

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

На правах рукопису

ЗАГОРНИКОВ
Володимир Іванович

УДК 621.791.72:669.14/15

**ТЕХНОЛОГІЯ
ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ
ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ Cr-Ni-Mo-Cu ЛЕГУВАННЯ**

05.03.06 —

технологія та машини зварювального виробництва

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 1993

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в ІЕЗ ім. Є.О.Патона АН України

Науковий керівник: чл.Зн-кор. АН України Назаренко О.К.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук Саєнко В.Я.

доктор технічних наук Якубовський В.В.

Провідне підприємство: ПО "Севмашпредприятие"
м.Северодвинськ

Захист відбудеться "5" 01 "1993" р. о __ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради КО16.08.01 в Інституті
електрозварювання ім.Є.О.Патона АН України (СБ2650), Київ: Б,
МПС, вул.Воженко,11).

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці
Інституту.

Автореферат розісланий "26" 11 "1993" р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук

В.М. Нестеренков Нестеренков В.М.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00802284 (0)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування високоміцних сталей Cr-Ni-Mo-Cu легування у суднобудуванні дозволяє зменшити масу вузлів та підвищити їхні експлуатаційні властивості. Але досить важко отримати працездатне товстостінне зварне з'єднання. Багатопрохідне дугове зварювання, що широко застосовується у виробництві, якому притаманне підвищені деформації, необхідність проведення термообробки для зняття внутрішніх навантажень, підвищений вміст водню у шві, широка зона розміцнення, а також труднощі запобіганню дефектів практично вичерпало свої можливості.

Застосування електронно - променевого зварювання (ЕПЗ) перед початком цієї роботи вважалось перспективним для усунення наведених недоліків багатопрохідного дугового зварювання. Завдяки можливості змінювати параметри електронного променя та можливості отримувати оптимальний термомдеформаційний режим очікувалось, що можливе отримання певних властивостей зварного з'єднання без допоміжних операцій термообробки.

У зв'язку з цим була поставлена задача розробки технології ЕПЗ товстостілових вузлів з сталей Cr-Ni-Mo-Cu легування. Формулювання цієї задачі передумовило вивчення процесів формування дитої зони шва, структури, властивостей, а також опір електронно-променевих з'єднань крихкому та циклічному руйнуванню при статичних, циклічних та динамічних навантаженнях.

Мета роботи: на підставі вивчення термомдеформаційного циклу, особливостей формування структури, розподілу домішок укорінення, методів підвищення службових характеристик зварних з'єднань розробити технологію ЕПЗ, що виключає необхідність післязварювальної термообробки металоконструкцій з високоміцних сталей Cr-Ni-Mo-Cu легування завтовшки від 20 до 60 мм, які працюють в умовах циклічних та динамічних навантажень.

Методи досліджень. Оптимізація параметрів режиму ЕПЗ виконувалась на підставі аналітичного та експериментального вивчення термічних циклів ЕПЗ. Використовувались прямі експерименти та математичне моделювання процесів нагрівання та охолодження металу зварного з'єднання. Особливості структуроутворення та вміст вивчалися в

використанням високотемпературної металографії та ділатометричних методів, оптичної та електронної мікроскопії, вторинної іонної мас-спектрометрії, хімічного та спектрального аналізів.

Для визначення холодостійкості зварних з'єднань використовувались як стандартні методики так і випробування, що базуються на принципах механіки руйнування. Використані експрес-досліди на модернізованих зразках з надрізом. Зварюваність та стійкість проти утворення тріщин вивчали з використанням технологічних великогабаритних проб ЦНДІ ТЗ та модернізованих для умов ЕПЗ ліхайдських проб. Застосовувались комплексні циклічні та динамічні випробування зварних з'єднань на великогабаритних вузлах з використанням методу муарових смуг.

