

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"

КВАСНИЦЬКИЙ ВІКТОР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 621.791.01.6

**ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ З КЕРОВАНИМ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ ТА
МОДИФІКУВАННЯМ ПОВЕРХОНЬ З'ЄДНАННЯ**

Спеціальність 05.03.06 –
Зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2010

Дисертація є рукописом

Робота виконана на кафедрі інженерії поверхні Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (КПІ) і кафедрі зварювального виробництва Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор **Кузнецов Валерій Дмитрович**, НТУУ «Київський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Інженерія поверхні»

Офіційні опоненти – академік НАН України, доктор технічних наук, професор **Ющенко Костянтин Андрійович**, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, заступник директора

– доктор технічних наук, професор **Ляшенко Борис Артемович**, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, завідувач лабораторії «Зміцнення поверхонь елементів конструкцій»

– доктор технічних наук, професор **Чигарьов Валерій Васильович**, Приазовський державний технічний університет, завідувач кафедри «Металургія і технологія зварювання»

Захист відбудеться «31» травня 2010 р. в 15⁰⁰ годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України за адресою: м. Київ-56, пр-т. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці НТУУ «КПІ».

Автореферат розісланий «29» квітня 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради,
доктор технічних наук, професор

Р.М. Рижов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток основних напрямків нової техніки, енергетики і інших галузей промисловості нерозривно пов'язаний з необхідністю з'єднання матеріалів в однорідному або різнорідному сполученнях, зварювання плавленням яких ускладнене. У таких випадках застосовують зварювання тиском або паянням. Широкі можливості дає дифузійне зварювання (ДЗ). На даний час виконані з'єднання понад 800 видів пар різних матеріалів, але основною проблемою цього способу є нестабільність формування з'єднань по площі стику та зміні розмірів і форми зварних вузлів, що в літературі пояснюють масштабним фактором. Для впливу на процес формування з'єднань необхідно знати конкретні чинники, управління якими дозволяє вибирати схеми і параметри режиму зварювання деталей і вузлів, а також забезпечити якість з'єднань. Актуальність цієї проблеми загострюється відсутністю надійних методів контролю дифузійних з'єднань. Наявність в стику мікродефектів навіть дуже малих розмірів, наприклад, дефектів типу „злипання” або орієнтування міжзеренної границі вздовж стику, погіршує властивості з'єднань.

Існує ряд гіпотез зварювання у твердому стані, але загально визнаним є уявлення про три стадії процесу: утворення фізичного контакту, активація поверхонь та об'ємна взаємодія. Доведено, що на кожній з цих стадій термодформаційні процеси є одним з головних чинників формування з'єднань. Однак, особливості формування напружено-деформованого стану (НД стану) при ДЗ залежно від фізико-механічних властивостей (ФМВ) матеріалів, структурних перетворень, технологічних параметрів процесу, геометричних характеристик вузлів, пластичних деформацій досліджено мало. При визначенні режимів зварювання, зазвичай, виходять з уявлення про рівномірний розподіл напружень і деформацій по площі стику, що в дійсності трапляється рідко.

Для активації поверхонь з'єднання запропоновано циклічну зміну зусилля стиснення, створення в одній деталі напружень стиску, в другій – розтягу при механічній обробці, застосування ультрадисперсних порошоків тощо, але вплив НД стану на формування з'єднань не досліджено. Не використовуються для підготовки поверхонь сучасні технології модифікування поверхонь, які можуть бути ефективним фактором впливу на формування з'єднань при ДЗ.

При зварюванні різнорідних матеріалів важливою є проблема залишкових напружень, але вплив на їх формування жорсткості і міцності матеріалів, умов охолодження та пластичних деформацій досліджено недостатньо, зокрема, вплив деформацій повзучості практично не вивчався. Тому комплекс наукових досліджень по вивченню процесів формування НД стану з урахуванням зазначених факторів, його впливу на ДЗ і залишкові напруження, модифікуванню поверхонь з'єднання шляхом обробки низькоенергетичними високострумowymi електронними пучками (НВЕП), що є основою для створення перспективних технологій дифузійного зварювання, є **актуальним.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження виконувалися протягом 1998...2009 років за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки «Новітні технології і ресурсозберігаючі технології в

енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі» в рамках плану НДР НУК та НТУУ „КПІ” по дослідженню термодформаційних і термодинамічних процесів при дифузійному зварюванні, паянні і наплавленні однорідних і різнорідних матеріалів (теми 1347, 1998...2001 рр., № ГР 0100U003108; 1477, 2002...2004 рр., № ГР 102U005200; 1554, 2005...2007 рр., № ГР 105U001768; 1673, 2008...2009 рр., № ГР 0108U001168); 2800 „Дослідження механізму формування і властивостей газотермічних покриттів з нанофазною складовою” (2005...2007р.р., № ГР 0105U001064); 2109-п „Дослідження механізму з’єднання матеріалів в умовах керованої високоенергетичної плазмохімічної обробки поверхонь” (2008...2009 рр., № ГР 0108U000572); на замовлення ДП „Харківське агрегатне конструкторське бюро” по дослідженню і розробці технології дифузійного зварювання корпусів електромагнітних клапанів з армко-заліза і нержавіючої сталі та дифузійне зварювання корпусів (теми 1598, 2006 р., № ГР 0106U009875 і 1606, 2006 р., № ГР 0106U009876); на замовлення ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря-Машпроект» № 1643/1981/070 «Дослідження і розробка технології вакуумного паяння-зварювання деталей з нікелевого сплаву Inconel 718» (2007...2008 рр., № ГР0108U001172); на замовлення НВП «Технобім», теми №1670 та 09/12/1763 на розробку технології, оптимізацію та паяння з тиском промислової партії металокерамічних вузлів (2008...2010 рр.); а також згідно договорів про творчу співдружність в області модифікування матеріалів пучками заряджених часток з Інститутом високострумової електроніки СВ РАН (1/с-2006, від 20.09.2006 р.); з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України про співпрацю в дослідженні термодформаційних процесів при зварюванні тиском і споріднених технологіях (1/с-2007, від 16.01.2007 р.); договору про співробітництво в галузі науково-технічної та навчальної діяльності між НТУУ „КПІ” та НУК (1/с.-2008, від 12.03.2008 р); та за науковим напрямком **«Наукові основи перспективних технологій»** в рамках фінансування Державного фонду фундаментальних досліджень за проектом «Ефекти модифікування поверхні матеріалів потужним електронним пучком і їх вплив на формування зварних з’єднань» (ДФФД-РФФД – 2009, Ф 28/429/1743).

Приймав участь в роботах в якості відповідального виконавця, в темі 09/12/1763 – наукового керівника.

Мета і задачі роботи. Мета роботи – вдосконалення технологій дифузійного зварювання шляхом установлення закономірностей формування НД стану в процесі ДЗ різнорідних матеріалів і залишкових напружень з урахуванням пластичних деформацій, технологічних, структурних і інших чинників, модифікування поверхонь із застосуванням низькоенергетичних ($U=20...30\text{кВ}$) високострумових (сотні А) електронних пучків.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити задачі:

- проаналізувати існуючі уявлення про процеси формування з’єднань і НД стану при ДЗ та залишкових напружень при охолодженні після з’єднання різнорідних матеріалів;

- визначити фізико-механічні властивості і закономірності пластичних і структурних деформацій, параметри повзучості металів при температурах ДЗ і формування залишкових напружень;

- визначити закономірності формування НД стану типових вузлів при різних ФМВ матеріалів, що з'єднуються, під впливом технологічних параметрів ДЗ, геометричних і конструктивних чинників в умовах пружності і пластичних деформацій, що відбуваються при напруженнях, які досягають границі плинності матеріалів і при повзучості;

- дослідити можливість підготовки поверхонь, що з'єднуються, із застосуванням низькоенергетичних високострумових електронних пучків, структуру, склад і властивості модифікованих і легованих поверхонь і їх вплив на формування з'єднань при ДЗ;

- дослідити вплив ФМВ і пластичних деформацій на формування і рівень залишкових напружень у вузлах з різномірних матеріалів при ДЗ;

- дослідити вплив жорсткості матеріалів, що з'єднуються, геометричних та конструктивних особливостей типових вузлів і умов охолодження на формування залишкових напружень у вузлах з різномірних матеріалів;

- розробити технологію ДЗ типових деталей та надати рекомендації щодо раціонального проектування вузлів з різномірних матеріалів і устаткування для ДЗ.

Об'єкт досліджень: дифузійне зварювання матеріалів з різними фізико-механічними властивостями.

Предмет досліджень: напружено-деформований стан, процеси пластичної деформації, структура і властивості матеріалів і з'єднань.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань проводили комплексні теоретичні (методом комп'ютерного моделювання) і експериментальні (методом спекл-інтерферометрії) дослідження напружень, визначення будови і фізико-механічних властивостей з'єднань, складу металу методами растрової електронної мікроскопії, що просвічує, оптичної металографії, рентгеноструктурного і рентгенівського мікрорентгеноспектрального аналізу, фізико-механічних властивостей на установках ИМаш-20-78 і Gleevle 3800, механічні випробування згідно стандартам, що діють.

ДЗ виконували на модернізованій установці УДСВ-ДТ і надвисоковакуумному універсальному технологічному комплексі ВВУ-1Д.

Модифікування і легування поверхонь, що з'єднуються, проводили на вакуумній імпульсній електронно-пучковій установці з плазмовим емітером «СОЛО», що забезпечує надшвидкі нагрівання і охолодження поверхневого шару.

Наукова новизна роботи полягає у встановлених закономірностях формування НД стану в умовах пружності і пластичності при ДЗ різномірних матеріалів з урахуванням їх ФМВ, геометричних і конструктивних чинників, параметрів режиму зварювання, а також впливу НД стану і модифікування поверхонь на утворення з'єднань, що визначає шляхи вдосконалення технологій ДЗ.

1. Показано, що при традиційній схемі ДЗ (стиск при постійній температурі), в матеріалі з меншою жорсткістю або міцністю в зоні стику еквівалентні напруження

зменшуються. По за зоною стику формуються максимальні еквівалентні напруження, що збільшує загальні деформації вузла. При цьому розподіл головних напружень показує, що в районі стику в матеріалі з меншою жорсткістю або міцністю формується напружений стан, близький до всебічного стиснення. Рівень еквівалентних напружень, пружних і пластичних деформацій зменшується. Це обумовлює ефект контактного зміцнення м'якого матеріалу.

2. Встановлено, що позитивний вплив тепломінів (термоциклування), пов'язаний з локалізацією пластичних деформацій і розвитком деформацій зсуву в зоні стику, є наслідком виникнення радіальних, окружних і дотичних напружень з максимумом в площині стику. При цьому рівень еквівалентних напружень визначається відмінністю ТКЛР, температурним інтервалом тепломінів, об'ємними змінами при структурних перетвореннях та релаксацією напружень. Він може до 2-х і більше разів перевищувати номінальні напруження стиску та досягати границі плинності матеріалу.

3. Вперше встановлено, що при ДЗ вузлів типу «втулка-втулка» і «втулка-фланець» між внутрішньою поверхнею і серединою товщини втулки в стику, як і в вузлах «циліндр-циліндр» в центрі циліндра, є зона з мінімальними пластичними деформаціями поблизу точки, в якій дотичні напруження дорівнюють нулю, а еквівалентні мінімальні. Ця зона є несприятливою для деформаційної активації поверхонь і названа «зоною деформаційного застою» по аналогії із зоною, що утворюється при гарячому осадженні циліндрів між паралельними плитами. Розташування «зони деформаційного застою» залежить від співвідношення внутрішнього радіусу і висоти втулки до її товщини.

