мікроскопії, а також рентгеноструктурного аналізу. Розподіл хімічних елементів визначали методом локального рентгеноспектрального мікроаналізу. Фізико-механічні властивості досліджували за допомогою модернізованої установки УДСВ-ДТ та дослідницького комплексу *GLeeble-3800*.

Паяння з тиском виконували у вакуумній печі СНВ-1-3-1/16Н1 та надвисоковакуумному універсальному технологічному комплексі ВВУ-1Д, який має статус Національного надбання України.

Наукова новизна роботи полягає в установленнях закономірностей формування спаяного з'єднання та НДС вузла кераміка-ковар з урахуванням деформацій миттєвої пластичності і повзучості, зміни ФМВ матеріалів при охолодженні, що є основою оптимізації конструкції та технології виготовлення гермовводів.

1. Вперше методом комп'ютерного моделювання кінетики формування НДС металокерамічного вузла гермовводу з урахуванням пластичних деформацій коvara і зміни ФМВ матеріалів при охолодженні встановлено, що максимальні напруження розтягу, які є найбільш небезпечними для кераміки, зосереджені на зовнішній і внутрішній бокових поверхнях керамічного кільця поблизу стику. У пружному стані напруження на внутрішній поверхні в 5 разів більші ніж на зовнішній і при охолодженні до 400 °С, коли ТКЛР кераміки і коvara стають рівними, при товщині струмопідводу 0,8 мм напруження досягають 121 та 27 МПа відповідно, що може зруйнувати кераміку по внутрішній поверхні.

2. Вперше доведено, що при охолодженні і появі деформацій миттєвої пластичних коvara на зовнішній поверхні кераміки напруження розтягу зростають до 3-х разів (до 74 МПа), а на внутрішній зменшуються в 4 рази

(до 29 МПа). Деформації миттєвої пластичності і повзучості ковару при повільному охолодженні зменшують напруження на зовнішній поверхні в 1,5 рази (до 53 МПа) і мало змінюють напруження на внутрішній поверхні (біля 27 МПа), що істотно менше границі міцності кераміки на розтяг.

3. Методом комп'ютерного моделювання НДС вузла гермовводу вперше встановлено, що при збільшенні товщини ковару від 0,3 до 0,8 мм максимальні осеві напруження розтягу в кераміці істотно зростають, як на зовнішній так і на внутрішній поверхнях керамічного кільця, але для даної конструкції гермовводу деформації миттєвої пластичності і повзучості, при повільному охолодженні, знижують їх до безпечного рівня навіть при товщині ковару 0,8 мм.

4. Уперше показано, що при охолодженні від 900 °С до 400 °С, коли ТКЛР ковару перевищує ТКЛР кераміки в 1,8 рази, прикладання зусилля стиску підвищує еквівалентні напруження в коварі, знижує жорсткість його напруженого стану, що підвищує пластичні деформації ковару, та знижує напруження розтягу в кераміці.

5. Установлені крайові кути змочування ковару при контактнореактивному паянні з використанням фольги титана і міді при 960 °С складають 7...9 °, мулліту – 32...34 °, ВК94-1 – 22...24 °, а припоєм СТЕМЕТ-1203 крайові кути змочування ковару дорівнюють 18...20 °, мулліту – 45...46 ° і ВК94-1 – 27...29 °, що свідчить про підвищену адгезійну активність розплаву порівняно з припоєм СТЕМЕТ-1203 та дозволяє зменшити температуру (в середньому на 40 °С) та час паяння.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечуються застосуванням сучасних методів та обладнання для дослідження ФМВ матеріалів з використанням сучасних повірених приладів. Результати моделювання підтверджуються практичної експлуатацією промислових виробів, визнанням результатів на міжнародних конференціях з теми дослідження.

Практичне значення отриманих результатів.

Теоретичне обґрунтування технології паяння під тиском з керованим НДС, які показують закономірності формування термдеформаційних процесів з урахуванням деформацій миттєвої пластичності і повзучості, дозволило розробити технологію паяння та отримати металокерамічні гермовводи з товщиною струмопідводів 0,5 мм, які мають підвищену жорсткість під час експлуатації у порівнянні з зарубіжними аналогами з товщиною 0,3 мм.

Розроблено Типову технологію виготовлення металокерамічних вузлів гермовводів для електронно-променевих гармат в установках для зварювання та напилення (УКФА 680210 001 ТП-2010).

Виготовлена промислова партія вузлів гермовводів, які успішно пройшли випробування. Оптимізована конструкція металокерамічних вузлів гермовводів, які за технічними характеристиками перевершують імпорتنі аналоги. Розроблена технологія їх виробництва, яка виключає процес металізації кераміки, що зменшує собівартість вузлів у порівнянні з імпортними на 50 %.

Впровадження результатів дисертації. Основні результати роботи впроваджені за замовленням НВП «Технобім», ТОВ «Вітова ЛТД», в НДІ «Паяння і зварювання тиском у вакуумі» НДЧ НУК та використовуються для виробництва металокерамічних гермовводів електронно-променевих гармат

Результати досліджень впроваджені у навчальний процес НУК.

Особистий внесок здобувача полягає у постановці мети і задач роботи, програми досліджень, побудові скінчено-елементних моделей охолодження паяних вузлів з урахуванням реальних фізико-механічних властивостей матеріалів та їх коефіцієнтів повзучості, проведенні моделювання, аналізі його результатів, визначенні закономірностей впливу охолодження під тиском з керуванням НДС на рівень залишкових напружень.

Автор брав особисту участь у проведенні експериментальних досліджень повзучості матеріалів, обробці експериментальних даних, дослідженні структури і властивостей паяного шву, аналізі результатів моделювання, паянні промислової партії виробів, розробці Типової технології, в результаті чого були запатентовані режим і технологічне оснащення для паяння гермовводів, впроваджено технологію паяння металокерамічних гермовводів для електронно-променевих гармат.

При підготовці публікацій внесок автора був істотно важливим.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи та наукові положення дисертації доповідалися і обговорювалися на IV Міжнародній конференції „Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах” (Україна, с. Кадивелі, 2008 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемы сварки, родственных процессов и технологий» (Україна, м. Миколаїв, 2009 р.); II-й та III-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития» (Україна, м. Краматорськ, 2010, 2012 р.); II-й та V-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Україна, м. Миколаїв, 2011, 2014 р.); Міжнародній конференції «Сварка и родственные технологии – настоящие и будущее» (Україна, м. Київ, 2013 р.); 75 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Україна, м. Дніпропетровськ, 2015 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Зварювання та споріднені процеси і технології» (Україна,

м. Миколаїв, 2008 р.); V Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (Україна, м. Київ, 2009 р.); VI науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (Україна, м. Київ, 2011 р.); VII науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Сварка и родственные технологии» (Україна, м. Київ, 2013 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції, присвяченої 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова, та III Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» (Україна, м. Миколаїв, 2014 р.).

Дисертаційна робота в цілому обговорювалася на наукових семінарах НУК і одержала позитивну оцінку.

Публікації. За темою дисертації надруковано 29 наукових робіт, з котрих 8 статей в наукових журналах і збірниках наукових праць, що входять до Переліку ДАК України, 1 стаття в зарубіжному науково-технічному журналі, 1 стаття у збірнику, який входить до науково метричної бази «Scopus», 17 тез доповідей і матеріалів міжнародних і всеукраїнських конференцій; отримано два патенти на корисну модель України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 147 найменувань на 19 сторінках і додатків. Загальний обсяг дисертації викладено на 178 стор., машинописного тексту, містить 96 рис., 18 табл.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи і задачі досліджень, описано об'єкт, предмет і методи досліджень, охарактеризовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів з наведенням особистого внеску автора.

У першому розділі проаналізовано особливості конструювання металокерамічних вузлів та методи зниження залишкових напружень, виникаючих за рахунок різниці ТКЛР з'єднувальних матеріалів. Показано, що основною проблемою при виготовленні високовольтних гермовводів, що складаються з струмопідводів з металу та керамічних кілець, які чергуються між собою, є виникнення власних залишкових напружень і деформацій у зв'язку з різницею ФМВ матеріалів, що може призвести до руйнування вузла.