Наукова новизна. Розроблена технологія однопрохідного ЕПЗ високоміцних сталей Cr-Ni-Mo-Cu легування. Визначена перевага застосування режимів ЕПЗ, що забезпечують формування вузьких швів та обмежують ріст зерна до 40...80 мкм. У порівнянні з дуговим зварюванням майже у двое розширюється діапазон припустимих швидкостей охолодження у межах температур мартенситних перетворень з 5...30 до 3...50 °C/s за умов високої технологічної міцності. При цьому в'язкість металу ЗТВ перевищує 0,6 МДж/см² та створюються умови рівномірності зварного з'єднання без застосування додаткової термообробки, оскільки у зоні сплавлення забезпечується до 5% структур нижнього бейніту, гребінчастого мартенситу та розгортається самовідпуск мартенситу.

Доведено, що перегрівання за умов підвищення тепловнесення більш ніж 18 кДж/см² знижує твердість металу шва та супроводжується появою дефектів формування через локальну затримку кристалізації, вертикальних та горизонтальних тріщин. Відбувається втрата ефекту аккомодациі напружень ділянками бейніту, так як його вміст у мартенситі ЗТВ перевищує 5%. Має місце також зміщення піків концентрації водню з литої зони шва до межі сплавлення за рахунок зменшення сорбційної ємкості широких, більше ніж 7 мм швів, що з урахуванням росту до 120...130 мкм розмірів зерна знижує циклічну міцність зварного з'єднання.

Доведено, що умови формування найбільш якісних швів створюються у діапазоні питомих тепловнесків $q/vb = 8...18$ кДж/см². Вузька зона термічного впливу та незначна кількість водню у ній призводить до реалізації механізму контактного нагартування за умов навантаження зварних з'єднань.

Доведено, що рівномірність з товщиною зварного з'єднання, мінімальні кутові деформації, найбільш сприятливі первинні структури стовбчато-дендритної та стовбчато-комірчатої будови досягаються за умов формування швів завширшки від 3 до 5 мм з паралельними поверхнями сплавлення.

Визначено, що є можливість підвищити у 3-4 рази довговічність зварних з'єднань, що працюють в умовах динамічних та циклічних навантажень на рівні що дорівнює 0,6...0,7 G_c за рахунок перерозподілу та зменшення пікових напружень стиску або розтягнення в межах концентраторів шляхом оплавлення підсилення зварного валика скануючим променем електронів.

Практична цінність. Наслідки виконаних досліджень використані у конструкторських та технологічних розробках при створенні спеціалізованого обладнання та принципової технології ЕПЗ великогабаритних виробів з сталі Cr-Ni-Mo-Cu легування завтовшки до 60 мм. З участю автора технологія пройшла перевірку на ДЗ СЕМ ІЕЗ ім.Э.О.Патона АН України та ПО "Семашпредприятие" (м.Северодвинськ) під час виготовленні дослідних конструкцій.

Застосування ЕПЗ при виготовленні товстостінних конструкцій відповідального призначення дає можливість значно підвищити потужність випуску продукції зварювання, зменшити витрати на допоміжні матеріали та додаткову термобробку. Економічний розрахунок показує, що застосування розробленої технології замість багатопрохідного дугового зварювання забезпечує 50% економію витрат на кожен метр зварного шва.

На захист виносяться: уявлення про особливості перетворення аустеніту в разі застосування висококонцентрованого джерела нагріву; закономірності формування структури і властивості зварних з'єднань; принципова технологія зварювання вузлів, які працюють в умовах циклічних і динамічних навантажень в повітрі і в морській воді; обґрунтування вибору методів оцінки працездатності; способи підвищення експлуатаційної надійності товстостінних зварних з'єднань.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на VII і VIII Загальносоюзних конференціях з електроннопроменевого зварювання (Київ, 1980р., Москва, 1982р.) на Міжнародній конференції з електронно-променевої технології (Софія, 1985 р.), на Загальносоюзному семінарі при ЛЕНТІ "Методи

зварювання висококонцентрованими джерелами енергії" (Ленінград, 1980р.), на галузевому семінарі "Електронно-променеве зварювання у судновому машинобудуванні" (Миколаїв, 1985 р.). У загальному вигляді робота обговорювалася на спеціалізованому семінарі ІЕЗ ім.З.О.Патона.