4. На базі встановлених закономірностей розподілу пластичних деформацій запропоновані показники, що визначають можливість формування якісних з'єднань за значеннями: коефіцієнта рівномірності розподілу пластичних деформацій уздовж стику K , величина якого може змінюватися від 1 (ідеальний варіант) до 0 (несприятливий варіант); відносної величини зони деформаційного застою x_0 , що змінюється від 0 (оптимальний варіант) до 1 (неприйнятний варіант); ступеня локалізації пластичних деформацій в зоні стику y_0 – змінюється від 1 (пластичні деформації утворюються по всій висоті) до нуля (пластичні деформації в середній частині стику відсутні), при цьому обидва крайні значення не є оптимальними і цей показник може використовуватися як додатковий до перших двох і повинен бути якомога меншим, але відмінним від нуля; граничного запасу міцності по залишковим напруженням - в оптимальному варіанті він повинен бути якомога більшим і в будь-якому випадку не меншим за одиницю.

5. Встановлено, що модифікування поверхонь низькоенергетичним високострумним електронним пучком забезпечує чистоту поверхонь зі значенням R_z не більше за 0,3 мкм, субмікросталічну структуру, яка на окремих ділянках близька до наноструктури, щільність дислокацій до $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, що утворює в поверхневому шарі напруження третього роду та підвищує енергію обробленого шару на 2...3 порядки.

6. Встановлено, що утворенню з'єднань електротехнічної та нержавіючої аустенітної сталей сприяють не тільки субмікросталічна структура та високий енергетичний рівень модифікованого шару, але і пластичні деформації, що

розвиваються в зоні стику внаслідок зміни ТКЛР та швидкості повзучості в інтервалі температур структурних перетворень в електротехнічній сталі. При з'єднанні дисперсійнотвердіючих жароміцних сплавів з модифікованою (загартованою) і немодифікованою (стан постачання або термічної обробки) поверхнями пластичні деформації також розвиваються внаслідок розчинення фаз, що зміцнюють.

7. Встановлено, що обробка низькоенергетичним високострумовим електронним пучком зі щільністю енергії до 20 Дж/см^2 і тривалістю імпульсу 50 і 100 мкс дозволяє проводити легування жароміцних сплавів елементами, які зменшують температуру плавлення сплавів, зокрема цирконієм, гафнієм, ніобієм. При цьому спостерігається достатньо однорідний розподіл елементу, що вводиться, по глибині шару, а зміна параметрів процесу обробки дозволяє регулювати товщину обробленого шару від 14 до 47 мкм і концентрацію цього елементу від 1,0...1,5% до концентрації, близької до евтектичної в системі основа сплаву – елемент, що вводиться, зокрема цирконію до 12,2 % мас.

Практичне значення роботи. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено способи ДЗ матеріалів з різними ФМВ при теплозмінах (термоциклуванні), інтенсифікації процесів ДЗ різнорідних матеріалів та жароміцних нікелевих сплавів з використанням термічних напружень, ефекту структурних перетворень і модифікацією поверхні з'єднання шляхом обробки НВЕП, та способи зменшення залишкових напружень в з'єднаннях різнорідних матеріалів.

Запропоновано рекомендації по конструюванню деталей і вузлів з різнорідних матеріалів. Оптимізовано конструкцію металокерамічних вузлів гермоводів, які за технічними характеристиками переважають імпорتنі аналоги, вартість виготовлення яких порівняно з імпортними в декілька разів менша. Налагоджено виробництво металокерамічних вузлів гермоводів для електронно-променевого зварювального обладнання НВП "Технобім". На замовлення ДП "ХАКБ" освоєно ДЗ багатостикових зварних корпусів електромагнітних клапанів для гідросистем літаків. Оптимізовано конструкцію та виготовлено ряд інших деталей і вузлів (іонно-плазмові катоди, металокерамічні та метало графітові вироби тощо).

За матеріалами дисертаційної роботи розроблено рекомендації по вдосконаленню устаткування для ДЗ промислових деталей та створено універсальну високовакуумну установку «УВВУ-КП», у якій передбачено можливість використання НВЕП для поверхневої обробки матеріалів.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі НУК і НТУУ.

Особистий внесок автора. В дисертаційній роботі особистий внесок автора полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи; постановці мети, визначенні завдань і самостійному виборі наукових підходів до їх вирішення, програми досліджень, розробленні фізичних моделей, адаптації моделей до умов ДЗ, визначенні показників оптимальності НД стану при ДЗ матеріалів з різними ФМВ, підготовці експериментів, аналізі і узагальненні результатів теоретичних і експериментальних досліджень, формулюванні закономірностей, рекомендацій і висновків.

Автор брав безпосередню участь у проведенні ряду експериментальних досліджень в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, НУК та Інституті високострумкової електроніки СВ РАН, а також приймав участь у розробленні і впровадженні технологій ДЗ корпусів електромагнітів, гермоводів, жароміцних сплавів, в створенні і модернізації установки УВВУ-КПІ, яку змонтовано в лабораторії зварювання НТУУ „КПІ”.

При підготовці публікацій за результатами досліджень внесок автора був визначальним.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на Міжнародних конференціях: «Сварка и родственные процессы - в XXI век» (м. Київ, 1998 р.), «Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства» (м. Миколаїв, 2003 р.), 5-тій Всеросійській з міжнародною участю конференції «Быстрозакалённые материалы и покрытия» (м. Москва, 2006 р.), International Conference on «Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings» (Томськ, 2008 р.), II і IV міжнародних конференціях «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (пос. Кацивелі, Україна, 2004 і 2008 р.), «Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие» (м. Київ, 2008 р.), 9-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків (м. Львів, 2009 р.).

Дисертаційна робота в цілому обговорювалась на наукових семінарах в НТУУ "КПІ", НУК, ІЕЗ ім. Є.О. Патона і отримала позитивну оцінку.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 52 роботи, зокрема, 32 статті в наукових журналах та збірниках наукових праць, 2 в міжнародних журналах, 8 в збірниках праць та матеріалів міжнародних конференцій, 7 в тезах міжнародних конференцій; отримано 3 Патенти.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації має 314 сторінок машинописного тексту, 260 рисунків, 13 таблиць, список літератури з 274 найменувань літературних джерел на 33 сторінках та додатків на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** проаналізовано існуючі гіпотези формування з'єднань при зварюванні тиском, зокрема, при ДЗ, вплив ФМВ, способів підготовки поверхонь, технологічних параметрів, геометричних характеристик вузлів на якість з'єднань, способи інтенсифікації процесу їх утворення, зокрема шляхом активної деформації, створення в стику дотичних напружень, застосування проміжних прошарків тощо, які розроблено і розвинуто в роботах М.Ф. Казакова, М.Х. Шоршорова, Е.С. Каракозова, Ю.Л. Красуліна, Г.К. Харченка, Л.І. Маркашової, Р.А. Мусіна, Г.В. Конюшкова,

Д.І. Котельникова, В.В. Пешкова, О.О. Барабанової, А.В. Люшинського, Л.С. Кирєєва, Д.С. Дюваля та інших.

Різними авторами запропоновані різні схеми ДЗ, які дозволяють в конкретних випадках підвищити якість отриманих з'єднань, але їх точки зору на вплив різних параметрів режиму з'єднання багато в чому не співпадають. Але загально визначеними є уявлення про умовно виділені три стадії процесу, на кожній з яких важливу роль відіграють ТД процеси. Розглянуто особливості процесів зварювання в твердому стані, існуючих технологій ДЗ, пластичних деформацій та моделювання НД стану. Відзначено обмежену кількість робіт в яких, досліджено особливості формування НД стану при ДЗ різнорідних матеріалів з урахуванням пластичних деформацій при напруженнях, більших за границю плинності одного з матеріалів, або деформацій повзучості. В літературі також мало досліджено вплив пластичних деформацій на процес ДЗ та формування власних напружень при з'єднанні матеріалів з різними ФМВ.

Відсутність в літературі комплексних досліджень щодо формування НД стану при ДЗ і залишкових напружень у з'єднанні різнорідних матеріалів залежно від їх структурного стану, ФМВ, технологічних параметрів режимів, геометрії вузлів в умовах пружного і пластичного деформування, впливу НД стану і модифікуванням поверхонь на формування з'єднань, що визначають шляхи вдосконалення технологій ДЗ, та проектування деталей і вузлів, визначили мету та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено досліджені матеріали різних класів, технологічне устаткування, апаратуру і застосовані методики, як стандартні, так і оригінальні, розроблені при безпосередній участі автора.

Для досліджень вибирали матеріали, що в різнорідному поєднанні в зоні з'єднання не утворюють прошарків інтерметалідів, а для формування однорідних з'єднань обирали сплави, які можуть знаходитись у різному структурному стані, і в процесі зварювання переходять в близький структурний стан, що супроводжується зміною об'єму. Досліджували сталі типу 10895, 12X18H10T, жароміцні нікелеві сплави типу ЧС88У-ВИ, Alloy 718 тощо.

Дифузійне зварювання виконували у вакуумі $10^{-2} \dots 10^{-5}$ на установках УДСВ-ДТ, ВВУ-1Д, модернізованих при безпосередній участі автора і у вакуумній печі СНВ-1.3,1/20И1. Модернізовані установки оснащено системою автоматичної підтримки заданої температури, а також високоточними датчиками переміщень і навантажень.

ВВУ-1Д має пристрій для іонно-плазмового напилення, а також вводи для різних джерел нагрівання: високочастотного, радіаційного і електророзрядного. Робоча камера має систему нагрівання в період дегазації і охолодження в період зварювання або паяння.

Для модифікування і легування поверхонь сталей і сплавів використана вакуумна імпульсна електронно-пучкова установка «SOLO» Інституту сильнотрумової електроніки СВ РАН, що забезпечує надшвидкий нагрів поверхні матеріалів електронним пучком діаметром 10...30 мм при силі струму 20...200 А. Тривалість імпульсу 30...100 мкс, частота імпульсів $1 \dots 5 \text{ с}^{-1}$, енергія електронів 15 кєВ.

У другому розділі також описано методи фізико-хімічних досліджень і механічних випробувань. Було використано оптичну металографію, растрову та просвічуючи

електронну мікроскопії. Дослідження хімічного складу та ідентифікацію виділених фаз проводили методами рентгенівського мікроспектрального і рентгеноструктурного аналізів та мікродифракції.

Мікротвердість металу визначили на приладах фірми „Леко”, ПМТ-3 та HVS-1000. похибка вимірювань не перевищувала $\pm 10\%$. Механічні властивості з'єднань при кімнатній та високій температурі визначали за стандартними методиками не менш ніж на 3-х зразках. Випробування моделей і натурних виробів проводили на підприємствах: ДП „ХАКБ”, ДП НВКГ „Зоря”-„Машпроект”, НПП „Технобім”, а також в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ІВЕ СВ РАН.

Дилатометричні дослідження і визначення високотемпературних ФМВ, включаючи параметри повзучості, проводили, в основному, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона на дослідному комплексі Gleeble 3800.

У зв'язку з відсутністю в літературі повної інформації, щодо ФМВ матеріалів, необхідної для моделювання НД стану зварних вузлі, в розд.2 наведено результати дилатометричних досліджень на сучасному комплексі Gleeble 3800 сплавів ЧС88У-ВИ, ЧС104ВИ після повної стандартної термічної обробки та після аустенізації та гартування у воді при різних швидкостях нагрівання і охолодження та сталі 10895, а також визначено границі плинності і параметри повзучості цієї сталі при температурах зварюванні. Дилатограми термообробленого сплаву ЧС88У-ВИ наведено на рис.1, а динамічні ТКЛР при 850...1150 °С – на рис. 2. Дослідження показали значний вплив структурних перетворень в досліджених матеріалах на їх властивості та дозволили визначити оптимальний температурний інтервал термоцикування при ДЗ.

Установлено, що ТКЛР дисперсійнотвердіючих нікелевих сплавів після гартування від температури аустенізації та після повної термічної обробки внаслідок структурних деформацій суттєво відрізняються. Найбільша відмінність ТКЛР спостерігається при температурі розчинення зміцнюючих фаз, що відбувається зі збільшенням об'єму сплаву. Дилатометричні криві після сповільненого охолодження відливки і після повної термічної обробки більш близькі.