Проведений аналіз загальних характеристик матеріалів для металокерамічних вузлів показав, що для виготовлення високовольтних металокерамічних гермовводів електронно-променевих гармат необхідно

використовувати узгоджені спаї, кераміки і ковару, які мають близькі ТКЛР і з'єднуються з використанням ДЗ або паяння.

Аналіз літератури показав, що найменш трудомістким способом з'єднання металу з керамікою є активне паяння, оскільки ДЗ вимагає ретельної підготовки поверхні а паяння металізованої кераміки включає операцію металізації кераміки пастою при температурі, близькій до 1600 °С. Однак при активному паянні існує проблема змочування неметалів.

Оскільки при температурах 400...460 °С ТКЛР коvara різко зростає, і при температурі 900 °С він більший від ТКЛР кераміки в 1,8 рази, то після високотемпературного паяння рівень залишкових напружень може перевищувати допустимий.

Існуюча конструкція вузла гермоввода для зниження залишкових напружень, передбачає застосування коварових струмопідводів товщиною 0,3 мм. Виготовлення гермовводів з товщиною коvara 0,3 мм і їх випробування в умовах експлуатації показало, що вони не мають достатньої жорсткості, а збільшення товщини коvara призводить до втрати герметичності за рахунок утворення тріщин.

Управління НДС з'єднань можливо на основі результатів його моделювання. Незважаючи на наявність сучасних програмних комплексів, моделювання НДС з урахуванням пластичних деформацій миттєвої пластичності досліджено мало, а з урахуванням деформацій повзучості тільки починає вивчатися. Реальні результати моделювання можна отримати тільки з урахуванням цих деформацій. У літературі такі відомості вкрай обмежені. Для моделювання НДС з урахуванням перелічених факторів вибрано МСЕ з використанням двомірного елементу вісесиметричного НДС типу *Plane 182*.

Паяння високовольтних металокерамічних гермовводів для електронно-променевих гармат також має складнощі, які пов'язані з необхідністю одночасного паяння 8-ми стиків при радіаційному нагріві.

У цьому ж розділі сформульовано задачі дисертаційної роботи.

Другий розділ містить відомості про досліджені матеріали, такі як: прецизійний сплав 29НК, корундову кераміку ВК 94-1, активні припої і пасти. Також у даному розділі досліджені властивості сплаву 29НК, які відсутні у літературі, але необхідні для моделювання. Ці дослідження проведено на комплексі *Glleble-3800* в ІЕЗ ім. Є.О. Патона та модернізованому комплексі УДСВ-ДТ в НУК, який оснащений високоточними датчиками контролю температури, переміщень і навантаження.

Дослідження крайових кутів змочування та паяння металокерамічних високовольтних гермовводів виконувалися за допомогою вакуумної установки СНВ-1.3,1/20И1 з радіаційним нагрівом.

Оптичну мікроскопію виконували на мікроскопі Неофот-21. Растрову електронну мікроскопію і локальний рентгеноспектральний мікроаналіз проводили на установці РЭММА 102-02 з енергодисперсійним і хвильовим спектрометрами. Перед растровою мікроскопією на зразки наносили шар вуглецю товщиною 0,01 мм за допомогою установки ВУП-5М.

Рентгеноструктурний аналіз проводили на дифрактометрі ДРОН-УМ1 у монохроматичному $\text{Cu K}\alpha$ - випромінюванні методом крокового сканування.

Ідентифікація фаз проводилася шляхом визначення мікротвердості за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3 та багатофункціонального приладу «Мікрон-гамма».

Перевірка адекватності методики моделювання показала, що максимальне розходження розрахункових та експериментальних даних не перевищує 5 %.

У третьому розділі виконано комп'ютерне моделювання НДС металокерамічного вузла методом скінченних елементів з урахуванням температурної залежності фізико-механічних властивостей матеріалів, а також деформацій миттєвої пластичності і повзучості.

Для визначення оптимальної товщини струмопідводу встановлено вплив товщини ковару на жорсткість конструкції під час експлуатації. Максимальна робоча температура гермовводу під час експлуатації становить 600°C , навантаження на зовнішню стінку 10^5 Па. Моделювалася частина гермовводу закріплена до введення в камеру (рис. 1.). Товщина струмопідводу (h) змінювалася від 0,3 до 1,2 мм. Властивості матеріалів задавалися при температурі 600°C .

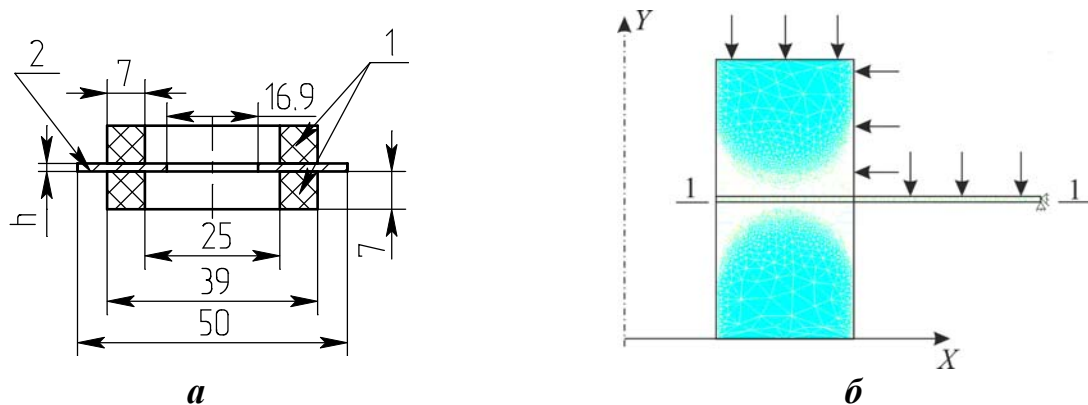


Рис. 1. Фізична (а) і скінчено-елементна модель (б) вузла гермовводу: 1 – керамічне кільце; 2 – струмопідвод з ковару

Аналіз полів переміщень по Y і X показав, що максимальні переміщення по X малі і не можуть впливати на точність сканування стику, а переміщення по Y поступово збільшуються від точки закріплення струмопідводу і досягають максимуму в районі з'єднання ковару з керамікою.

Встановлено, що підвищення товщини струмопідводу від 0,3 до 0,4...0,55 мм різко зменшують переміщення, за рахунок підвищення

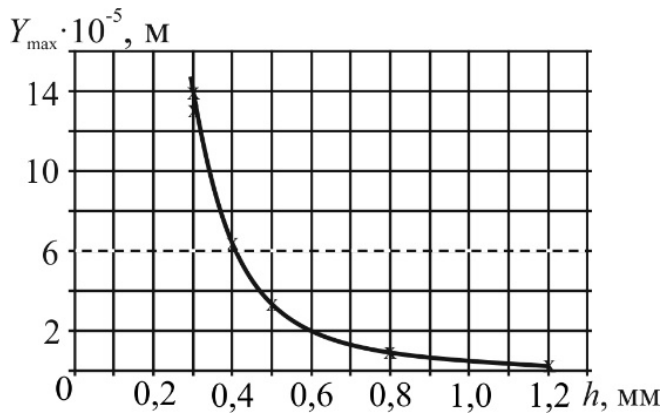


Рис. 2. Залежність максимальних переміщень від товщини ковару по осі Y

жорсткості: при товщині ковару 0,4 мм – на 50 %, при 0,5 мм – на 80 % і при 0,8 мм – 95 %. Підвищення товщини ковару більше 0,5 мм суттєво не впливає на переміщення (рис. 2). Мінімальною товщиною слід вважати 0,4 мм, при якій вертикальне переміщення не перевищує 0,06 мм і задовольняє вимоги до конструкції.