Публікації. Відповідно до теми дисертації надруковано 12 статей, отримано 3 авторських свідоцтва.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку літератури та додатків, вона викладена на 220 сторінках, має 67 малюнків, 19 таблиць. Перелік літератури має 189 назв.

У вступі обґрунтований вибір теми роботи, доведена її актуальність та практична цінність, викладені головні положення дисертації, що виносяться на захист.

У першому розділі наведено аналіз особливостей зварювання плавленням високоміцних сталей, наведений досвід ЕПЗ цього класу сталей. Розглянута процеспроможність зварних з'єднань. Наведені фактори, що впливають на експлуатаційну надійність зварних з'єднань в умовах жорсткого циклічного навантаження та проаналізовані способи підвищення циклічної міцності, сформульована мета та завдання досліджень.

У другому розділі визначені умови формування якісного шва, наведені результати дослідження вмісту газів у шві, розроблені прийоми, які розширюють технологічні можливості однопрохідної ЕПЗ. Досліджені термічні цикли ЕПЗ та виявлені особливості структури різних зон з'єднань.

У третьому розділі представлені результати досліджень механічних характеристик зварних з'єднань при статичних та динамічних навантаженнях. Визначена поведінка зварних з'єднань у широкому діапазоні циклічних навантажень. На макетах натурних вузлів вивчені особливості зародження експлуатаційних тріщин. Розроблені технологічні прийоми підвищення працездатності зварних з'єднань.

У четвертому розділі наведені головні технологічні прийоми і рекомендації, які лягли в основу технології ЕПЗ, а також описане обладнання, яке дозволяє реалізувати запропоновану технологію. Наведені результати дослідно-промислового впровадження технології.

4

Додатки

СТИСЛИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

З використанням високоміцних легованих сталей для виготовлення товстостінних великогабаритних конструкцій, які працюють у важких умовах, загострилась проблема забезпечення рівномірних до основного металу зварних з'єднань. Вирішити цю проблему можливо застосуванням прогресивних методів зварювання, наприклад, ЕПЗ. Виходячи з цього необхідно більш глибоко вивчити особливості формування структури та фізико-механічні властивості металу електроннопроменевого зварного з'єднання.

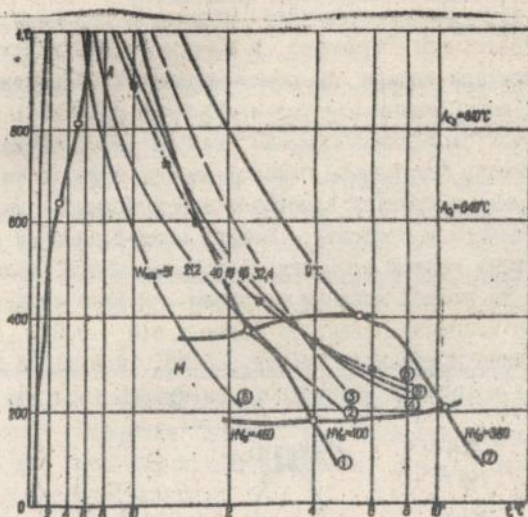
У працях Макари А.М., Касаткіна Б.С., Макарова Е.Л., Шоршорова М.Х., Ардентова В.В., Соколова О.Г., Козлова М.В. зверталась увага на те, що сталі цього типу відрізняються високою стійкістю аустеніту, але при дуговому зварюванні товщин більш 20 мм ініціюється ріст зерна. Це приводить до зниження технологічної міцності і тому вимагає попереднього та супутнього підігріву до 100...150 °С.

Особливості структури електронно-променевих зварних з'єднань.

Застосовуючи комплексну методику дослідження впливу термодифузійних циклів ЕПЗ на кінетику перетворення аустеніту, були уточнені відомі з літератури термокінетичні діаграми сталей Cr-Ni-Mo-Cu легування та побудована діаграма сталі 10ХН4МД. Внаслідок високої стійкості аустеніта розкладання перліту не відбувається.