У третьому розділі виконано аналіз НД стану у межах пружної стадії роботи матеріалу. Для аналізу використовували комп'ютерне моделювання на базі методу скінчених елементів із застосуванням програмного комплексу ANSYS, 10-ї версії.

Досліджували вузли, які найчастіше зустрічаються при ДЗ: втулка-втулка (В-В), циліндр-циліндр (Ц-Ц) і втулка-фланець (В-Ф). Останні два вузли можна розглядати як окремі випадки першого. У вузлі Ц-Ц внутрішній діаметр дорівнює нулю, а зовнішні діаметри верхньої і нижньої деталей вузла В-Ф відрізняються.

Аналіз властивостей матеріалів, що використані при ДЗ, показує, що вони можуть істотно відрізнятися за модулем пружності і ТКЛР. Наприклад, при з'єднанні між собою металів їх модулі пружності можуть змінюватися в межах $(1...2) \cdot 10^5$ МПа. Модулі пружності металів і кераміки близькі, а модуль пружності графіту може бути на порядок нижчий, ніж металу. ТКЛР при з'єднанні матеріалів при моделюванні напруженого стану можуть бути прийнятні такими, що відрізняються на $10 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Виходячи з цих міркувань вибрані варіанти досліджуваних моделей. Вузли навантажували тиском стиснення (мод. 1),

теплозінами (мод. 2) і сумісним стисненням з теплозінами для матеріалів з однаковою (мод. 3) та, що відрізняється (мод. 4) жорсткістю.

Аналіз результатів досліджень показав, що в умовах ДЗ різнорідних матеріалів в зварному вузлі при всіх варіантах навантаження створюється складний об'ємний напружений стан, в якому як величина окремих напружень, так і характер напруженого стану характеризуються помітною нерівномірністю розподілу по перерізу вузла і, особливо, вздовж площини стику. При цьому як рівень напружень, так і характер напруженого стану залежить від багатьох чинників, головними з яких є властивості матеріалів при температурах зварювання (жорсткість, ТКЛР), параметри режиму зварювання (температура, тиск), а також форма і розміри вузла.

Особливістю НД стану при постійній температурі ДЗ матеріалів різної жорсткості, є зменшення еквівалентних напружень в менш жорсткому матеріалі в зоні стику і зростання до максимальних значень поза його зоною. В літературі такий ефект відомий як зміцнення менш міцного матеріалу в контакт з більш міцним. У даному випадку це пояснюється формуванням у менш жорсткому матеріалі біля стику напруженого стану, близького до всебічного стиску, про що свідчить розподіл головних напружень. При такому НС рівень еквівалентних напружень, а також деформацій зменшуються.

Значно сприятливіший напружений стан створюється при навантаженні теплозінами вузлів з'єднань матеріалів з різними ТКЛР. Основна його особливість – високий ступінь локалізації напружень і деформацій саме в зоні стику. Напружений стан в цьому випадку близький до плоского стиснення в одному матеріалі і плоского розтягу в іншому. При цьому на відміну від навантаження стисненням, прийнятого в класичній схемі ДЗ, з'являються значні дотичні напруження з максимумом в площині стику. При навантаженні теплозінами це призводить до утворення локальних деформацій саме в безпосередній близькості від площини стику, тобто навантаження виконує свою основну функцію. У міру віддалення від стику рівень напружень і деформацій швидко зменшується. Такий НД стан практично не викликає загальних деформацій вузла.

Одночасне навантаження тиском і теплозінами змінює характер НД стану поблизу стику - він стає об'ємним: відбувається розтягнення в двох і стиснення в третьому напрямках в одному матеріалі і всебічне стиснення в іншому. Цей НД стан матеріалів формується по чергово, то в одному матеріалі то в іншому, при зміні нагрівання охолодженням. В результаті сприятливий НД стан створюється по черзі то в одному, то в іншому матеріалі, що створює більш сприятливі умови для формування з'єднання, ніж навантаження теплозінами без тиску.

Однією з важливих характерних особливостей НД стану при навантаженні теплозінами є його неоднорідність вздовж стику. Є точка в стику, де дотичні напруження дорівнюють нулю. У цій точці і зоні поблизу неї еквівалентні напруження, а відповідно і деформації, мінімальні (рис. 2). Ця точка, названа, по аналогії з теорією обробки металів тиском, „точкою деформаційного застою”, в циліндрі розташовується в центрі стику, а у втулці – між внутрішньою її поверхнею і серединою товщини. У міру віддалення від точки застою дотичні напруження майже лінійно зростають.

Виключенням з цього правила є термічне навантаження у вільному (не закріпленому) стані втулок з малим співвідношенням висоти до товщини, типу плоских дисків. Максимальні еквівалентні напруження зосереджені на периферії стику, поблизу зовнішньої і внутрішньої поверхонь, найменші – в його внутрішній частині, особливо в „точці деформаційного застою” (рис. 3). Вздовж більшої частини стику характер НД стану близький до плоского деформованого.

Величина всіх напружень залежить від розміру інтервалу зміни температури (ΔT), різниці ТКЛР (Δb), модулів пружності матеріалів (E), що з'єднуються, і коефіцієнтів Пуассона (μ). За умови пружного навантаження вузлів з матеріалів з однаковою (або близькою) жорсткістю для наближеної оцінки рівня напружень можна використовувати формули:

$$u_{x \max} \cong u_{z \max} \cong \pm \Delta b \cdot \Delta T \cdot E / 2(1 - \mu) \text{ и } \phi_{xy \max} \cong 0,65 u_{x \max}.$$

Їх характер (знаки) в матеріалі з меншим ТКЛР при нагріванні – розтяг (плюс), при охолодженні – стиск (мінус). У матеріалі з більшим ТКЛР знаки змінюються на зворотні.

Встановлені закономірності залишаються чинними при всіх співвідношеннях модулів пружності і ТКЛР матеріалів, що з'єднуються, але рівень напружень, природно, змінюється.

При одночасному навантаженні стиском та теплозмінами дотичні напруження при зменшенні жорсткості одного з матеріалів збільшуються або зменшуються, залежно від напрямку зміни температури і співвідношення модулів пружності та ТКЛР матеріалів, що з'єднуються. Наприклад, якщо матеріал з меншим ТКЛР має і меншу жорсткість, то при нагріванні дотичні напруження – зменшуються, а при охолодженні збільшуються.

У вузлах з різними зовнішніми діаметрами деталей (типу «втулка-фланець»), наявність точки концентрації на зовнішній поверхні стику збільшує ступінь нерівномірності розподілу напружень в стіку, зменшуючи їх рівень біля внутрішньої частини і збільшуючи в точці концентрації.

Віддалення вільної бічної поверхні фланця від стику утруднює деформування матеріалу фланця в зоні стику, зміщує характер НД стану у напрямку всебічного стиснення і зменшує еквівалентні напруження при всіх варіантах навантаження. Для компенсації цього чинника необхідно збільшувати параметри навантаження (тиск і ступінь зміни температури), що може призвести до збільшення загальних деформацій вузла при зварюванні. Отже, при конструюванні заготовок під зварювання такі вузли бажано, по можливості, не застосовувати.

У четвертому розділі досліджено вплив пластичних деформацій (ПД) на НД стан циліндричних вузлів.

Дослідження показали, що поява ПД, як миттєвих, так і повзучості, хоч би в одному з матеріалів не змінюючи істотно характер полів напружень, зменшує їх максимальну величину.

При традиційній схемі ДЗ при постійній температурі підтверджено ефект зміцнення, відзначений в умовах дії пружних деформацій матеріалів різної жорсткості.

В результаті пластичні деформації розвиваються поза зоною стику, що призводить до підвищення загальних деформацій вузлів.

Навантаження теплозмінами з'єднань матеріалів, які мають різні ТКЛР, створює ідеальні умови для локалізації с ПД саме в зоні стику (рис. 4,б). ПД розвиваються переважно в осьовому напрямку, тобто, перпендикулярному стику (рис. 4,а). Залежно від знаку зміни температури осьові ПД. подовження і скорочення по черзі переходять з одного матеріалу в іншій. При нагріванні осьові деформації подовження розвиваються в матеріалі з більшим ТКЛР, при охолодженні – з меншим.

У радіальному і окружному напрямках ПД мають меншу величину і протилежний осьовим деформаціям знак (рис. 4,а). Нерівномірність їх розподілу по стику, характерна для навантаження тиском, зберігається і при навантаженні теплозмінами, але основні компоненти деформації розподілені більш рівномірно.

Точка з мінімальними ПД співпадає з „точкою деформаційного застою”.

Одночасне навантаження тиском і теплозмінами при з'єднанні матеріалів з близькими границями плинності і різними ТКЛР також забезпечує локалізацію ПД саме в зоні стику, але вони розвиваються по одну сторону від стику – в матеріалі з меншим ТКЛР при нагріванні і з більшим – при охолодженні.

Порівняння епюр ПД для різних моделей вузлів показує, що всі закономірності для вузлів типу Ц-Ц і В-В однакові. Відмінність полягає лише в тому, що точка мінімальних деформацій на осі вузла Ц-Ц переміщається у вузлі В-Ф в точку, яка знаходиться на відстані близько 0,23 товщини втулки від її внутрішньої поверхні.

Характер НД стану і величина напружень в циліндричних вузлах не залежать від масштабного чинника, тобто вони не змінюються при зміні конкретних розмірів радіусів (внутрішнього r і зовнішнього R), товщини ($b = R - r$) і висот (h), якщо зберігаються постійними співвідношення основних розмірів. Зміна цього співвідношення може дещо змінити характер НД стану і величину окремих складових напружень. При цьому визначальними є: відносний радіус, тобто співвідношення внутрішнього радіусу до товщини (r/b) і відносна висота (h/b) втулки.

Розподіл напружень і деформацій вздовж стику змінюється зі зміною внутрішнього радіусу r . В результаті, якщо при r (r/b) = 0 (вузол типу Ц-Ц) рівень еквівалентних напружень від центру стику до його зовнішньої поверхні збільшується, а „точка деформаційного застою” знаходиться в центрі, то при появі внутрішньої поверхні навіть невеликого радіусу r напруження поблизу неї зростають, точка деформаційного застою зміщується всередину стику. При подальшому збільшенні внутрішнього радіусу точка деформаційного застою все більше віддаляється від внутрішньої поверхні і наближається до середини стику (середини товщини). Її зсув тим більше помітний, чим менше відносна висота. У вузлах типу кілець з великим внутрішнім радіусом і диску з малою відносною висотою, „точка деформаційного застою” знаходиться практично в центрі стику.

Особливості НД стану вузлів типу В-Ф, відмічені в пружному рішенні, зберігаються і при появі пластичних деформацій. Останні зосереджені в основному в матеріалі втулки. Їх поява, природно, знижує пік напружень в точці концентрації і

загальний рівень напружень поблизу стику. Ступінь нерівномірності розподілу ПД вздовж стику зростає.

Аналіз результатів моделювання з урахуванням деформацій повзучості, які розвиваються в часі, показав, що весь період витримки під постійним тиском стиснення з погляду формування і зміни напруженого стану можна розбити на два: період формування НД стану, протягом якого характер його змінюється, і період стабілізації, тобто незмінного НД стану. Протягом першого періоду змінюється співвідношення окремих складових напружень, відповідно змінюється швидкість повзучості.

Тривалість цього періоду, при стиску і температурах, характерних для ДЗ, не перевищує 1,5 - 2-х хвилин. У другому періоді співвідношення складових залишається незмінним, еквівалентні напруження і швидкість повзучості залишаються постійними. Підтримувати постійним тиск стиснення в другому періоді недоцільно, оскільки швидкість повзучості матеріалу в зоні стику, в цей період значно нижча, ніж на відстані від нього, що неминуче призведе до підвищених загальних деформацій зварного вузла.