Для оптимізації конструкції гермовводу і технології паяння досліджено формування НДС при зміні товщини стумопідводу від 0,3 до 0,8 мм і тиску 5, 17,5 і 30 МПа. Вплив режиму охолодження на формування НДС металокерамічного вузла досліджували при товщині струмопідводу 0,8 мм і тиску 5 МПа. Розглядалося формування НДС в пружному стані, з урахуванням деформацій миттєвої пластичності (швидке охолодження) та деформацій миттєвої пластичності і повзучості (повільне охолодження). Вивчалася зміна напруженого стану при охолодженні вузла від температури паяння (кристалізації припою) 900 °С до температури рівних коефіцієнтів 300 °С.

Розподілу напружень розтягу уздовж утворюючих на зовнішній та внутрішній поверхнях керамічної частини вузла показав, що він відповідає раніше встановленим закономірностям для металокерамічних вузлів типу циліндр-циліндр і втулка-втулка. Ці напруження з'являються поблизу стику з коваром і в міру віддалення від нього спочатку зростають, досягаючи максимуму на відстані близько 2 і 1 мм від стику на зовнішній та внутрішній поверхнях відповідно, а потім зменшуються (рис. 3).

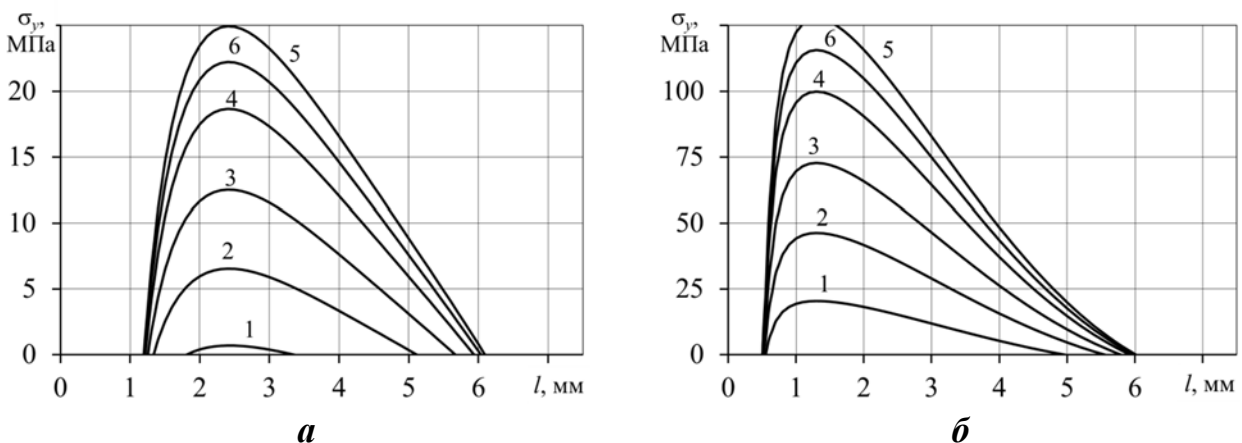


Рис. 3. Епюри осевих напружень розтягу на зовнішній (а) і внутрішній (б) поверхнях кераміки при температурах охолодження 800 °С (1), 700 °С (2), 600 °С (3), 500 °С (4), 400 °С (5), 300 °С (6) в пружному стані і тиску 5 МПа

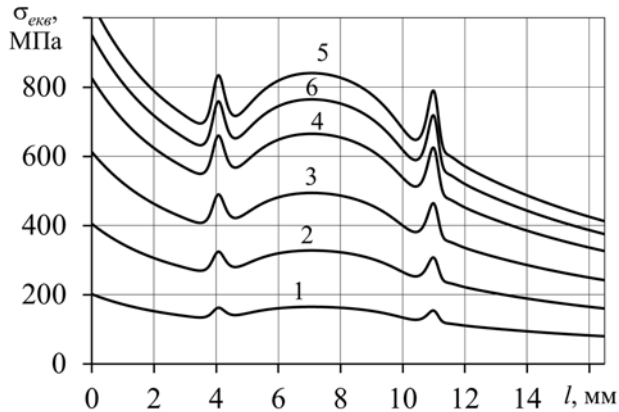


Рис. 4. Епюри еквівалентних напружень уздовж кромки струмопідводу при температурах охолодження 800 °C (1), 700 °C (2), 600 °C (3), 500 °C (4), 400 °C (5), 300 °C (6) в пружному стані і тиску 5 МПа

Характер розподілу еквівалентних напружень уздовж струмопідводу нерівномірний, при цьому під час зниження температури ступінь нерівномірності зростає (рис. 4). Максимального значення вони досягають на внутрішній кромці струмопідводу, поступово зменшуючись у міру віддалення від неї. На кромках стику, у точках концентрації напружень, вони підвищуються (спостерігається сплеск). Таким чином, загальний високий рівень еквівалентних

напружень у коварі повинен викликати пластичні деформації у ньому, що неминуче вплине на напружений стан вузла в цілому.

Аналіз полів і епюр окремих складових та еквівалентних пластичних деформацій миттєвої пластичності (швидке охолодження) дозволяє зробити висновок, що їх характер розподілу і рівень у межах стику визначаються осьовими деформаціями (ϵ_y), які досягають на більшій частині стику величини 0,64 %, що удвічі перевищує радіальні та окружні (ϵ_x і ϵ_z). Ці деформації створюються прикладеним до вузла у процесі охолодження тиску.

За межами стику у зовнішній й внутрішній стороні спостерігаються окружні пластичні деформації (ϵ_z), рівень яких (до 0,57 і 0,18 %) також вдвічі перевищує радіальні і осьові. Основною причиною появи цих деформацій за межами стику є зміна (збільшення) діаметра частини струмопідводу, що знаходиться у межах стику, під дією зусилля стиснення.

При повільному охолодженні спочатку в області високих температур розвиваються тільки деформації повзучості, оскільки рівень напружень малий (рис. 5). На заключному етапі охолодження, навпаки, відсутні деформації повзучості і розвиваються тільки деформації миттєвої пластичності. При цьому сума їх при повільному охолодженні збігається з величиною миттєвих деформацій при швидкому охолодженні.

За результатами досліджень максимальних залишкових осьових напружень розтягу рекомендовано режим повільного охолодження, при якому відбуваються процеси деформацій миттєвої пластичності і повзучості та зниження напружень на зовнішньої поверхні з 74 до 53 МПа (рис. 6).

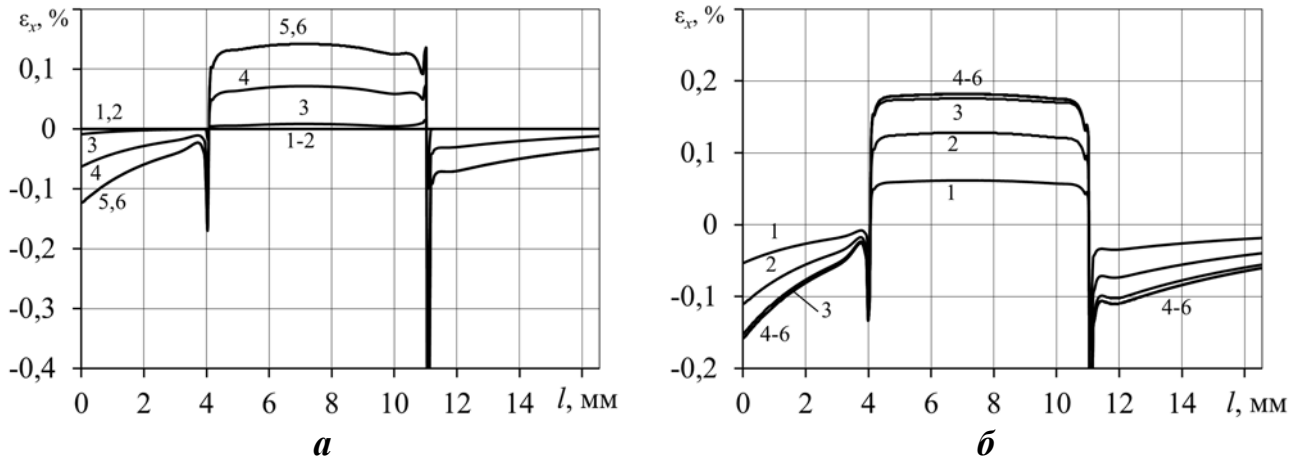


Рис. 5. Епюри миттєвих пластичних ε_x (а) і деформацій повзучості $\varepsilon_x^{\text{полз}}$ (б) на поверхні струмопідводу при повільному охолодженні: 800 °C (1), 700 °C (2), 600 °C (3), 500 °C (4), 400 °C (5), 300 °C (6) і тиску 5 МПа