В межах температур мартенситного перетворення W_0 0,8...15 °С/с перетворення за бейнітною кінетикою починається від температури 420 °С, та в межах 390...380 °С переходить у перетворення за мартенситною кінетикою (мал.1). Кількість бейніта складає менше як 5 %. Розподіляючись рівномірно між мартенситними кристалами в межах пакету, бейніт сприяє акомодатції напруг при перетвореннях. З діаграм анізотермічних перетворень аустеніту видно, що за W_0 менше як 3 °С/с в умовах розвитку бейнітного перетворення відбувається зниження твердості металу ЗТВ. Як впливає із побудованих діаграм (мал.1, мал.2), для забезпечення оптимальних властивостей з'єднання доцільно застосовувати швидкості охолодження в межах від 3 °С/с до 30...40 °С/с. За цих умов бейнітне перетворення випереджає мартенситне. Така кінетика перетворення аустеніту буде більш сприятлива для утворення структури металу, стійкого проти холодних тріщин. Поруч з мартенситом і бейнітом в структурі ЗТВ и шва міститься залишковий аустеніт в кількості 3...5 %.

кості нагріву та охолодження в області високих температур (мал.2), значно вище наведених на діаграмах, що сприяє обмеженню росту зерна. Завдяки чому верхня припустима швидкість охолодження V_0 може бути збільшена до $50^\circ\text{C}/\text{с}$.



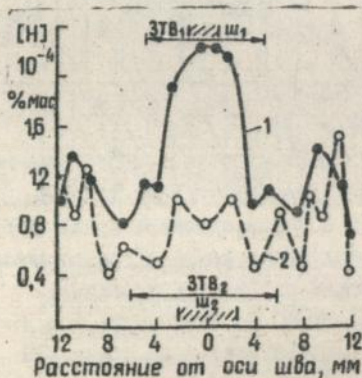
Мал.2 Діаграма аізотермічного перетворення аустеніту сталі 14ХНЗМД:
 2,4,5,8 - розрахункові криві ЕПЗ
 3 - розрахункова крива дугового зварювання під флюсом у режимі:
 $I_s=600$ А; $U_d=40$ В; $V_s=25$ м/ч; к.п.д.=0,6
 6 - експериментальна крива ЕПЗ

Доведено, що в області мартенситних перетворень швидкості охолодження уповільнюються (мал.2). Вибір оптимальної питомої енергії зварювання забезпечує отримання дрібнопластинчатого відпущеного мартенсита в зварних з'єднаннях.

Дослідження методами електронної мікроскопії та дифракції металу ЗТВ, а також шва довели, що мікроструктура складається переважно з гребінчастого дислокаційного мартенситу, відпущеного мартенситу та невеликої кількості до 5 % нижнього бейніту, тобто мартенсит представлений своєю пластичною модифікацією. Це забезпечує максимальний опір холодним тріщинам та передбачає високу циклічну міцність в жорстких умовах експлуатації, тобто гарантує надійність та працездатність зварних вузлів.

Результати дослідження статичної міцності, ударної вязкості, твердості, технологічної міцності в використанні жорсткої проби, особливостей структури довели, що комплекс вимог, висунутих до зварних з'єднань подібного класу задовольняється за умов $W_0 > 3^\circ\text{C}/\text{c}$.

При швидкостях охолодження менше ніж 3 С/с зниження холодостійкості викликано порушенням балансу вмісту бейніту та мартенситу з втратою ділянками бейніту властивості акумуляції напружень в композиті відпущеного мартенситу. Верхня межа діапазону швидкостей охолодження обмежена появою дефектів гідродинамічного походження у вигляді раковин та різної довжини порожнин. Вузька зона термічного впливу 3...4 мм та незначна кількість водню у ній - $0,33...0,57 \times 10^{-4} \%$ мас/мм, що нижче критичного вмісту - $3,56...4,5 \times 10^{-4} \%$ мас/мм, сприяє реалізації механізму контактного зміцнення (мал.3).