При навантаженні теплостіями формування полів напружень і деформацій визначається трьома різними процесами. Перший процес пов'язаний з температурними деформаціями, коли напруження і деформації зростають за рахунок різного температурного скорочення або розширення матеріалів, що з'єднуються. Визначальними чинниками тут є відмінність ТКЛР матеріалів, що з'єднуються, і ступінь зміни температури. Другий процес пов'язаний з деформаціями повзучості, точніше з різним ступенем деформації матеріалів, що з'єднуються, які мають різний опір повзучості. Тут визначальною є відмінність термостійкості матеріалів з одного та іншого боків стику. Третій процес пов'язаний з релаксацією напружень, внаслідок чого рівень напружень зменшується, а деформації зростають. У цьому процесі визначальним є час і здатність матеріалів чинити опір релаксації. На етапі витримки при постійній температурі перший чинник відсутній, зміна напруженого стану відбувається тільки внаслідок повзучості матеріалу по одну сторону від межі розділу (утворення напружень і деформацій) і релаксації напружень (зменшення напружень).

При термоцикуванні (постійній зміні температури) вже після закінчення першого циклу охолодження (0 – 120 с) – нагрівання (120 – 240 с) у вузлі утворюється складне поле напружень. При подальших циклах картина повторюється і в кінці кожного циклу навантаження характер НД стану залишається практично незмінним, хоча рівень напружень дещо зростає. На деякій відстані від внутрішньої поверхні втулки є чітко виражені точка з нульовими дотичними напруженнями („точка деформаційного застою”) і зона з мінімальними еквівалентними деформаціями повзучості (рис. 5).

При одночасному навантаженні стиком і термоцикуванням (охолодження-нагрівання) також створюється складний НД стан, який в подальших циклах повторюється. Характер зміни напружень і деформацій в часі в усіх точках і в усіх циклах навантаження практично однаковий, але зростає їх рівень.

Таке навантаження є доцільним лише при короткочасному прикладанні тиску стиснення, коли деформації миттєвої пластичності розподілені вздовж стику майже рівномірно, що забезпечує утворення фізичного контакту між матеріалами, що з'єднуються, вздовж всього стику. При тривалій витримці під тиском деформації повзучості розвиваються більшою мірою на периферії стику (поблизу зовнішньої поверхні втулки) і далеко від стику, сприяючи значній деформації всієї деталі в цілому. З урахуванням цього чинника на стадії витримки доцільно поступово зменшувати зусилля стиснення.

При всіх варіантах навантаження епюри розподілу ПД у всіх типах циліндричних вузлів мають одні і ті самі особливості: наявність максимумів поблизу циліндричних поверхонь і мінімуму всередині стику. При цьому максимум ПД у зовнішньої поверхні більше, ніж у внутрішньої. Природно, в циліндричних вузлах, що не мають внутрішньої поверхні, максимум ПД знаходиться лише поблизу зовнішньої поверхні.

Характер розподілу ПД в обох матеріалах, що з'єднуються, залежить від ТКЛР і межі текучості матеріалів, що з'єднуються, конструктивних особливостей вузла, а також характеру зміни температури (нагрівання або охолодження).

Для зручності кількісної оцінки оптимальності різних варіантів технології ДЗ і конструкції вузлів з різномірних матеріалів запропоновані деякі кількісні показники оптимізації:

1) Коефіцієнт рівномірності розподілу ПД вздовж стику – K . Таким показником може бути співвідношення ПД в середній частині стику e_m (посередині товщини втулки або посередині радіусу циліндра) до середніх деформацій по довжині стику. Вочевидь, значення цього показника може змінюватися від 1 (ідеальний варіант) до 0 (малоприйнятний варіант).

2) Відносна величина „зони деформаційного застою” x_0 – співвідношення величини зони з ПД, що дорівнюють нулю b_0 до величини стику b (товщині втулки або радіусу циліндра). Цей показник може змінюватися від 0 (оптимальний варіант) до 1 (неприйнятний варіант).

3) Ступінь локалізації ПД в зоні стику y_0 – співвідношення протяжності зони ПД в середній частині поперек стику (посередині товщини втулки або радіусу циліндра) до висоти втулки (циліндра). Цей показник може змінюватися від 1 (ПД утворюються по всій висоті) до 0 (ПД в середній частині відсутні). Обидва крайні значення не є оптимальними. Цей показник можна використовувати як додатковий до перших двох і його значення повинно бути по можливості меншим, але відмінним від нуля.

Аналіз результатів оцінки різних варіантів з застосуванням запропонованих умов показав, що вони в цілому співпадають з висновками, що зроблені в процесі роботи. Запропоновані кількісні умови можуть використовуватися при оцінюванні придатності того або іншого варіанту конструкції заготовки і навантаження для циліндричних вузлів різних типів.

У 4 розділі проведено верифікацію результатів моделювання шляхом їх співставлення з результатами ДЗ реальних деталей. На рис. 6 показано заготовку корпусу електромагніта, яка складається з трьох деталей (1, 3, 5) зі сталі 12Х18Н10Т і

двох деталей (2, 4) із сталі 10895, та зварюється при термоцикуванні 1000-700-1000 °С з накладанням 3-х циклів. В процесі зварювання переміщення верхньої точки кожної заготовки відносно нижньої записують для контролю за величиною деформацій та порівнюють з результатами розрахунку. Розрахункові та експериментальні переміщення добре узгоджуються. Співпадають також за величиною і характером деформації металів біля кожного стику (рис. 7).

Локалізацію пластичних деформацій біля стику підтверджує мікроструктура та смугастий характер тонкої структури по обидві сторони від стику. У вузькій смугі сталі 12X18H10T спостерігаються високодисперсні зародки рекристалізації, що не встигли розвинути в умовах експерименту. Позитивний вплив термоцикування підтверджено механічними випробуваннями з'єднань, при яких руйнування всіх зразків проходило по сталі 10895 з границею міцності (363...398)/383 МПа (у знаменнику середнє значення). Мікроструктура та характер деформування в зоні стику свідчать про відсутність в зоні з'єднання будь яких дефектів або крихких фаз. Метал має волокнисту будову.

Для оцінки ефективності керування НД станом проведено ДЗ жароміцних сплав ЧС 88У, ЕП 609 та ЕИ 602. Перші два сплави є дисперсійотвердуючими, сплав ЕИ 602 – аустенітним. Сплави зварювали між собою у різних комбінаціях, у тому числі сплав ЧС 88У в стані повної термообробки та після аустенізації з наступним гартуванням у воді. Для останнього випадку моделювали НД стан, визначали поля і епюри ПД при нагріванні від 500 до 1150 °С. Оскільки зварювали циліндричні зразки то моделювання проводили для вузла Ц-Ц при дії зовнішнього осьового тиску 15 МПа, загартована деталь була нижньою.

Дослідження показали, що при нагріванні до температури 1050 °С ПД практично відсутні. При 1050 °С починається процес розчинення зміцнюючої фази термообробленого зразка, що супроводжується утворенням радіальних u_x та осьових u_y напружень, які є напруженнями стику у верхній деталі та розтягу в нижній. Сумісно з напруженнями стиснення від зовнішніх навантажень вони призводять до зменшення еквівалентних напружень у верхній деталі і збільшення в нижній. В результаті вже при 1075 °С еквівалентні ПД подовження у нижній деталі зростають від 0,02 до 0,05 %. При подальшому підвищенні температури до 1150 °С продовжується зростання ПД. Деформації зсуву майже лінійно збільшуються від нуля в „точці деформаційного застою” в центрі зразка до максимальних біля зовнішньої поверхні.

Враховуючи отриманні результати, надалі для дослідження структури і механічних властивостей з'єднань термоцикування проводили в температурному інтервалі 850-1150-850 °С при зовнішньому тиску 15 МПа. Для порівняння на рис. 8,*а* показано мікроструктуру з'єднання сплаву ЕП 99 після ДЗ у однаковому структурному стані (стан постачання) при постійній температурі 1175 °С і тиску 25 МПа, як рекомендовано в довідниковій літературі. Мікроструктуру зварних з'єднань сплавів у різному структурному стані показано на рис. 8,*б,в*. Співставлення мікроструктур показує, що при традиційній схемі ДЗ в зоні стику формується міжкристалічний міжатомний зв'язок (границі зерен орієнтовані по площині стику), а при ДЗ за розробленою технологією

встановлюється внутрішньокристалітний міжатомний зв'язок (утворюються спільні зерна в зоні стику).

Таким чином, виконані дослідження підтверджують як адекватність результатів моделювання, так і ефективність керування НД станом при ДЗ.

У п'ятому розділі досліджено вплив модифікування і легування поверхні досліджених сталей і сплавів на топографію поверхні, структуру і властивості поверхневого шару, та їх вплив на формування з'єднань. На першому етапі визначено параметри електронного пучка, які забезпечують рівномірне оплавлення металів з утворенням гладенької поверхні після попереднього електроіскрового різання (20...25 Дж/см²). Для модифікованого шару досліджених сталей 10895, 12Х18Н10Т і сплаву ЧС88У-ВИ характерне значне подрібнення зерна і підвищення щільності дислокацій у модифікованому шарі до $(2...5) \cdot 10^{11}$ см⁻². Наприклад на рис. 9 показано структуру сталі 10895.

Аналогічну будову має модифікований шар сталі 12Х18Н10Т. Мікротвердість модифікованого шару сталі 10895 зростає на 74%, сталі 12Х18Н10Т – на 12 %, а сплаву ЧС88У-ВИ – зменшується на 20 %. Зменшення мікротвердості поверхневого шару сплаву ЧС88У-ВИ, ймовірно, пов'язане з розчиненням зміцнюючих фаз, тобто внаслідок ефекту гартування з рідкого стану. Субзеренна структура досліджених металів в модифікованому шарі має розміри зерен 2...7 мкм. Разом з тим, спостерігається фрагментація зерен до розмірів 0,3...0,5 мкм. У модифікованому шарі сплаву ЧС88У-ВИ найбільша щільність дислокацій спостерігається біля границь γ' -фази.

Для всіх трьох досліджених металів у модифікованому шарі спостерігаються нерівноважний стан, дисипативні і субкристалічні структури. При щільності енергії пучка 25 Дж/см², тривалості імпульсів 100 мкс і 5 імпульсах глибина оплавленого шару дорівнює 17...22 мкм. Підвищена мікротвердість сталі 10895 спостерігається на глибині до 170 мкм.

Для відливок жароміцного сплаву характерне зерно великих розмірів з субструктурою та високодисперсними фазовими включеннями розміром 0,15...0,25 мкм, розподіл та морфологія яких аналогічні γ' -фазі. Для попередження мікротріщин модифікація жароміцного сплаву повинна проводитись при щільності енергії пучка не більше 20 Дж/см².

Вплив способу підготовки поверхні на формування з'єднань при ДЗ досліджували шляхом модифікування обох поверхонь або однієї з них. При зварюванні сталей 12Х18Н10Т з полірованою поверхнею та 10895 з модифікованою мікротвердість сталі 10895 в зоні стику зменшилась порівняно з модифікованим шаром до 1170...1280 МПа, а сталі 12Х18Н10Т зросла в середньому на 35 % порівняно з основним металом (до 2340...2580 МПа). Зі сторони сталі 12Х18Н10Т формується паралельно стику тонка смуга зародків рекристелізації нанорозмірів. Спостерігаються також вузькі стрічки пластичної деформації (шириною до 1 мкм), які мають складну внутрішню структуру. Вони обумовлені високодисперсною фрагментацією смуги, про що свідчить наявність чорно-білого контрасту. У деяких смугах виявлено високу щільність дислокацій. Така

структура свідчить про високий ступінь локалізації (до 1 мкм) пластичної деформації в сталі 12X18H10T з полірованою поверхнею. Зі сторони сталі 10895 з модифікованою поверхнею біля стику проходить рекристалізація, величина зерна зростає до 150...175 мкм, а щільність дислокацій і мікротвердість зменшуються, що свідчить про розвиток рекристалізаційних процесів.