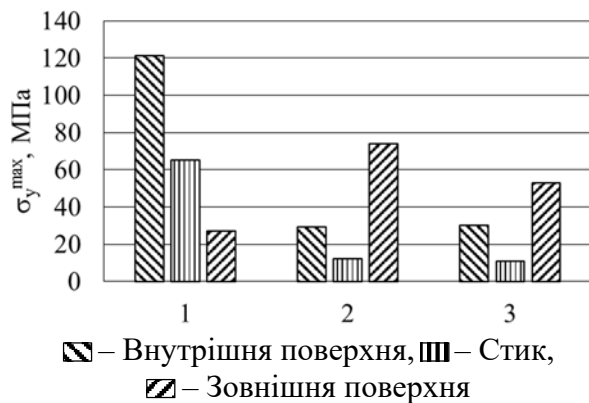


Рис. 6. Максимальні напруження розтягу після розвантаження у кераміці: 1 – в пружному стані, 2 – швидке охолодження, 3 – повільне охолодження

Дослідження впливу товщині струмопідводу та прикладеного тиску на НДС вузла показали, що максимальні напруження розтягу в кераміці помітно зростають зі збільшенням товщини ковару рис. 7. При швидкому охолодженні вони на зовнішній поверхні збільшуються залежно від тиску при товщині 0,3 мм від 10...20 МПа до 60...70 МПа при товщині 0,8 мм, від 0...15 МПа до 5...40 МПа на внутрішній. При повільному охолодженні вони також

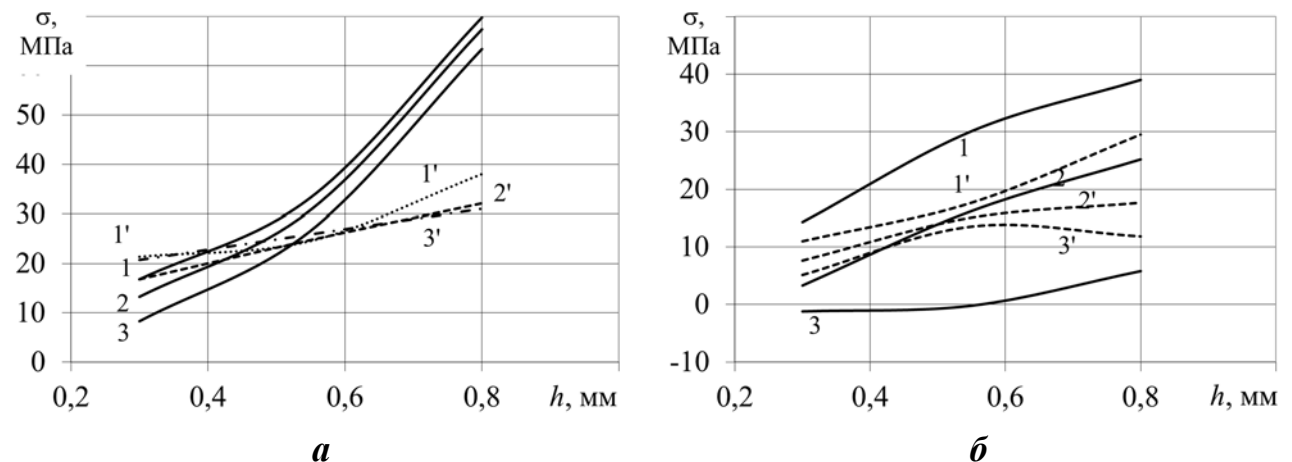


Рис. 7. Залежності максимальних осьових залишкових напружень у кераміці на зовнішній поверхні (а) та внутрішній (б) поверхні від товщини ковару при тиску 5 МПа (1, 1'), 17,5 МПа (2, 2') и 30 МПа (3, 3') (суцільні криві – швидке охолодження, пунктирні криві – повільне охолодження)

збільшуються, але в меншій мірі: від 20 МПа до 30...40 МПа на зовнішній і від 5...10 МПа до 10...30 МПа на внутрішній поверхні при збільшенні товщини струмопідводу від 0,3 до 0,8 мм. Підвищення прикладеного тиску мало впливає на рівень залишкових осьових напружень на зовнішньої поверхні (рис. 7,*a*) і істотно зніжує на внутрішній. Поява деформацій повзучості при повільному охолодженні істотно зніжує напруження розтягу на зовнішній поверхні кераміки.

У четвертому розділі досліджено процеси взаємодії титановмісних припоїв з оксидною керамікою і коваром.

Досліджували крайові кути змочування методом краплі, що перебуває у стані спокою, припоєм STEMET-1203 і припоєм, що утворюється за рахунок контактно-реактивного плавлення фольги Ti-Cu (50 % Ti-50 % Cu за об.) по кераміці марки ВК 94-1, муллиту ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$) та прецизійного сплаву марки 29НК (рис. 8).

Установлено, що при контактно-реактивному паянні кераміки, особливо муллиту, і ковару змочування розплавом Ti-Cu краще ніж припоєм STEMET-1203 (по муллиту на 12..18 град). Заміри крайових кутів змочування показали, що припій STEMET-1203 при взаємодії з керамікою ВК 94-1, забезпечує крайові кути змочування 27...29 град. і 20...23 град. при температурах 960 і 1020 °С відповідно. Припій Ti-Cu забезпечує в аналогічних умовах крайовий кут змочування 22...24 град. і 18...20 град. відповідно.

Значна перевага процесу контактно-реактивного плавлення спостерігається також при змочуванні коvara 29НК. Так, припій STEMET-1203 змочує ковар з крайовими кутами 18...20 град. і 10...12 град. при температурах 960 °С і 1020 °С відповідно. Припій Ti-Cu забезпечує істотно кращі показники: 7...9 град. і 5... 7 град. відповідно.

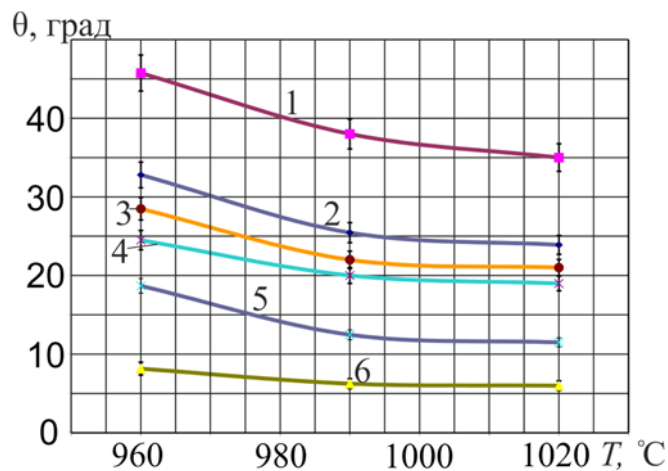


Рис. 8. Крайові кути змочування припоями досліджуваних матеріалів: 1 – STEMET-1203 по муллиту ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$); 2 – Ti-Cu по муллиту ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$); 3 – STEMET-1203 по кераміці ВК 94-1; 4 – Ti-Cu по кераміці ВК 94-1; 5 – STEMET-1203 по сплаву 29НК; 6 – Ti-Cu по сплаву 29НК.

Таким чином, комплексний аналіз отриманих результатів показав, що використання припою Ti-Cu забезпечує підвищення адгезійної активності, порівняно з припоєм STEMET-1203, і дозволяє знизити температуру паяння у

середньому на 40...90 °С. Крім того, для виготовлення металокерамічних гермовводів оптимальним є використання узгоджених спаїв: прецизійний сплав 29НК – кераміка марки ВК 94-1.