Мал.3 Розподіл водню у швах різної ширини (Ш1 та Ш2) при тепловесках q/bv :

1 - 12 кДж/см²

2 - 20 кДж/см²

Працеспроможність електроннопроменевих зварних з'єднань сталей Cr-Ni-Mo-Cu легування та технологічні заходи її підвищення.

Доведено, що умови формування якісного бездефектного шва реалізуються в межах питомого тепловнеску $q/v_6 = 8...18$ кДж/см². Коefіцієнт неоднорідності по твердості розташований у діапазоні від 0,9 до 1,2, та ділянка, що відповідальна за розміщення, завширшки - від 15 до 70 мкм. В наведеному діапазоні питомих енерговнесків забезпечується збільшення міцності ЗТВ та переплавленого металу на 10...15 % в порівнянні з основним металом.

При зварюванні на підвищених швидкостях в питомим тепловнеском q/v_6 менше ніж 8 кДж/см² ризик виникнення дефектів пов'язаний не в низькою технологічною міцністю, а лише з більшою вірогідністю появи несплавлень у корні вузького та глибокого шва при випадкових магнітних відхиленнях променя. Це має підтвердження при ЕПЗ сталей Cr-Ni-Mo-Cu системи легування оброблених на дрібне зерно, коли спостерігається незначний вплив мартенситної структури на показники ударної в'язкості та опір утворенню холодних тріщин металу шва та ЗТВ.

Для гарантованого проплавлення стику припускається за рахунок зниження швидкості зварювання та збільшення питомого тепловнеску розширення шва. Критична ширина шва визначалась з допомогою модернізованої для умов ЕПЗ ліхайської проби, на підставі визначення критичного темпу пересування:

$$b_{\text{крит}} = V_{\text{ш}} \cdot \alpha_{\text{крит}}$$

тобто повинна виконуватися умова $V_{\text{ш}} > V_{\text{ш}}^*$;

де $b_{\text{крит}}$ - темп розкриття умовної тріщини в межах температурного інтервалу крихкості, мм/с;

α - коefіцієнт лінійного розширення, 1/с;

$V_{\text{ш}}$ - середня ширина шва, мм.

Вона дорівнює для товщини 40 мм - $V_{\text{ш}} = 2,5...3,0$ мм, а для товщини 60 мм - $V_{\text{ш}} = 3,0...5,0$ мм.

Перегрівання при питомому тепловнеску вище 18 кДж/см² та розширення шва більш ніж 6...7 мм знижують твердість металу шва через вигорання до 30 % марганцю. Це призводить при статичному розтягуванні до зміщення місця руйнування зварних зразків в зону шва. У швах отриманих при швидкостях зварювання менше ніж 0,8 мм/с, що мають знач-

ну ширину, спостерігається локальна затримка кристалізації, яка супроводжується аномальним розширенням частини шва в появою вертикальних та поперечних тріщин. Відбувається втрата ефекту акомодациі напружень ділянками бейніту у мартенситі, якщо вміст бейніту у ЗТВ перевищує 5 %. В цьому разі також спостерігається зміщення піків концентрації водню в литої зони до межі сплавлення та співпадання їх з піками напружень, що з урахуванням зростання зерна до 120...130 мкм у зоні перегріву призводить до зниження циклічної міцності на 10...20 % .В той же час перегрівання не призводить до помітного падіння ударної в'язкості та підвищенню критичних температур крихкості.

Ударна в'язкість металу шва та ЗТВ зварних з'єднань, отриманих при питомих тепловнесках 8...18 кДж/см², перевищує 0,6 МДж/см², що відповідає вимогам, що висуваються до зварних з'єднань відповідального призначення.

У розвиток існуючих методик отримання КСВ вузьких електроннопроменевих швів нами був запропонований зразок, виконаний у вигляді правильної чотирикутної приєми з надрізом, що перетинає усі зони шва та основний метал. Такий зразок дозволяє отримати інтегральну оцінку опору швів руйнуванню у разі ударних навантажень, стійко виявляти тріщини у зоні суміжних кристалів, що недосяжні для визначення їх традиційними методами КСВ. У 3-4 рази скорочується обсяг дослідів, за рахунок зменшення розсіяння експериментальних крапок.