Співставлення результатів показало, що найбільш активно взаємодіють обидві модифіковані поверхні сталей 10895 і 12X18H10T, що мають високий рівень напружень 3-го роду (до 3500...3700 МПа).

Установлено, що об'ємна доля спільних зерен у стику при обох модифікованих поверхнях, навіть без урахування високодисперсних зерен, майже на порядок більша порівняно з модифікуванням тільки поверхні сталі 12X18H10T і майже в 3 рази більша, ніж при модифікуванні поверхні сталі 10896, енергія дефектів кристалічної будови якої значно більша ніж сталі 12X18H10T. При з'єднанні обох модифікованих поверхонь біля стику в сталі 12X18H10T формується смуга зародків рекристалізації шириною до 20...30 мкм. Діаметр зародків дорівнює 2,5...5,0 мкм. Біля стику спостерігаються сліди релаксації – субзеренна структура з чіткими границями і значно зменшеною щільністю дислокацій. Структура обох сталей біля стику близька до рівноважної. Вона є клубково-комірчатою. Лінія стику тонка і виявляється важко. Модифікування обох поверхонь забезпечує утворення монолітного зварного з'єднання. Дослідження тонкої структури показало, що світлова мікроскопія не виявляє дисперсних зародків рекристалізації, яких у зоні стику незліченна кількість. Мікроструктуру з'єднання показано на рис. 10.

При ДЗ сплаву ЧС88У-ВИ найбільша об'ємна доля рекристалізованих зерен (45 %) спостерігається при з'єднанні модифікованої та немодифікованої поверхонь. Це пояснюється тим, що ТКЛР сплаву після гартування, яке сплав отримує після обробки НВЕП і після повільного охолодження відливок суттєво відрізняються внаслідок структурних перетворень, які супроводжуються структурними деформаціями. Таким чином ПД в зоні стику є додатковим фактором, який сприяє активації поверхні. Мікроструктуру зварного з'єднання показано на рис.11.

У роботі розглянуто два напрямки модифікування поверхонь сплавів: безпосередньою дією НВЕП і легуванням поверхні шляхом переплавлення попередньо нанесеного на поверхню легуючого елементу. Поверхні легували елементами, які знижують температуру плавлення поверхневого шару, зокрема цирконієм, гафнієм, ніобієм. Ці елементи не викликають різкого негативного впливу на властивості сплавів. При вмісті гафнію до 4,0, ніобію до 3,0, цирконію до 2,5 % (мас.) довговічність сплаву ЧС 70 ВИ при 900 eC і напруженні 250 МПа зберігається не нижче 100 годин.

Попередньо визначали параметри режиму обробки. Перед обробкою НВЕП на поверхні сплавів ЧС 88У-ВИ наносили іонно-плазмовим методом цирконій або гафній. На сплав Inconel 718 наносили ніобій. Як модельний використовували також титан. Досліджували товщини шару 1...3 мкм.

Після електронно-пучкової обробки (ЕПО) визначали концентрацію елементів на поверхні легованого шару, а на косих шліфах – розподіл елементів по товщині.

За результатами формування поверхні легованого шару і концентрацією легуючих елементів на його поверхні вибрано товщину шару 1 мкм. При щільності енергії пучка 15...20 Дж/см² формується гладенька дзеркальна поверхня. При більшій щільності енергії на поверхні сплаву ЧС 88У-ВИ утворюються мікротріщини. На сплаві Inconel 718 мікротріщини не виявлені при будь-якій дослідженій щільності енергії (до 50 Дж/см²).

Температура автономного плавлення поверхневого шару не перевищувала 1180...1200 °С, а кількості розплаву було достатньо навіть для паяння з капілярним зазором та утворення галтелі.

Досить рівномірний розподіл елементів по товщині легованого шару забезпечується при п'яти імпульсах. Зміна параметрів процесу обробки поверхні і товщини нанесеного шару легуючого елементу дозволяє регулювати товщину легованого поверхневого шару від 14 до 47 мкм і змінювати концентрацію цього елементу від 1,0...1,5 % до концентрації, близької до евтектичної в системі основа сплаву – легуючий елемент, який вводиться. Наприклад, при напиленні на сплав ЧС 88У-ВИ шару цирконію товщиною 1 мкм його концентрацію в легованому шарі змінювали від 6,6 до 11,2 %. Концентрація інших елементів складала (% мас.): 14,44...15,06 Cr; 9,3...10,64 Co; 1,45...1,6 Mo; 2,15...4,63 W; 1,48...2,57 Al; 2,36...3,8 Ti; нікель – решта. При легуванні поверхні сплаву Inconel 718 ніобієм концентрація елементів складала: 14,34...15,3 Fe; 14,8...15,3 Nb; 15,2...16,7 Cr; 1,09 Ti; нікель – решта.

У роботі досліджували ДЗ сплавів при легуванні однієї або обох поверхонь. Враховуючи сприятливий вплив термоцикування на формування з'єднань, температуру зварювання змінювали від 850 до 1180 °С (три цикли) під тиском 15; 10; 5 Па. Визначено, що зміна тиску на структуру і властивості з'єднань впливала не суттєво. Лінія стику практично не виявляється. Підвищену концентрацію легуючого елементу можна знайти лише локальним рентгеноспектральним мікроаналізом. У стику формуються спільні зерна. При легуванні однієї поверхні, яка з'єднується зі сплавом, що мав сповільнене охолодження відливки, чітко виявляються подрібнення структури легованого шару і видовжені зерна вздовж стику, що свідчить про пластичну деформацію сплаву в зоні з'єднання. Такі зерна відсутні при зварюванні в тих же умовах двох полірованих поверхонь в однаковому структурному стані сплаву.

Аналогічні результати отримано при ДЗ сплаву Inconel 718. Механічні властивості з'єднань задовольняють технічні вимоги і знаходяться на рівні не нижче 90 % характеристик основного металу (при 550 °С границя міцності більша 900 МПа, а довговічність при 785 МПа більше 50 годин, а, зазвичай, більше 100 годин і до руйнування зразки не доводились). ДЗ сплаву ЧС 88У-ВИ з легованими цирконієм або гафнієм поверхнями також забезпечує границю міцності при 900 °С не нижче 90 % рівня основного металу.

Вперше показано, що обробка НВЕП дозволяє проводити легування поверхні сплавів елементами, що знижують температуру плавлення сплаву. Це сприяє утворенню з'єднань з формуванням спільних зерен у зоні стику (рис. 11).

У шостому розділі проаналізовано формування залишкових напружень та деформацій при дифузійному зварюванні. Показано, що при ДЗ різнорідних матеріалів однією з важливих проблем є утворення залишкових деформацій і напружень, які у вузлах з пластичних матеріалів зазвичай призводять до спотворення форми і зміни розмірів, а при з'єднанні крихких матеріалів часто викликають утворення тріщин і руйнування з'єднань. Останнє обумовлено дією осьових напружень, які досягають максимальних значень на зовнішній або внутрішній поверхні втулки (у циліндрі – на зовнішній поверхні) поблизу площини стику. НД стан біля поверхонь близький до плосконапруженого, осьові напруження близькі за величиною і зворотні за знаком окружним, а радіальні і дотичні близькі до нуля. Тому величина осьових напружень для вузлів з матеріалів з однаковою (або близькою) жорсткістю, що залежить від різниці ТКЛР (Δb), інтервалу зміни температури (ΔT), модуля пружності матеріалів (E) і коефіцієнта Пуассона (μ), орієнтовно може бути знайдена за формулою:

$$y_{y \max} \cong \pm \Delta b \cdot \Delta T \cdot E(1+\mu)/2.$$

Осьові напруження – в матеріалі з меншим ТКЛР при охолодженні і з більшим ТКЛР при нагріванні розтягуючі, що обумовлено формою вигину утворюючої поблизу стику. При однаковій жорсткості матеріалів, що з'єднуються, криві вигину утворюючих кососиметричні щодо лінії стику.

У з'єднаннях вузлів з матеріалів з модулями пружності, що істотно відрізняються, форма вигину утворюючих змінюється, відповідно змінюються рівень максимальних напружень і точка їх розташування на поверхні. На зовнішній поверхні в матеріалі з меншою жорсткістю кривизна змінюється мало, але вона розповсюджується на велику довжину, зниження жорсткості в цьому матеріалі зменшує рівень осьових напружень, точка їх максимуму дещо віддаляється від площини стику (рис. 13,а). У матеріалі з більшою жорсткістю зона кривизни утворюючої навпаки зменшується, її рівень поблизу стику зростає, що призводить до збільшення рівня максимальних осьових напружень, точка цього максимуму наближається до площини стику.

Характер викривлення внутрішньої поверхні втулки при охолодженні більш складний, що обумовлено зустрічним впливом двох чинників: різним зменшенням товщини і середнього радіусу втулки з боку одного та іншого матеріалів за рахунок різниці їх ТКЛР. В результаті рівень максимальних осьових напружень в цьому випадку інший, але із зменшенням співвідношення жорсткостей він теж зменшується, але не так інтенсивно, ніж на зовнішній поверхні (рис. 13,б). Тому, якщо при $E_2/E_1=1$ максимальні напруження розтягу на зовнішній поверхні перевищують такі на внутрішній, то вже при $E_2/E_1=0,55$ вони стають однаковими, а при $E_2/E_1=0,1$ максимальні напруження розтягу на внутрішній поверхні удвічі перевищують напруження на зовнішній. Відповідно, і точка вірогідного крихкого руйнування після охолодження переходить на внутрішню поверхню.

Порівняння результатів досліджень вузлів з матеріалів, що відрізняються тільки величиною значення модуля пружності жорсткішого матеріалу, показало, що при охолодженні вузлів з матеріалів з різними ТКЛР, характер розподілу напружень і деформацій по перерізу залежить від співвідношення модулів пружності E_2/E_1 . При

цьому деформації не залежать, а рівень напружень змінюється прямо пропорційно величині модуля пружності жорсткішого з матеріалу E_1 .

При охолодженні під тиском поле осьових напружень, зберігаючи свій характер, який обумовлений зміною температури, зміщується в бік стиску. При зменшенні співвідношення жорсткостей матеріалів, поле змінюється головним чином з боку матеріалу з меншим модулем пружності, при цьому величина напружень розтягу помітно зменшується, що знижує ризик руйнування з'єднання в процесі охолодження. У матеріалі з більшим ТКЛР осьові напруження стиску у поєднанні з радіальними і окружними напруженнями розтягу призводить до збільшення еквівалентних напружень до 1,5...2 разів, що сприяє інтенсивнішому розвитку пластичних деформацій і зменшенню залишкових напружень у всьому вузлі після розвантаження.

Рівень залишкових осьових напружень на зовнішній поверхні втулки практично не залежить від величини відносного радіусу, на внутрішній поверхні він помітно зростає лише при малих значеннях відносного радіусу ($r/b < 1$). Зі зростанням відносної висоти ці напруження збільшуються на обох поверхнях, особливо інтенсивно при малих співвідношеннях h/b (до 0,5).

При моделюванні НД стану з урахуванням деформацій повзучості при дифузійному зварюванні різнорідних матеріалів підтверджено основні закономірності його формування, встановлені для стадії пружної деформації і утворення деформацій короткочасної (миттєвої) пластичності, але повзучість матеріалу збільшує величину деформацій і зменшує напруження.

Так, повільне охолодження вузла мідь-графіт за рахунок повзучості міді помітно зменшує рівень максимальних напружень розтягу і зменшує вірогідність крихкого руйнування графіту. Це свідчить про те, що при виготовленні металокерамічних і металографітових з'єднань застосування металів з високою релаксаційною здатністю, зокрема мідь, може бути альтернативою використанню металів з низькими ТКЛР типу інвар і ковар, якщо вузол повинен володіти високими тепло- і електропровідністю. Це дуже важливо для пристроїв високої потужності, що підводять або знімають струм, коли неможливо застосовувати низькотемпературні припої, наприклад в електродах електропечей, прохідних ізоляторах свердловинних пристроїв і ін.