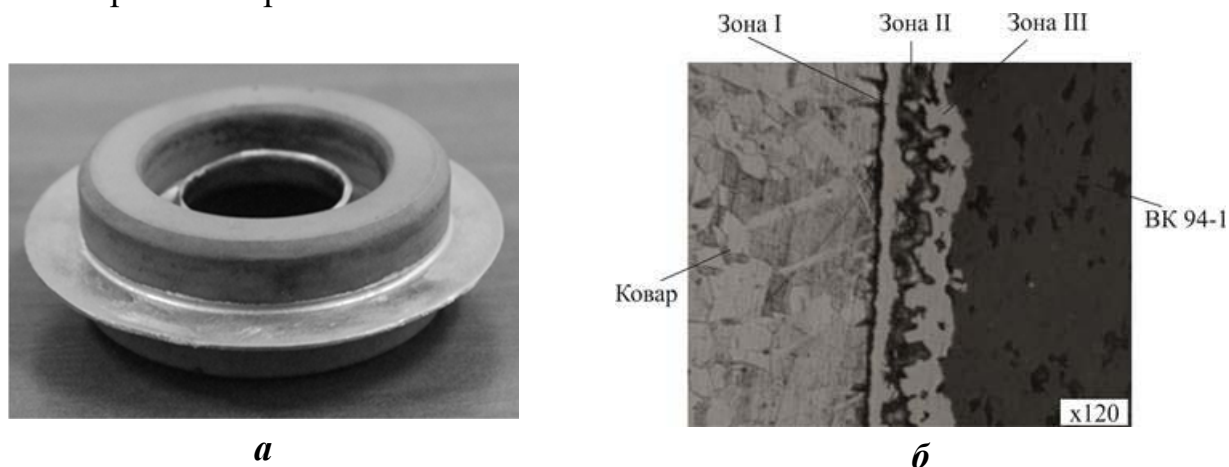


Рис. 9. Загальний вигляд паяного металокерамічного вузла гермовводу (а) та мікроструктура паяного з'єднання (б)

Паяння вузла гермовводу проводили у вакуумній печі СНО-1-3-1 / 16Н1 на наступних режимах: вакуум не нижче 10^{-2} Па, тиск стиснення 5 МПа, температура паяння 960 °С (см рис. 10). Зовнішній вигляд спаяного вузла і мікроструктура з'єднання показані на рис. 9. Контактно-реактивне паяння виконувалася з використанням фольги титану і міді товщиною 0,1 мм кожна.

Оптичне дослідження паяного шва і мікротвердості показали утворення характерних трьох зон (рис.9,б): однорідний шар з боку ковару товщиною 19...45 мкм з мікротвердістю $H_{\mu 50} = 1,9...2,2$ ГПа (зона I); середня зона – неоднорідний по товщині і фазовим складом паяний шов товщиною 7...58 мкм з мікротвердістю $H_{\mu 50} = 2,1...2,8$ ГПа (зона II); і зона активної взаємодії припою з керамікою, що має нерівномірну товщину 15...53 мкм, з мікротвердістю $H_{\mu 50} = 3,2...3,6$ ГПа (зона III). Дифузійне проникнення припою в кераміку спостерігається до 30 мкм.

Рентгеноструктурний аналіз показав, що з'єднання містить три фазові складові з кубічними ґратками, такі як $\text{Cu}_2\text{Ti}_4\text{O}$, $\text{Ti}_3\text{Cu}_3\text{O}$ і Al_4Cu_9 . Крихких інтерметалідних сполук, за винятком незначної кількості Al_4Cu_9 , яка, ймовірно, локалізується у прикордонній до кераміки області, виявлено не було.

В цілому, спаяний шов має високу щільність. Макро-і мікродефекти, такі як пори, раковини, непроаї, тріщини та ін. не виявлені. По периметру формуються щільні шви з рівномірною галтеллю (рис. 9,а). З'єднання спаяного шва з керамікою і коваром плавне. Дослідження герметичності вузла гермовводу проводилося за допомогою гелієвого течешукача ПТИ-10 показало, що натікання гелію становить не більше $1 \cdot 10^{-13}$ м³·Па/с. Спаяний вузол

гермовводу задовольняє експлуатаційним вимоги, які пред'являються до гермовводів для електронно-променевих гармат.

У п'ятому розділі розглянуто застосування активного контактнореактивного паяння під тиском, з керованим НДС металокерамічних високовольтних гермовводів для електронно-променевих гармат (рис. 10).

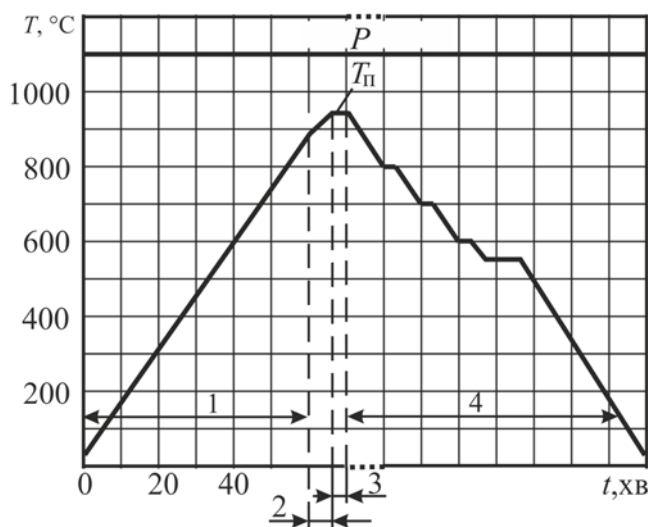


Рис. 10. Циклограма процесу паяння гермовводів під тиском з керованим НДС: 1 – час виходу на температуру паяння; 2 – час стабілізації температури; 3 – час паяння; 4 – час керованого охолодження

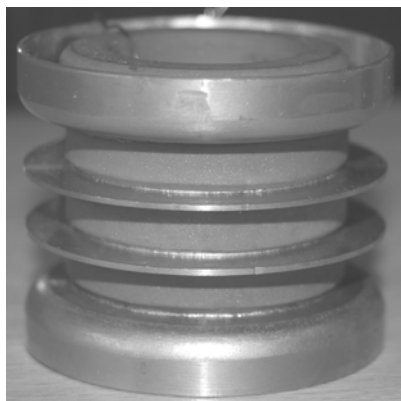


Рис. 11. Зовнішній вигляд спаяного металокерамічного гермовводу розрахованого на прискорююче напруження 20 кВ, для електронно-променевих гармат

Розроблено технологічне оснащення для паяння під постійним тиском і Типову технологію виготовлення металокерамічних вузлів гермовводів для електронно-променевих гармат в установках для зварювання та наплення (УКФА 680210 001 ТП-2010), яка за замовленням НВП «Технобім» була впроваджена в НДІ «Паяння і зварювання тиском у вакуумі» НДЧ НУК та використовується для виробництва металокерамічних гермовводів. Технологія дозволяє паяти 8 стиків одночасно під постійним навантаженням з керованим НДС, що дозволило паяти гермовводи з товщиною струмопідводів 0,5 мм (рис.11), які мають підвищені експлуатаційні характеристики, і знизити їхню собівартість на 50 % у порівнянні з зарубіжними аналогами.

На замовлення ТОВ «Вітова ЛТД» була розроблена технологічна оснастка і виконана паяння 10 гермовводів, які забезпечують потужність пучка 1 кВт при прискорюючій напрузі не більше 10 кВ.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального науково-технічного завдання – оптимізації конструкції і технології паяння високовольтних гермовводів з керованим НДС, що забезпечує необхідну жорсткість і працездатність гермовводів.