На підставі використання результатів комплексної оцінки холодостійкості та зварюваності розроблені основні положення технології ЕПЗ та визначені діапазони основних технологічних параметрів процесу. Доведено, що рівномірність швів з глибиною та мінімальні кутові деформації забезпечуються при паралельних стінках литої зони. Властивості металу шва та опір його утворенню тріщин не змінюються при наявності або відсутності осьового кристаліту, слабо залежить від його ширини, кута зрощення бокових кристалів, тобто первинної структури. Чітко визначається залежність кристалізаційних структур від швидкості зварювання та потужності електронного променя.

Отримані зварні з'єднання не мають великогольчатого мартенситу та руйнуються в'язко. Дослідження їх працеспроможності довели:

- підвищення рівня руйнуючих напружень на 10...15 % порівняно з основним металом при статичних навантаженнях;

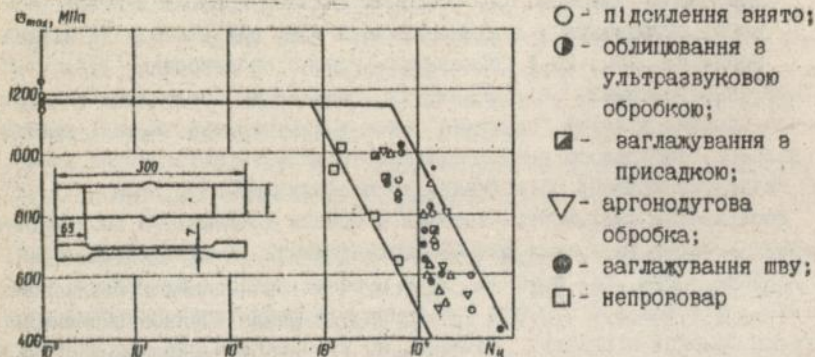
- збереження властивостей стомлюваності на рідні основного металу за умов багаточислових навантажень;
- порівняно однакові з основним металом показники в'язкості руйнування у лінійно-пружній зоні руйнування та підвищення на 10...20 % показників ударної в'язкості.

Останнє положення підтверджують результати досліджень зламів: спостерігається в'язкий "чашечний" алам у центральній частині з'єднання на ділянці стабільного розповсюдження тріщини та волокнистий алам, який видно при більших збільшеннях на поверхні мікротріщини.

Дослідження надійності зварних з'єднань виконані за умов малоциклових іспитів за трьома схемами навантаження - двоосьовий згин, віднульовий згин на повітрі та у морській воді, віднульове розтягнення - у межах 0,7...0,8 G, а також при динамічних випробуваннях натурних зварних з'єднань. Тріщини, що утворюються під час випробувань, розкриваються лише на стадії долому та супроводжуються пластичною деформацією певної ділянки металу шва. Вказане явище має місце у разі руйнування по каналах деформації карбидної фази, частково оксидів та нітридів. Падіння опору стомлюваності не спостерігалось, неважливо від наявності ділянок розміщення у зоні відпуску. Більше того, завдяки малій хімічній неоднорідності вузьких швів з паралельними стінками та відсутності насичення воднем зварного з'єднання має місце більша ніж при дуговому зварюванні ступінь контактної нагартування. Основний вплив на властивості стомлюваності на стадії народження тріщини мають поверхневі концентратори у перехідній зоні - "шов-основний метал". Це ствердження набуло підтвердження експериментальним шляхом за методом муарових смуг з наступним розрахунком напружено-деформаційного стану.

При визначенні працеспроможності зварних з'єднань у малоцикловій області за схемою навантаження "віднульове розтягнення", де найбільш чітко виявилися особливості руйнування швів, були проведені порівняльні випробування зварних вузлів натурної товщини, оброблених аргондуговим зварюванням, ультразвуковим, вибуховим та електронопроменевим способами (мал.4). На підставі сучасних уявлень про стомлюваність металу, вплив неоднорідності структур металу ЗТВ, концентраторів напружень, жорсткості закріплення та масштабового фактору оброблених комплекс входів підвищення працеспроможності зварних з'єднань. Найбільш технологічним засобом усунення поверхневих кон-

центраторів напруження визначений спосіб, що базується на локальному оплавленні підведення шва скануючим електронним променем малої потужності.