Якщо за умовами експлуатації вузла необхідно застосовувати міцніший метал, в порівнянні з міддю, без вимог високої електропровідності, зокрема в металокерамічних вузлах, то найдоцільніше використовувати титан, що має порівняно низький опір повзучості при малому ТКЛР.

З погляду зменшення залишкових напружень дещо ефективнішим є ступінчасте охолодження, коли швидке зменшення температури чергується з подальшою витримкою для реалізації процесів повзучості і релаксації в металі. Природно, що ступінь зниження температури в межах однієї сходинки повинен визначатися розрахунком, таким чином, щоб максимальні осьові напруження розтягу, що виникають в крихкому матеріалі після зниження температури не перевищували (з урахуванням коефіцієнта запасу) границю міцності на розтяг (вигин).

Встановлені закономірності впливу різних чинників на НД стан з'єднань з різномірних матеріалів, як в процесі їх формування при ДЗ, так і після охолодження зварних вузлів, є базовими при виборі матеріалів, режимів з'єднання, загальних принципів проектування вузлів і технологій.

Так наприклад, виконаний аналіз чотирьох конструктивних варіантів дифузійно-зварного з прокладками, що розплавляються, вузла складеного катода для іонно-плазмового напилення (мідна основа + витратна частина з лігатури цирконію) показав, що рівень максимальних залишкових напружень розтягу в цирконії при різних конструктивних варіантах змінюється в широких межах (від 45 до 135 МПа). Це дозволило рекомендувати оптимальний варіант, що забезпечує мінімальний ризик крихкого руйнування після охолодження. Виготовлення експериментальної партії вузлів підтвердило правильність рекомендацій.

У вузлі металографітового кільця (графіт + сталь) порівняння залишкового напруженого стану трьох варіантів товщини сталеві частини (1, 3 і 6 мм) дозволило встановити, що найбільш несприятливі залишкові напруження після паяння утворюються при малій висоті сталеві кільця, коли великі напруження розтягу створюються як в осьовому напрямку (вздовж утворюючої) на внутрішній і зовнішній поверхнях, так і в окружному на верхній торцевій поверхні графітового кільця. Відповідно крихке руйнування останнього може відбутися як вздовж, так і впоперек кільця, що підтверджено досвідом з'єднання таких кілець.

В цьому розділі відображено основні закономірності і принципи вибору та сформульовано показники кількісної оцінки оптимальних конструкції і технології ДЗ циліндричних вузлів з різномірних матеріалів.

Виконані дослідження показали, що НД стан в зоні стику залежить як від властивостей матеріалів, так і від геометричних, конструктивних і інших чинників, а також параметрів режиму зварювання:

Загальними для всіх циліндричних вузлів закономірностями, є наявність:

- НД стану в зоні стику, близького до об'ємного;
- зони з мінімальними дотичними і еквівалентними напруженнями і мінімальними ПД;
- нерівномірного розподілу напружень і деформацій вздовж стику;
- максимумів поблизу циліндричних поверхонь, причому максимум біля зовнішньої поверхні більший, ніж біля внутрішньої. У вузлах з різними діаметрами деталей типу В-Ф пік напружень значно збільшується за рахунок конструктивного концентратора;

–мінімуму ПД в точці, де дотичні напруження дорівнюють нулю, а еквівалентні напруження мінімальні.

На основі результатів роботи проведено оптимізацію ряду вузлів та розроблено технології виготовлення корпусів електромагнітів, металокерамічних вузлів гермовводів та прохідних ізоляторів, іонно-плазмові катода, металографітові підшипники ковзання тощо. Освоєно технології ДЗ з активацією поверхонь за рахунок термічних і структурних напружень, модифікації, у тому числі легування поверхонь, низькоенергетичними високострумівими електронними пучками. Розроблено технології УКФА 2519.00001 та УКФА 680 210.01 ТП, що захищені 3-ма патентами.

Основні технології виготовлення корпусів електромагнітів і металокерамічних вузлів, які за технічними характеристиками не поступаються світовому рівню, що дозволило вітчизняним підприємствам відмовитись від їх імпорту. При цьому значно спрощуються технології і знижується вартість вузлів порівняно з імпортними.

Для реалізації розроблених технологій виготовлення деталей створено високо вакуумну універсальну установку УВВУ-КПІ, у якій передбачено використання низькоенергетичних високострумівих пучків, що дозволить розширити використання в Україні перспективних імпульсних технологій обробки матеріалів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у встановленні закономірностей отримання з'єднань, при дифузійному зварюванні матеріалів з фізико-механічними властивостями, що відрізняються, для заготовок, близьких до кінцевої форми виробу. Показано, що стабільність якості і геометричних розмірів виробів може бути досягнута за рахунок управління напружено-деформованим станом, рівнем залишкових напружень і модифікуванням поверхонь з'єднання.

2. Встановлено, що для деформаційної активації поверхонь з'єднання електротехнічної і неіржавіючої сталей можна використовувати ефект формування деформацій зсуву в стику. Цьому сприяє виникнення дотичних напружень, обумовлених зміною ТКЛР і приблизно на порядок збільшення швидкості повзучості електротехнічної сталі (з $4,3 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ до $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) при нагріванні або охолодженні в температурному інтервалі переходу $\delta\text{-Fe}$ в $\gamma\text{-Fe}$. Це дозволило отримати з'єднання сталей 10895 і 12X18H10T рівноміцні електротехнічній сталі і зменшити температуру дифузійного зварювання щодо прийнятої, до температури термічної обробки ($950 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) цієї сталі.

Аналогічний ефект спостерігається і при з'єднанні деталей з жароміцних дисперсійнотвердіючих сплавів, які знаходяться в різному структурному стані (загартованому і зістареному), не тільки за рахунок відмінності їх ТКЛР (у інтервалі $950 \dots 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ для загартованого сплаву ТКЛР не перевищує $28 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, а для зістареного більший за $40 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), а і структурних деформацій, що відбуваються при температурах розчинення зміцнюючих фаз. Так, при дифузійному зварюванні деталей із сплаву ЧС88У-ВИ, що знаходяться в різному структурному стані при досягненні температури $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, еквівалентні пластичні деформації в стику, з боку загартованої деталі, складають від 0,15 до 0,4 %, що дозволяє отримати з'єднання з міцністю на рівні 90...95 % міцності жароміцного сплаву.

3. Встановлено, що при дифузійному зварюванні різнорідних матеріалів у вузлах типу «втулка-втулка» і «втулка-фланець» на ділянці між внутрішньою поверхнею втулки і половиною її товщини, як і у вузлах типу «циліндр-циліндр» в центрі стику, існує зона з мінімальними пластичними деформаціями. Ця зона, по аналогії з термінологією, що застосовується в теорії обробки металів тиском, названа «зоною деформаційного застою».

4. Показано, що можливість формування якісного з'єднання, яка визначається характером розподілу, рівнем пластичних деформацій і залишкових напружень в зоні

стику, може бути оцінена такими показниками як: коефіцієнт рівномірності розподілу пластичних деформацій уздовж стику K ; відносна величина зони деформаційного застою x_0 ; ступінь локалізації пластичних деформацій в зоні стику y_0 ; граничний запас міцності по залишковим напруженням.

5. Показано, що у випадках, коли значення показника відносної величини зони деформаційного застою наближається до 1 і величина пластичної деформації недостатня для забезпечення деформаційної активації поверхонь, в проектних розмірах заготовки, яка підлягає зварюванню, необхідно передбачити припуск для видалення цієї зони із з'єднання або забезпечувати активування поверхонь іншими методами.

6. Показано, що вирівнювання величини пластичних деформацій при з'єднанні різнорідних матеріалів (значення показника K підвищується, максимум до 1) і їх локалізація в зоні стику (значення показника y_0 наближається до нуля) досягається накладанням теплосмін з одночасним прикладенням зусилля стиснення, що дозволило запропонувати технологію дифузійного зварювання, яка забезпечує підвищення рівня міцності з'єднань. Так, при зварюванні з постійним тиском 15 МПа сталей 10895 і 12Х18Н10Т міцність з'єднань без термоцикування не перевищує 255 МПа, а з термоцикуванням (1000-700-1000 °С) при накладенні 3-х термоциклів складає більше за 360 МПа.

7. У початковий період утворення з'єднання, коли пластичні деформації розподілені уздовж стику практично рівномірно, необхідно здійснювати навантаження стисненням з термоцикуванням. На стадії витримки для зменшення загальних деформацій вузлів доцільно поступово зменшувати зусилля стиснення, що пов'язано з релаксацією напружень за рахунок деформацій повзучості матеріалів, яка протікає в умовах нерівномірного розподілу напружень.

8. Встановлено, що модифікування після електроіскрового різання або чистової механічної обробки низькоенергетичними високострумними електронними пучками забезпечує формування гладких оплавлених поверхонь з величиною значення R_z до 0,3 мкм при щільності енергії пучка 20...25 Дж/см² для сталей і до 20 Дж/см² для сплаву ЧС88У-ВИ, при цьому модифіковані шари мають кристалічну будову, високу дисперсність зерен, щільність дислокацій до $10^{11}...2 \cdot 10^{11}$ см⁻², підвищену твердість, що свідчить про високий енергетичний рівень структури. Найбільший ефект досягається у разі модифікування обох поверхонь. Так об'ємна частка спільних зерен в стику при дифузійному зварюванні сталей 10895 і 12Х18Н10Т (нагрівання до температури 950 °С, нетривала витримка і охолодження) майже на порядок більше в порівнянні з модифікуванням тільки поверхні стали 12Х18Н10Т і майже в 3 рази більше, ніж при модифікуванні тільки поверхні стали 10895.

9. Встановлена можливість з'єднання дисперсійотвердіючих жароміцних сплавів дифузійним зварюванням з прошарками, що розплавляються, шляхом обробки низькоенергетичним високострумним електронним пучком поверхні деталей із задалегідь нанесеним, з метою легування, шаром елементів, що знижують температуру плавлення сплавів, наприклад Zr, Hf, Nb. Це дозволило виключити виготовлення припоїв, проблему їх встановлення в важкодоступних місцях, забезпечити плавний перехід від основного матеріалу до легованого шару завтовшки від 20 до 50 мкм, а

також виключити необхідність проведення тривалого дифузійного відпалу паяних з'єднанні.

10. При з'єднанні металів з керамікою рекомендовано використовувати ступінчасте охолодження при керованому прикладанні навантаження. Величина інтервалу зменшення температури при ступінчастому охолодженні визначається з умови не перевищення напруженнями розтягу, що діють в кераміці, її міцності, при цьому прикладання тиску стиснення зменшує напруження розтягу в матеріалі з меншим ТКЛР (кераміці) і зменшує ризик його крихкого руйнування, що реалізовано при виготовленні металокерамічних гермовводів електронно-променевиx гармат.

11. При проектуванні і виготовленні корпусів електромагнітних клапанів гідросистем літаків використаний ефект локалізації пластичних деформацій в зоні стику при дифузійному зварюванні з накладенням теплосмін, що дозволило підвищити тиск їх руйнування (до 980 ат. при необхідних (50+10) ат.) і скоротити час зварювання щонайменше в два рази.

Розроблені рекомендації щодо дифузійного зварювання різних матеріалів використано для оптимізації конструкції і технології виготовлення вузлів складених іонно-плазмових катодів, металокерамічних ізоляторів, метало-графітових підшипників і ін. які за своїми характеристиками не поступаються світовому рівню.

Основні публікації за темою дисертації

1. Совершенствование технологии диффузионной сварки корпусов электромагнитных клапанов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко, Б.В. Бугаенко, В.Ю. Волошин // *Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. праць.* – Маріуполь: ПДТУ. – 2006 – Вип. 9. – С. 178-183.