Головні наукові і практичні результати роботи:

1. Аналіз літератури та існуючих технологій виготовлення металокерамічних гермовводів показав, що для з'єднання металів з керамікою найбільше підходить технологія активного паяння під тиском, оскільки паяння металізованої кераміки процес трудомісткий і дорогий. Складність активного паяння полягає в поганій змочуваності неметалів, що вимагає використання адгезійно-активних припоїв, і виникненні при охолодженні у з'єднаннях залишкових напружень за рахунок різниці ТКЛР матеріалів, які можуть викликати їх руйнування.

2. Запропонована методика комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану методом скінченних елементів з урахуванням залежності фізико-механічних властивостей від температури і коефіцієнтів повзучості металу. Перевірка адекватності методики моделювання показала, що максимальне розходження розрахункових та експериментальних даних не перевищує 5 %.

3. Експериментальними методами отримані криві повзучості прецизійного сплаву 29НК, з яких виведені коефіцієнти для рівняння, яке описує першу і другу стадії повзучості в залежності від охолодження і використовуються при моделюванні НДС вузла гермоввода.

4. Встановлено вплив товщини коvara на жорсткість вузла гермоввода під час експлуатації. Аналіз полів переміщень по осям Y і X показав, що переміщення по Y поступово збільшуються від точки закріплення струмопідводу до району з'єднання коvara з керамікою, досягаючи максимуму, а по X – на два порядки менші і не впливають на точність сканування стику. По осі Y , при збільшенні товщини коvara від 0,3 до 0,4...0,55 мм, за рахунок підвищення жорсткості різко зменшуються переміщення: при товщині коvara 0,4 мм на 50 %, 0,5 мм – 80 %, 0,8 мм – 95 %. Мінімальною товщиною слід вважати 0,4 мм, а максимальною – 0,8 мм, при яких вертикальні переміщення не перевищують допустиме значення (0,06 мм), що задовольняє вимоги до конструкції.

5. Вперше комп'ютерним моделюванням досліджена кінетика НДС металокерамічного вузлу гермовводу у процесі охолодження, після паяння, з урахуванням зміни ФМС з'єднувальних матеріалів. Встановлено, що максимальні напруження розтягу після охолодження зосереджені на зовнішній і внутрішній поверхнях кераміки вздовж утворюючих, поблизу стику. При пружному деформуванні напруження на внутрішній поверхні, при товщині коvara рівної 0,8 мм, досягають 121 МПа, а на зовнішній – 27 МПа, що може призвести до руйнування кераміки по внутрішній поверхні.

6. Поява деформацій миттєвої пластичності коvarу при охолодженні збільшує напруження розтягу на зовнішній поверхні кераміки в 3 рази (до

74 МПа), а на внутрішній зменшує у 4 рази (до 29 МПа). Деформації миттєвої пластичності і повзучості ковару при повільному охолодженні зменшують напруження на зовнішній поверхні в 1,5 рази (до 53 МПа) і мало змінюють на внутрішній поверхні (біля 27 МПа), що істотно менше границі міцності кераміки на розтяг.

7. Дослідження впливу товщини струмопідводу і прикладеного тиску при паянні на НДС вузла гермоввода показали, що максимальні напруження розтягу в кераміці зростають зі збільшенням товщини. При швидкому охолодженні вони на зовнішній поверхні збільшуються залежно від тиску при товщині 0,3 мм від 10...20 МПа до 60...70 МПа при товщині 0,8 мм; від 0...15 МПа до 5...40 МПа на внутрішній. При повільному охолодженні – від 20 МПа до 30...40 МПа на зовнішній і від 5...10 МПа до 10...30 МПа на внутрішній поверхні.

8. Підвищення прикладеного тиску при паянні майже не впливає на рівень залишкових напружень розтягу на зовнішній поверхні і істотно зніжує його на внутрішній. Збільшення тиску з 5 МПа до 30 МПа (товщина струмопідводу – 0,8 мм) при швидкому і повільному охолодженні приводить до зменшення напружень на зовнішній поверхні на 7 МПа. На внутрішній поверхні збільшення тиску при швидкому охолодженні зніжує напруження на 33 МПа, а при повільному на 17,7 МПа.

9. В результаті дослідження крайових кутів змочування розплаву, який утворюється в процесі контактно-реактивного плавлення фольги Ti і Cu при 960 °C складають по ковару 7...9 °, мулліту – 32...34 °, ВК94-1 – 22...24 °, а припоєм СТЕМЕТ-1203 крайові кути змочування ковару дорівнюють 18...20 °, мулліту – 45...46 ° і ВК94-1 – 27...29 °, що свідчить про підвищену адгезійну активність розплаву порівняно з припоєм СТЕМЕТ-1203 та дозволяє зменшити температуру (в середньому на 40 °C) та час паяння.

10. Встановлено, що при активному контактно-реактивному паянні ковару з керамікою припоєм Ti-Cu при тиску 5 МПа у спаяному шві утворюється три зони: однорідний шар з боку ковару товщиною 19...45 мкм з мікротвердістю $H_{\mu 50} = 1,9...2,2$ ГПа; середня зона – неоднорідний по товщині і фазовому складу спаяний шов товщиною 7...58 мкм з мікротвердістю $H_{\mu 50} = 2,1...2,8$ ГПа; і зона активної взаємодії припою з керамікою, що має нерівномірну товщину 15...53 мкм, з мікротвердістю $H_{\mu 50} = 3,2...3,6$ ГПа. Дифузійне проникнення припою в кераміку спостерігається до 30 мкм. Рентгеноструктурний аналіз показав, що крихких інтерметалідних сполук, які призводять до руйнування паяного з'єднання, за винятком незначної кількості Al_4Cu_9 , виявлено не було.

11. На замовлення НВП «Технобім» розроблена типова технологія активного контактно-реактивного паяння під тиском з керованим НДС, яка використовується для виготовлення металокерамічних високовольтних

гермовводів (УКФА 680210 001 ТП-2010). Технологія виключає трудомісткий процес металізації кераміки, що на 50% знижує вартість вузлів у порівнянні з імпортними. Гермовводи задовольняють Технічним вимогам і застосовуються у системах фокусування пучка при виготовленні електронно-променевих гармат. Розроблена технологія дозволила вперше виготовити в Україні гермовводи з товщиною токопідводу 0,5 мм, які мають більш високі експлуатаційні характеристики в порівнянні із зарубіжними аналогами.

Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати дисертації

1. Квасницький, В.В. Оптимизация конструкции металлокерамического узла на основе моделирования напряженно-деформированного состояния [Текст] / В.В. Квасницький, Ал.В. Лабарткава // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – Одеса: ОНМУ, 2009. – № 1. – С. 82-89.

Особистий внесок автора: запропоновано розрахункові моделі та визначено вплив товщини коварового фланця на рівень залишкових напружень виникаючих при паянні металокерамічних гермовводів.

2. Разработка технологии пайки металлокерамических гермовводов для электронно-лучевых пушек [Текст] / В.В. Квасницький, Ал.В. Лабарткава и др. // TRANSPORT AND MACHINEBUILDING. SCIENTIFIC-TECNICAL JOURNAL. – Tbilisi: Publishing House „TRANSPORT AND MACHINEBUILDING”, 2013. – № 3 (28). – Р 55-58.

Особистий внесок автора: дисертантом була запропонована технологія паяння.

3. Костин, А.М. Исследование процессов взаимодействия титаносодержащих припоев с оксидной керамикой и коваром [Текст] / А.М. Костин, Ал.В. Лабарткава, В.А. Мартыненко // ISSN 1024-1809. Металлофизика и новейшие технологии. – Киев: Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, 2014. – Том 36, № 6; червень, 2014. – С. 815-827.

Особистий внесок автора: проведено металографічні дослідження.

4. Оптимизация конструкции металлокерамического гермоввода [Текст] / В.В. Квасницький, Ал.В. Лабарткава и др. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2014. – № 4 (454). – С. 99-103. <http://dx.doi.org/10/15589/jnn20140416>.

Особистий внесок автора: проведено математичне моделювання впливу товщини токопідводу на жорсткість металокерамічного вузлу під час експлуатації.