Мал.4 Результати випробування на втому зварних з'єднань, які пройшли різні види додаткової обробки.

Цей спосіб дозволяє у 3-4 рази збільшити довговічність зварних вузлів на рівні навантажень $\sigma = 0,6 \dots 0,7 \sigma_{т}$ завдяки тому, що:

- збільшується радіус переходу від шва до основного металу та знижується коефіцієнт концентрації напружень (α_k) з 2,5...1,6 до 1,3, що практично відповідає основному металу;
- зменшуються напруження розтягання та змищуються зв'язки між зернами у поверхневих шарах основного металу.

Надійність з'єднань сталей, які досліджуються доводиться результатами динамічних досліджень щитів $1500 \times 1500 \times 40$ мм та $2500 \times 2500 \times 57$ мм з перехрещеними швами. Було визначено, що отримані значення абсолютної та відносної деформації щитів на 30...40 % перевищують відповідні показники щитів з дуговими швами.

Розробка технології ЕПЗ газових з'єднань.

Найбільш сприятливі умови, що дозволяють запобігти утворенню дефектів у корні шва, перегріванню шва та ЗТВ, що допомагають евакуації парогазової фази, складаються за умов однопрохідного зварювання горизонтальним електронним променем з повним проваром та формуванням кореневого валика за рахунок для повного провару. Визначення впливу параметрів зварювання на геометрію шва.

Сканування променя дає можливість не тільки змінювати форму шва, але й підвищує стійкість та стабільність процесу проплавлення.

Експериментально доведено, що для горизонтальних швів сприятливими є розгортки типу: "коло" або "вірка", а для вертикальних - "впоперк" або "дуга". Для зварних з'єднань завтовшки до 60 мм найбільш ефективна амплітуда сканування променя 0,4...1,3 мм.

Захищено авторським свідоцтвом N 1687401 нетрадиційний метод запобігання ризику утворення несплавлення через неконтрольовані відхилення електронного променя шляхом зварювання одночасно з двох боків підготованих кромek V-подібної форми з кутом при вершині 90...120 град..

Розроблені та пройшли апробацію у заводських умовах засоби усунення поверхневих концентраторів напружень. Запропонована технологія ремонту повторними проходами з повним проплавленням та "косметичною" обробкою розфокусованим променем, в тому числі з подачею присадкового матеріалу у вигляді дроту. Дріт 07НЗМД, аналогічний за складом основному металу, застосовувався також для зварювання по зазору та для проведення ремонтних робіт. Визначені умови отримання гомогенного хімічного складу литої зони шва:

- синхронізація швидкості подавання присадки зі швидкістю зварювання;
- струменевий перенос металу у зварювальну ванну у районі однієї третини глибини каналу проплавлення;
- мінімальний, 10...15 градусів кут між віссю електронного променя та присадкового дроту.

Подавання відповідно захищеного авторським свідоцтвом N 1244855 способу присадочного матеріалу у зварюванні стик дозволило провадити зварювання його з припустимим місцевим зазором до 0,5 мм.

Опанування пропонуємої технології ЕПЗ замість дугового зварювання підвищує якість виробів, прискорює виробництво, зменшує витрати на зварювальні матеріали, поліпшує умови праці. Економічні розрахунки доводять, що застосування розробленої технології замість багатопрохідного дугового зварювання забезпечує п'ятидесяти відсоткову економію витрат на кожен метр шва. Отримані результати рекомендовані для використання суднобудівними заводами України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблена технологія одноструменного ЕПЗ високоміцних сталей Cr-Ni-Mo-Cu легування. Визначена перевага застосування режимів ЕПЗ, що забезпечують формування дузьких швів та обмежують ріст зерна до 40...80 мкм. У порівнянні з дуговим зварюванням майже у двох разів розширюється діапазон припустимих швидкостей охолодження у межах температур мартенситних перетворень з 5...30 до 3...50 °C за умов високої технологічної міцності. При цьому в'язкість металу ЗТВ перевищує 0,6 МДж/см² та створюються умови рівномірності зварного з'єднання без застосування додаткової термообробки, оскільки у зоні сплавлення забезпечується до 5% структур нижнього бейніту, гребінчастого мартенситу та розгортається самовідпуск мартенситу.