Докторантом, на основі аналізу результатів досліджень, запропоновано шляхи вдосконалення технології дифузійного зварювання виробів.

2. Квасницкий В.В. О кинетике образования соединения при диффузионной сварке в вакууме нержавеющей стали с армко-железом / В.В. Квасницкий // *Зб. наук. праць НУК.* – 2007. – № 4. – С. 51-57.

3. Моделирование напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке электромагнитных клапанов / В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, Ал.В. Лабарткава, Г.В. Ермолаев, В.Ф. Квасницкий // *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал Одеського націон. морського ун-ту.* – Одеса: ОНМУ. – 2007. – № 1. – С. 87-96.

Докторантом запропоновано розрахункову модель та узагальнено результати комп'ютерного моделювання.

4. Квасницкий В.В. Моделирование напряжено-деформированного stanu при дифузійному зварюванні матеріалів з різними фізико-механічними властивостями / В. Квасницкий, Г. Єрмолаєв, М. Матвієнко // *Машинознавство: Всеукр. щоміс. наук.-техн. і виробн. журнал.* – 2007. – № 7. – С. 30-39.

5. Квасницкий В.В. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке узла втулка-втулка из разнородных материалов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // *Зб. наук. праць НУК.* – 2007. – № 2. – С. 50-56.

В роботах 4 і 5 докторантом запропоновано розрахункову модель та визначено вплив фізико-механічних властивостей матеріалів на формування напружено-деформованого стану з'єднань.

6. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке металлов с различными физико-механическими свойствами применительно к деталям цилиндрической формы / В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, Ал.В. Лабарткава, Т.А. Пивоварова // Зб. наук. праць НУК. – 2007. – № 3. – С. 61-67.

7. Квасницкий В.В. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. – 2007. – № 5. – С. 57-65.

В роботах 6 і 7 докторантом визначено методики розрахунків та узагальнено результати теоретичних досліджень.

8. Махненко В.И. Влияние физико-механических свойств соединяемых материалов и геометрии деталей на распределение напряжений при диффузионной сварке в вакууме / В.И. Махненко, В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2008. – № 1. – С. 5-11.

Докторантом запропоновано розрахункові моделі та визначено вплив геометрії деталей та фізико-механічних властивостей матеріалів на розподіл напружень при формуванні зварних з'єднань.

9. Квасницкий В.В. Влияние напряженно-деформированного состояния на параметры режима диффузионной сварки разнородных сталей / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. – 2007. – № 1. – С. 33-40.

Докторантом узагальнено результати досліджень.

10. Общие закономерности формирования напряженного состояния при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы / В.Д. Кузнецов, В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. – 2007. – № 6. – С. 62-73.

Докторантом, на основі аналізу результатів теоретичних досліджень за допомогою комп'ютерного моделювання, узагальнено закономірності формування напруженого стану зварних з'єднань вузлів циліндричної форми.

11. Оценка применимости метода компьютерного моделирования к исследованию напряженно-деформированного состояния цилиндрических узлов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко, Б.В. Бугаенко, В.Ф. Квасницкий // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы: Научно-техн. журнал. – Херсон: ХНТУ. – 2008. – № 2. – С. 5–9.

Докторантом розроблено методику оцінки і виконано аналіз і порівняння результатів аналітичних рішень та комп'ютерного моделювання.

12. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке узлов втулка-фланец / В.И. Махненко, В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. – 2008. – № 2. – С. 55-61.

Докторантом узагальнено результати комп'ютерного моделювання.

13. Квасницкий В.В. Влияние выточек во втулке на напряжённно-деформированное состояние узла втулка-фланец при диффузионной сварке / В.В. Квасницкий // Зб. наук. праць НУК. – 2008. – № 3. – С. 59-63.

14. Квасницкий В.В. Влияние относительного радиуса цилиндрических деталей на напряженное деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных материалов / В.В. Квасницкий // Проблеми техніки: Наук.-виробн. журнал. – 2008. – № 3. – С. 121-129.

15. Экспериментальное исследование деформирования сварного узла типа втулка-втулка из разнородных материалов / В.В. Квасницкий, Ю.Г. Золотой, А.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко, А.С. Карпенюк // Зб. наук. праць НУК. – 2008. – № 4 – С. 65-73.

Докторантом запропоновано експериментальний зразок, визначено режими випробувань, розрахункова модель, узагальнено результати експериментальних досліджень та проведено їх порівняння з результатами комп'ютерного моделювання.

16. Квасницкий В.В. Влияние геометрии деталей из разнородных материалов на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке / В.В. Квасницкий // Зб. наук. праць НУК. – 2008. – № 5. – С. 42-46.

17. Махненко В.И. Напряжённно-деформированное состояние соединений при диффузионной сварке материалов с различными физико-механическими свойствами / В.И. Махненко, В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2008. – № 8. – С. 5-10.

Докторантом узагальнено результати теоретичних досліджень по впливу фізико-механічних властивостей матеріалів на формування напружено-деформованого стану з'єднань.

18. Квасницкий В.В. Влияние пластических деформаций на напряжённно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных материалов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова. – 2008. – № 1. – С. 100-107.

Докторантом узагальнено результати комп'ютерного моделювання.

19. Влияние деформаций ползучести на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных материалов / В.В. Квасницкий, А.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко, Е.Н. Волкодаева, А.В. Гетманцев // Зб. наук. праць НУК. – 2008. – № 6. – С. 41-49.

Докторантом запропоновано схему та методику розрахунків, визначено важливі для дифузійного зварювання стадії деформацій повзучості та узагальнено результати досліджень.

20. Квасницкий В.В. Сравнение и оценка эффективности вариантов нагружения при диффузионной сварке цилиндрических узлов из разнородных материалов // В.В. Квасницкий // Проблеми техніки: Наук.-виробн. журнал.. – 2008. – № 4. – С. 70-79.

21. Квасницкий В.В. Влияние деформаций ползучести на напряженно-деформированное состояние при сжатии в условиях диффузионной сварки разнородных материалов / В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, Г.В. Ермолаев // Зб. наук. праць НУК. – 2009. – № 1. – С. 98-105.

Докторантом узагальнено результати теоретичних досліджень.

22. Махненко В.И. Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке / В.И. Махненко, В.В. Квасницкий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 2. – С. 5-10.

Докторантом узагальнено результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану циліндричних вузлів.

23. Кузнецов В.Д. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных металлов в узлах втулка-фланец / В.Д. Кузнецов, В.Ф. Квасницкий, М.В. Матвиенко // Вестник НТУУ „КПИ”. Машиностроение. – 2008. – № 55 – С. 134–142.

Докторантом запропоновано розрахункову модель, та узагальнено результати комп'ютерного моделювання.

24. Григоренко Г.М. Актуальные проблемы исследования физико-механических свойств материалов для сварных и паянных конструкций / Г.М. Григоренко, В.В. Квасницкий, С.Г. Григоренко и др. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009, № 5. – С.78-85.

Докторантом запропоновано методики проведення досліджень з використанням установки Gleeble-3800, узагальнено результати експериментальних досліджень.

25. Квасницкий В.В. Применение модифицирования поверхностей воздействием низкоэнергетических сильнофокусированных электронных пучков при диффузионной сварке и пайке с давлением / В.В. Квасницкий, // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК. – 2009, № 2. – С. 96-105.

26. Кузнецов В.Д. Роль термомеханических процессов и модифицирование поверхностей при диффузионной сварке и пайке с давлением / В.Д. Кузнецов, В.В. Квасницкий // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК. – 2009, № 3. – С. 111-222.

Докторантом узагальнено результати теоретичних та експериментальних досліджень.

27. Квасницкий В.В. Кинетика напряжённо-деформированного состояния в зоне стыка при диффузионной сварке разнородных материалов при совместном сжатии и термоциклировании / В.В. Квасницкий // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009, № 65. – С. 62-69.

28. Квасницкий В.В. Оптимизация конструкции металлокерамического узла на основе моделирования напряженно-деформированного состояния / В.В. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одеса: ОНМУ. – 2009. – № 1. – С. 82-89.

Докторантом узагальнено результати комп'ютерного моделювання, визначено оптимальні параметри процесу з'єднання та товщина коварових фланців.

29. Напряженно-деформированное состояние двухслойных втулок из разнородных материалов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, А.В. Лабарткава, Фам Ван Туан // Адгезия расплавов и пайка материалов: Сб. научн. тр. – 2007. – Вып. 40. – С. 91-97.

Докторантом узагальнено результати теоретичних досліджень.

30. Квасницкий В.В. Влияние прочности и сопротивления ползучести металла на остаточное напряжённо-деформированное состояние металлокерамических соединений

/ В.В. Квасницький, Г.В. Ермолаєв, Ал.В. Лабарткава // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК. – 2009, № 4. – С. 20-28.

Докторантом визначено граничні умови розрахунків, узагальнено результати теоретичних досліджень та проведено їх порівняння з літературними даними.

31. Матвієнко М. Удосконалення технології дифузійного зварювання корпусів електромагнітів шляхом визначення напружено-деформованого стану / М. Матвієнко, В. Квасницький // Машинознавство: Всеукр. щоміс. наук.-техн. і виробн. журн. – 2009, № 8 (146). – С. 43-47.

32. Махненко В.И. Особенности формирования напряжённо-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой / В.И. Махненко, В.В. Квасницький // Автоматическая сварка. – 2009, № 8. – С. 11-16.

В роботах 31 і 32 докторантом на основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання надано рекомендації по оптимізації параметрів процесу з'єднання деталей.

33. Патент на корисну модель № 23414. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В.В. Квасницький, М.В. Матвієнко, Г.В. Ермолаєв, В.Ф. Квасницький, Б.В. Бугаєнко, В.Ю. Волошин. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. ИА. В23К 20/14. Заявл. 25.12.2006. Опубл. 25.05.2007. Бюл. 7.

Докторантом запропоновано розроблений спосіб дифузійного зварювання матеріалів на основі проведених досліджень.

34. Патент на корисну модель № 47368 Спосіб дифузійного зварювання металів / М.М. Коваль, Ю.Ф. Иванов, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, Л.І. Маркашова, М.В. Матвієнко. Заяв. 31.08.09. № u200909042. МПК (2009), В23К 20/14. Опубл. 25.01.2010. Бюл. № 2.

Докторантом розроблено спосіб дифузійного зварювання матеріалів із модифікуванням поверхонь з'єднання низькоенергетичними високострумними електронними пучками.

35. Патент на винахід, № 81583. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В.В. Квасницький, М.В. Матвієнко, Г.В. Ермолаєв, В.Ф. Квасницький, Б.В. Бугаєнко, В.Ю. Волошин. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. ИА. МПК (2008). В23К 20/14. Заявл. 21.11.2006. Опубл. 10.01.2008. Бюл. 1.

Докторантом запропоновано розроблений спосіб дифузійного зварювання матеріалів на основі проведених досліджень.

36. Применение сильноточного электронного пучка для модифицирования поверхности железа, нержавеющей стали и жаропрочного сплава / В.В. Квасницький, В.Д. Кузнецов, Н.Н. Коваль, Ю.Ф. Иванов, А.Д. Терехов, Л.И. Маркашова, В.Ф. Квасницький // Электронная обработка материалов: Научн. и произв.-техн. журнал. – Кишинев: Институт прикладной физики АН Республики Молдова – 2009. – № 3. – С. 14-20.

Докторантом досліджено вплив модифікування поверхонь та режимів обробки на властивості та структуру оброблених поверхневих шарів.

37. A High-Current Elektron Beam Application for the Surface Modification of Iron, Stainless Steel and Heat Resistant Alloys / V.V. Kvasnitskii, V.D. Kuznetsov, N.N. Koval,

Yu.F. Ivanov, A.D. Teresov, L.I. Markashova, V.F. Kvasnitskii // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. Allerton Press. inc. – 2009, Vol. 45, № 3. – P. 180-185.