5. Лабарткава Ал.В. Остаточные напряжения при пайке металлокерамических гермовводов [Текст] / Ал.В. Лабарткава, // Зб. наук. праць НУК. – 2015, № 3.

6. Патент на корисну модель № 67071, UA МПК (2011.11). C04B 37/02, B23K 1/00, B23K 35/30. Спосіб паяння металокерамічних вузлів [Текст] / В.Ф. Квасницький, В.В. Квасницький, О.М. Костін, Б.В. Бугаєнко,

О.В. Лабарткава; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; заявл. 23.08.2011, № у 2011 10301; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.

7. Патент на корисну модель № 72197, UA МПК (2012.01). C04B 37/02, B23K 1/00, B23K 35/30. Спосіб паяння оксидної кераміки з металом [Текст] / В.Ф. Квасницький, В.В. Квасницький, О.М. Костін, Г.В. Єрмолаєв, Б.В. Бугаєнко, О.В. Лабарткава, А.В. Лабарткава; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; заявл. 31.01.2012, № у 2012 01005; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.

Особистий внесок автора: Дисертант приймав участь в теоретичних та експериментальних дослідженнях впливу режимів паяння на якість з'єднання.

Опубліковані праці апробаційного характеру

8. Квасницький, В.В. Оптимизация конструкции металлокерамического гермоввода на основе моделирования напряженного состояния и разработка технологии пайки [Текст] / В.В. Квасницький, Ал.В. Лабарткава // Четвертая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» 27-28 мая 2008 г.: Тез. докл. Межд. конф. Под редакцией профессора В.И. Махненко. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2008. – С. 51-52.

9. Квасницький, В.В. Оптимизация конструкции спаянного узла гермоввода [Текст] / В.В. Квасницький, Ал.В. Лабарткава // Зварювання та споріднені процеси і технології. Тез. докл. Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих науковців. 3-7 вересня 2008 р. – Миколаїв, 2008. – С. 128.

Особистий внесок автора: запропоновано розрахункові моделі та визначено вплив товщини коварового фланця на рівень залишкових напружень виникаючих при паянні металокерамічних гермовводів.

10. Лабарткава, Ал.В. Напряжённо-деформированное состояние при пайке с давлением металлокерамических гермовводов [Текст] / Ал.В. Лабарткава // Зварювання та споріднені технології. Тез. докл. V Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів 27-29 травня 2009 р. – Київ, 2009. – С. 221.

11. Лабарткава, Ал.В. Оптимизация конструкции металлокерамических гермовводов на основе анализа термдеформационных процессов [Текст] / Ал.В. Лабарткава // Макаровські читання. Тез. докл. НУК імені адмірала Макарова. 27-28 травня 2009 р. – Миколаїв, 2009. – С. 23.

Особистий внесок автора: дисертантом запропоновано скінчено-елементну модель, виконано комп'ютерне моделювання при паянні металокерамічних вузлів та аналіз результатів.

12. Лабарткава, Ал.В. Изготовление металлокерамических гермовводов [Текст] / Ал.В. Лабарткава // Проблемы сварки, родственных процессов и

технологий. Тез. докл. Международной научно технической конференции. НУК им. адм. Макарова. 14-17 октября 2009 г. – Николаев, 2009. – С. 72.

Особистий внесок автора: запропоновано технологію активного паяння металокерамічних вузлів під тиском припоєм, що утворюється за рахунок контактно-реактивного плавлення фольги Ti і Cu.

13. Квасницкий, В.В. Оптимизация конструкции металлокерамического гермоввода на основе моделирования напряженного состояния и разработка технологии пайки [Текст] / В.В. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. IV междунар. конф. 27-30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Украина. Под ред. проф. В.И. Махненко. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2009. – С. 34-37.

Особистий внесок автора: для оцінки впливу міцності і опору повзучості металу на залишкове напружено-деформований стан металокерамічних з'єднань побудована модель та виконано комп'ютерне моделювання.

14. Квасницкий, В.В. Влияние прочности и сопротивления ползучести металла на остаточное напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке и пайке металлокерамических изделий [Текст] / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, Ал.В. Лабарткава // Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития. Материалы II международной научно-технической конференции. 05-08 октября 2010 г. Украина, Краматорск: ДГМА. – С. 18.

15. Квасницкий, В.В. Особенности пайки металлокерамических гермовводов [Текст] / В.В. Квасницкий, А.М. Костин, А.В. Лабарткава, Ал.В. Лабарткава // Матеріали VI науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів. Зварювання та споріднені технології. 25-27 травня 2011 р. – К: ИЕЗ ім. Є.О. Патона. – С.36.

Особистий внесок автора: проведено паяння металокерамічних вузлів, досліджено структуру паяного шва.

16. Оптимизация конструкции керамического проходного изолятора высоковольтного импульсного конденсатора на основе напряжённо-деформированного состояния [Текст] / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, А.В. Лабарткава, Ал.В. Лабарткава // Мат-лы II международной научно-технической конференции «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» присвяченої 20-річчю незалежності України, 5 – 7 октября, Миколаїв, 2011 г. – С. 193-194.

Особистий внесок автора: проведено комп'ютерне моделювання та аналіз результатів.

17. Напряженное состояние при диффузионной сварке и пайке узлов из разнородных материалов с отличающимися жесткостями [Текст] / В.В. Квасницкий, А.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко, Ал.В. Лабарткава // Матеріали

II всеукраїнської науково-практичної конференції «Зварювання та споріднені процеси і технології» 04-08 вересня 2012 р. – Миколаїв: 2012. – С. 122-124.

Особистий внесок автора: запропоновано скінчено-елементну модель.

18. Влияние соотношения жесткостей материалов на напряженное состояние при диффузионной сварке и пайке узлов из разнородных материалов [Текст] / В.В. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава и др. // Матер. III Междунар.научно-техн. конф. «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития» 02 – 05 октября 2012 г. – Краматорск, 2012.– С. 38 – 39.

Особистий внесок автора: проведено аналіз отриманих результатів.

19. Исследование процессов смачивания при пайке металлокерамических гермовводов [Текст] / В.В. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава и др. // Материалы VII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов. Сварка и родственные технологии 22-24 мая 2013 г. Киев: 2013 г. – 212 с.

20. Лабарткава, Ал.В. Исследование процессов смачивания при пайке гермовводов [Текст] / Ал.В. Лабарткава // Макаровські читання. Матеріали VI всеукраїнського форуму молодих науковців, присвяченого дню науки 23-24 травня 2013 р. НУК ім. адм. Макарова. – Миколаїв: 2013. С.79-80.

21. Особенности пайки металлокерамических гермовводов [Текст] / В.В. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава и др. // Международная конференция: Сварка и родственные технологии – настоящие и будущее 25-26 ноября 2013г.: Тез. стенд. докл. / Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. – Киев, 2013.– 75-76 с.

Особистий внесок автора: дисертантом було досліджено крайові кути змочування, та структуру паяних з'єднань.

22. Лабарткава, Ал.В. Влияние толщины металлических токоподводов на жесткость высоковольтного металлокерамического гермоввода электронно-лучевой пушки [Текст] / Ал.В. Лабарткава, А.В. Лабарткава, А.А. Кальченко // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова, та III Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих науковців. «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» 9-13 вересня 2014 р. – Миколаїв, НУК– 2014. –С. 68-69. <http://dx.doi.org/10/15589/conf201416>.

23. Влияние толщины токоподводов на жесткость металлокерамического гермоввода во время эксплуатации [Текст] / Ал.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко, А.В. Лабарткава и др. // Мат-ли V міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» 8 – 10 жовтня 2014 р. – Миколаїв, 2014 р. – С. 173-175.

Особистий внесок автора: проведено математичне моделювання впливу товщини токопідводу на жорсткість металокерамічного вузлу під час експлуатації.

24. Исследование структуры паянного металлокерамического соединения [Текст] / В.В. Квасницкий, А.М. Костин, Ал.В. Лабарткава и др. // Тезисы докладов 75 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» 14-15 мая 2015, Днепропетровск. –Д.:ДИИТ, 2015. – С.377-378.

Особистий внесок автора: проведено аналіз результатів.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

25. Квасницкий, В.В. Влияние прочности и сопротивления ползучести металла на остаточное напряжённо-деформированное состояние металлокерамических соединений [Текст] / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, Ал.В. Лабарткава // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК. – 2009. – № 4. – С. 20-28.

Особистий внесок автора: для оцінки впливу міцності і опору повзучості металу на залишкове напружено-деформований стан металокерамічних з'єднань побудована модель та виконано комп'ютерне моделювання.

26. Квасницкий, В.В. Остаточные напряжения в цилиндрических узлах при диффузионной сварке и пайке разнородных материалов [Текст] / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, Ал.В. Лабарткава // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 6 (435). – С. 55-63.

Особистий внесок автора: запропоновано скінчено-елементну модель, проведено аналіз результатів.

27. Влияние конструкции керамического изолятора высоковольтного конденсатора на его остаточное напряженно-деформированное состояние [Текст] / А.И. Вовченко, В.В. Квасницкий, А.В. Лабарткава, Ал.В. Лабарткава // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2011. – № 3 (438). – С. 52-58.

Особистий внесок автора: проведено комп'ютерне моделювання та аналіз результатів.

28. Влияние соотношения жесткостей материалов на напряженное состояние при диффузионной сварке и пайке узлов из разнородных материалов [Текст] / В.В. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава и др. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2011. – № 6 (441). – С. 23-31.

29. Квасницкий, В.В. Влияние физико-механических свойств промежуточных прослоек в соединениях металлов с неметаллами на формирование остаточных напряжений [Текст] / В.В. Квасницкий, В.Ф. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одеса: ОНМУ. – 2012. – № 2. – С. 29-37.

Особистий внесок автора: запропоновано скінчено-елементну модель, проведено комп'ютерне моделювання та аналіз отриманих результатів.

АНОТАЦІЯ

Лабарткава О.В. «Оптимізація конструкції і технології паяння металокерамічних гермовводів на основі аналізу термдеформаційних процесів». – Рукопис.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, Миколаїв, 2015 р.

Дисертаційна робота присвячена оптимізації конструкції і технології паяння з керованим НДС металокерамічних гермоввод для електронно-променевих гармат в установках для зварювання і напилення.

Комп'ютерним моделюванням показано, що підвищення товщини струмопідводу з 0,3 до 0,8 мм призводить до підвищення жорсткості гермовводу за рахунок зниження переміщень по осі Y на 95 %.

Встановлено, що підвищення товщини струмопідводу призводить до збільшення максимальних напружень розтягу, які зосереджені на зовнішній та внутрішній боковій поверхні кераміки поблизу стику і можуть призвести до руйнування паяного вузла.

Дослідженням крайових кутів змочування когара і кераміки при контактно-реактивному паянні з використанням фольги титана і міді встановлено, що розплав має підвищену адгезійну активність, порівняно з аморфним припоєм СТЕМЕТ-1203, що дозволяє зменшити температуру паяння (в середньому на 40 °С) та час паяння, що підвищує ефективність технології виготовлення гермовводів.

Розроблено технологічне оснащення для паяння під постійним тиском і Типову технологію паяння з керованим НДС металокерамічних вузлів гермовводів для електронно-променевих гармат в установках для зварювання та напилення (УКФА 680210 001 ТП-2010), освоєно виробництво промислових виробів.

Ключові слова: гермовводи, напружено-деформований стан, фізико-механічні властивості, комп'ютерне моделювання, активне паяння.

АННОТАЦИЯ

Лабарткава Ал.В. «Оптимизация конструкции и технологии пайки металлокерамических гермовводов на основе анализа термдеформационных процессов». – Рукопись.

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – «Сварка родственные процессы

и технологии». – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова Министерства образования и науки Украины, Николаев, 2015 г.

Диссертационная работа посвящена оптимизации конструкции и технологии пайки с управляемым напряженно-деформированным состоянием металлокерамических гермовводов для электронно-лучевых пушек установок для сварки и напыления.

Компьютерным моделированием показано, что увеличение толщины токоподвода из ковара с 0,3 мм до 0,8 мм приводит к повышению жесткости узла во время эксплуатации за счет снижения перемещений по Y на 95 %. Минимальной толщиной токоподвода следует считать 0,4 мм, при которой вертикальное перемещение не превышает 0,06 мм.

Установлено, что увеличение толщины токоподвода приводит к повышению максимальных растягивающих напряжений, которые сосредоточены на внутренней и внешней боковых поверхностях керамических колец в районе стыков, и могут к разрушению паянного соединения.

Проанализированы варианты охлаждения гермоввода и влияние толщины на уровень максимальных напряжений. При быстром охлаждении максимальные растягивающие напряжения заметно растут от 10...20 МПа при толщине 0,3 мм до 60...70 МПа при толщине 0,8 мм на внешней поверхности и от 0...15 МПа до 5...30 МПа на внутренней. При медленном охлаждении максимальные растягивающие напряжения растут в меньшей степени от 20 МПа до 30...40 МПа на внешней и от 5...10 МПа до 10...30 МПа на внутренней поверхности при увеличении толщины прослойки от 0,3 до 0,8 мм.

Исследованием краевых углов смачивания ковара и керамики марки ВК94-1 при контактно-реактивном плавлении фольги титана и меди установлено, что расплав имеет повышенную адгезионную активность по сравнению с аморфным припоем СТЕМЕТ-1203, позволяет уменьшить температуру пайки (в среднем на 40 °С) и повышает эффективность технологии изготовления гермовводов.

Результаты выполненных исследований позволили оптимизировать конструкцию и технологию пайки с управляемым НДС металлокерамических гермовводов системы фокусировки пучка в электронно-лучевых пушках в установках для сварки и напыления.

Разработаны технологическая оснастка для пайки под постоянным давлением и типовая технология изготовления изделий (УКФА 680210 001 ТП-2010), которая исключает трудоёмкий процесс металлизации керамики, что на 50 % снижает стоимость узлов по сравнению с использованными ранее импортными. Пайка промышленных изделий с толщиной токоподводов 0,5 мм, и их эксплуатация показала, что гермовводы имеют более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: гермовводы, напряжённо-деформированное состояние, физико-механические свойства, компьютерное моделирование, активная пайка.

ABSTRACT

Labartkava A.V. «Optimization configuration and brazing technology ceramic-metal pressure seals based on analysis processes thermo-deformative process». – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, on specialty 05.03.06 – Welding and allied processes and technology. Admiral Makarov National University of Shipbuilding Ministry of Education and science of Ukraine, Nikolaev, 2015.

The thesis is devoted to the design and technology optimization of brazing with controlled stress-strain state of the sintered pressure seals for electron-beam gun of welding and spattering machines.

Computer modeling shows the increase in thickness of kovar current contact jaw from 0.3 mm up to 0.8 mm results in stiffening effect of joint during the maintenance because of the decrease of Y axis motion by 95 %. The minimum current contact jaw thickness should be 0.4 mm with the vertical displacement no more than 0,06 mm.

It is determined that the current contact jaw thickness increase results in rise of the maximal tension stresses concentrated on inner and outer lateral faces of ceramic ring near conjunctions, and can cause disruption of brazed junction.

The research of limiting wetting angle of kovar and VK94-1 ceramic during titanium and copper foil contact reactive brazing shows that the melt has elevated adhesive as compared with amorphous braze STEMET – 1203, allows to decrease the soldering temperature (at an average by 40 °C) and increases pressure seal manufacturing technique efficiency.

The machining attachments for brazing with constant pressure and standard manufacturing technique (UKFA 680210 001 TP-2010) that excludes labor-intensive process of ceramic metallization and with that decrease by 50% the cost of joints in comparison with the used before imported ones are developed. The brazing of manufactured goods with current contact jaw thickness of 0,5 mm and its maintenance shows that the pressure seals have better performance characteristics in comparison with the foreign equivalents.

Keywords: pressure seals, stress-strain state, physical and mechanical properties, computer modelling, active brazing.