Докторантом визначено вплив режимів модифікування поверхонь на їх властивості та структуру.

38. Квасницкий В.В. Влияние соотношения размеров цилиндрических деталей из разнородных материалов на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. четвертой междунар. конф. 27-30 мая 2008 г., пос. Кацевели, Украина. Под ред. проф. В.И. Махненко. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2009. – С. 23-27.

Докторантом запропоновано розрахункові моделі та узагальнено результати досліджень.

39. Квасницкий В.В. Оптимизация напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Там же. – С. 28-33.

40. Квасницкий В.В. Оптимизация конструкции металлокерамического гермоввода на основе моделирования напряженного состояния и разработка технологии пайки / В.В. Квасницкий, Ал.В. Лабарткава // Там же. – С. 34-37.

В работах 39 і 40 на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень докторантом запропоновано оптимальні параметри процесу з'єднання та форми заготовок.

41. Квасницкий В.В. Напряжённо-деформированное состояние двухслойных втулок из разнородных материалов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, Ал.В. Лабарткава // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. четвёртой междунар. конф. 27-30 мая 2008 г., пос. Кацевели, Украина. Под ред. проф. В.И. Махненко. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2009. – С. 38-41.

Докторантом запропоновано розрахункові моделі, визначено граничні умови розрахунків, узагальнено результати досліджень.

42. Махненко В.И. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке материалов с разными физико-механическими свойствами / В.И. Махненко, В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. четвертой междунар. конф. 27-30 мая 2008 г., пос. Кацевели, Украина. Под ред. проф. В.И. Махненко. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2009. – С. 95-102.

43. Компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния при диффузионной сварке / Г.В. Ермолаев, В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, Ал.В. Лабарткава, В.Ф. Квасницкий // Быстрозакалённые материалы и покрытия: Сб. тр. 5-й Всероссийск. с междунар. участ. научн.-техн. конф. 12-13 дек. 2006 г. Научно-техн. семинар „Диффузионная сварка и её роль в соврем. технике”, посв. 100-летию Н.Ф. Казакова. – М.: „МАТИ” – РГТУ им. К.Э. Циолковского. – 2006. – С. 24-28.

В работах 42 і 43 докторантом проведено аналіз та узагальнено результати

досліджень.

44. Structure and Properties of Armco Iron and Stainless Steel, Manufactured by High-Current Low-Energy Electronic Beam / N.N. Koval, Yu.F. Ivanov, V.V. Kvasnitskyu, V.F. Kvasnitskyu, L.I. Marcashova // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings / Ed. By Nikolai Koval and Alexander Ryabchikov. – Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2008. – P.p. 274–277.

Докторантом узагальнено результати експериментальних досліджень.

45. Mathematical Simulation of the Thermal Tension Material State in the High-Current Electronic Beam Pulse Surfacing / L.M. Dykhita, V.V. Kvasnitskyu, N.N. Koval, Yu.F. Ivanov, V.F. Kvasnitskyu // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings / Ed. By Nikolai Koval and Alexander Ryabchikov. – Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2008. – P.p. 278–281.

Докторантом визначено початкові та граничні умови моделювання, запропоновано розрахункові моделі та узагальнено результати досліджень.

46. Хизначенко Ю.Н. Применение метода конечных элементов для анализа напряжённо-деформированного состояния, вызванного локальным нагревом при использовании дефектов литья деталей из жаропрочных никелевых сплавов / Ю.Н. Хизначенко, В.В. Квасницкий // Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства: Матер. Междунар. конф. – Николаев: УГМТУ. – 2003. – С. 75-77.

47. Квасницкий В.В. Влияние пластических деформаций на напряжённо-деформированное состояние при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы из разнородных материалов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Сварка и родственные технологии в третьем тысячелетии: Тез. стэнд. докл. Междунар. конф. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2008. – С. 138-139.

В работах 46 і 47 докторантом запропоновано розрахункові моделі, визначено граничні умови розрахунків, узагальнено результати досліджень.

48. Квасницкий В.В. Удосконалення технології дифузійного зварювання корпусів електромагнітів на основі аналізу напружено-деформованого стану / В. Квасницкий, М. Матвиенко // 9-й Міжнар. симпоз. укр. інж.-механіків у Львові: Праці. – Львів: 2009. – С. 213-214.

Докторантом узагальнено результати досліджень та на їх основі запропоновано шляхи підвищення якості виробів.

49. Вовченко А.И. Оптимизация конструкции и технологии пайки керамического проходного изолятора высоковольтного импульсного конденсатора / А.И. Вовченко, В.В. Квасницкий, А.В. Лабарткава // Проблемы сварки и родственных процессов и технологий: Матер. Междунар. научно-техн. конф., посвящ. 50-летию кафедры сварочн. пр-ва НУК и 75-летию ИЭС им. Е.О. Патона: Николаев: НУК, 2009. – С. 32.

50. Оптимизация конструкции металлографитовых подшипников скольжения на основе анализа напряжений в паяных узлах / В.М. Емельянов, В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев А.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко // Там же. – С. 50.

51. Разработка конструкции и технологии изготовления составного катода для ионно-плазменного напыления тугоплавких металлов / В.В. Квасницкий,

М.В. Матвиенко, И.А. Колесар, С.В. Дмитренко // Там же. – С. 59.

В роботах 49 – 50 докторантом запропоновано розрахункові моделі, узагальнено результати досліджень та на їх основі визначено оптимальні розміри і параметри режиму з'єднання деталей.

52. Формирование остаточных напряжений в торцовых соединениях графита и меди и их влияние на технологию диффузионной сварки и пайки узлов / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, А.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко, Б.В. Бугаенко, А.М. Костин // Там же. – С. 57.

Докторантом узагальнено результати експериментальних досліджень.

АНОТАЦІЯ

Квасницкий В.В. Дифузійне зварювання з керованим напружено-деформованим станом і модифікуванням поверхонь з'єднання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2010.

Дисертація присвячена вивченню закономірностей формування напружено-деформованого стану при дифузійному зварюванні різнорідних матеріалів.

Встановлено, що дифузійне зварювання з термоцикуванням підвищує рівномірність розподілу і сприяє локалізації пластичних деформацій в стику.

Запропоновано показники, що визначають умови, формування якісних з'єднань, а також шляхи зниження залишкових напружень у вузлах з різнорідних матеріалів.

Модифікування поверхонь з'єднання високострумними високострумовими електронними пучками сприяє формуванню з'єднань, а легування поверхні жароміцних сплавів дозволяє зменшити температуру зварювання.

На основі виконаних досліджень розроблено рекомендації по конструюванню вузлів, технології дифузійного зварювання, освоєно виробництво промислових виробів, модернізовано устаткування.

Ключові слова: дифузійне зварювання, напружено-деформований стан, термоцикування, модифікування, технологія.

АННОТАЦИЯ

Квасницкий В.В. Диффузионная сварка с управлением напряжённо-деформированным состоянием и модифицированием соединяемых поверхностей. – Рукопись.

Диссертация на соискания учёной степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 «Сварка и родственные процессы и технологии» Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2010.

Диссертация посвящена изучению закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов и остаточных напряжений с учётом различных факторов и влияния напряженно-деформированного состояния и модифицирования соединяемых поверхностей с применением обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками

на формирование соединений с целью совершенствования технологий диффузионной сварки и повышения качества соединений.

Методом компьютерного моделирования исследовано НДС состояние при ДС с учётом влияния пластических деформаций, изменения температуры, внешней нагрузки, геометрии и конструктивных факторов узлов. Для проведения моделирования на установке Gleeble-3800 определяли физико-механические свойства, уравнения и параметры ползучести исследованных металлов. Установлено, что при ДС материалов с разными физико-механическими свойствами в зоне стыка создается сложное НДС состояние с неравномерным распределением осевых, радиальных, окружных, касательных и эквивалентных напряжений. При постоянной температуре диффузионной сварки разнородных материалов в менее жестком материале в зоне стыка образуется напряженное состояние, близкое к всестороннему сжатию, при котором уровень эквивалентных напряжений и пластических деформаций уменьшается в этой зоне и достигает максимального значения вне её, то есть появляется эффект, известный в литературе, как упрочнение менее прочного материала в контакте с более прочным, что ухудшает формирование соединений.

Показано, что эффективным способом локализации пластических деформаций в зоне стыка, обеспечивающим уровень эквивалентных напряжений значительно выше номинальных, является изменение температуры в условиях сжатия. Характер и уровень НДС состояния при заданном интервале изменяющихся температур в наибольшей мере определяют внешнее давление и различие ТКЛР материалов. Аналогичный эффект локализации напряжений и деформаций сдвига в зоне стыка имеет место при соединении жаропрочных сплавов, находящихся в аустенизированном и состаренном состояниях и испытывающих при температурах сварки структурные превращения, сопровождающиеся изменением объёма.

Установлено, что при ДС разнородных материалов в условиях изменяющейся температуры в стыке между втулками и втулками с фланцами на некотором расстоянии от внутренней поверхности втулки формируется зона с касательными напряжениями и деформациями сдвига, близкими к нулю, как и в центральной зоне при сварке цилиндров, что не позволяет использовать деформационный механизм активации соединяемых поверхностей. Показано, что диффузионная сварка с термоциклированием повышает равномерность распределения пластических деформаций по стыку и обеспечивает качество соединений при снижении температуры сварки.

На базе установленных закономерностей предложены коэффициенты, определяющие условия, формирования качественных соединений, а также пути снижения остаточных напряжений в узлах из разнородных материалов (ступенчатое охлаждение под давлением с релаксацией напряжений в пластичном металле, выбор конструкции узла).

Исследования ДС с модифицированием поверхностей пучками при использовании сильноточных низкоэнергетических электронных пучков показали, что такая обработка обеспечивает высокую чистоту поверхности, не хуже механического полирования, субмикроструктурную структуру, близкую на отдельных участках к наноструктуре,

плотность дислокаций до $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, что свидетельствует о высоком энергетическом уровне поверхностного слоя, способствует формированию соединений, позволяет снизить температуру сварки сталей 10895 и 12X18H10T до температуры обработки стали 10895 с обеспечением прочности соединений на уровне прочности стали 10895, а легирование поверхности жаропрочных сплавов Inconel 718 и ЧС 88Л позволяет снизить максимальную температуру сварки ниже температуры.

Применение легирования поверхностного слоя цирконием, гафнием или другими элементами с применением низкоэнергетических сильноточных электронных пучков позволяет получить расплавляющиеся прослойки, обеспечивающие прочность соединений жаропрочного сплава, не ниже 90 % прочности основного металла.

На основе выполненных исследований разработаны рекомендации по конструированию узлов, технологии диффузионной сварки, освоено производство промышленных изделий, создана в НТУУ „КПИ” установка для диффузионной сварки, предусматривающая возможность использования модифицирования материалов с применением низкоэнергетических сильноточных электронных пучков.

Ключевые слова: диффузионная сварка, напряжённо-деформированное состояние, термоциклирование, модифицирование, технология.

ABSTRACT

Kvasnytsky V.V. Diffusion welding with controllable mode of deformation and modification of connectable surfaces. – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor's degree on speciality 05.03.06 "Welding and related processes and technologies". National technical university of Ukraine "Kyiv Politechnical Institute", Kyiv, 2010.

Qualification work is devoted to investigation regularities of formation mode of deformation by diffusion welding of dissimilar materials.

It was determined that diffusion welding with thermocycling raises equitability and favoures locating of plastic deformation in joint.

Characteristic, which define conditions of qualitative joints, and ways of lowering residual strains in joints of dissimilar materials, were proposed.

Modification of joint surfaces with high-current low-energy electron beams promotes formation of joints, and alloying of surfaces of high-temperature alloys make it possible to bring down the temperature of welding.

On basis of investigation executed guidelines on construction of joints, on technology of diffusion welding were developed, production of products of industry was coped with, equipment was modernized.

Key words: diffusion welding, mode of deformation, thermocycling, modification, technology.