2. Доведено, що перегрівання за умов підвищення тепловнесення більш ніж 18 кДж/см² знижує твердість металу шва та супроводжується появою дефектів формування через локальну затримку кристалізації, вертикальних та горизонтальних тріщин. Відбувається втрата ефекту акумуляції напружень ділянками бейніту, так як його вміст у мартенситі ЗТВ перевищує 5%. Має місце також зміщення піків концентрації водню з литої зони шва до межі сплавлення за рахунок зменшення сорбційної ємкості широких, більше ніж 7 мм швів, що з урахуванням росту до 120...130 мкм розмірів зерна знижує циклічну міцність зварного з'єднання.

3. Доведено, що умови формування найбільш якісних швів створюються у діапазоні питомих тепловнесків q/vb - 8...18 кДж/см². Бузька зона термічного впливу та незначна кількість водню у ній призводить до реалізації механізму контактного нагартування за умов навантаження зварних з'єднань.

4. Доведено, що рівномірність з товщиною зварного з'єднання, мінімальні кутові деформації, найбільш сприятливі первинні структури стовбчасто-дендритної та стовбчасто-комірчастої будови досягаються за умов формування швів завширшки від 3 до 5 мм з паралельними поверхнями сплавлення.

5. Для зварювання вузлів з зазором у стику до 0,5 мм розроблений спосіб ЕПЗ з подаванням присадочного дроту. Синхронізоване зі швидкістю зварювання подавання присадки під кутом у 10...15 град. до осі електронного променя створює умови струминного переносу металу у зварювальну ванну та отримання гомогенного хімічного складу металу шва.

6. Розроблений спосіб підвищення роботоспрможності зварного з'єднання в умовах динамічних та циклічних навантажень, що базується на оплавленні зварного валика скануючим електронним променем. Коefіцієнт концентрації напружень (K_{σ}) знижується з 1,6...2,5 до 1,3, перерозподіляються напруження стиску та розтягання, зміцнюються зв'язки між зернами.

Основний зміст дисертаційної роботи відбито у таких публікаціях:

1. Електроннолучевая сварка кольцевых соединений высокопрочной стали 12ХН4М / С.Н.Ковбасенко, В.И.Загорников // Проблемы спец. электрометаллургии. - 1981. - Вып. 15 - С. 19 -25.

2. Прочность сварных соединений на стали 12Х2Н4МД при однопроходной ЭЛС / Материалы VII Всес. конф. по ЭЛС. - Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, 1981 // С.Н.Ковбасенко, В.И.Загорников, В.И.Коваленко.

3. Изучение влияния термического цикла электроннолучевой сварки на структуру соединения высокопрочной стали / В.И.Загорников, В.И.Абдулах // Автомат. сварка. - 1984. - N 4.

4. Сопротивление усталости сварных соединений высокопрочных сталей, полученных ЭЛС / В.И.Загорников, С.Н.Ковбасенко // Свароч. пр-во. - 1984. - N6. - С. 25 -26.

~~5. Механизмы деформирования и разрушения соединений стали 12Х2Н4МД, выполненных ЭЛС / С.Н.Ковбасенко, В.И.Загорников, В.И.Абдулах // Автомат. сварка. - 1984. - N 9-10.~~

5. Електроннолучевая сварка высокопрочных сталей с подачей присадочной проволоки / С.Н.Ковбасенко, В.И.Загорников, Ю.В.Орса // Междуна. об. тр. - 1985. - N 68. - С.

6. Работоспособность электроннолучевых сварных соединений на высокопрочных сталях / С.Н.Ковбасенко, В.И.Загорников // Междунар. конф. по электроннолучевой технологии. - София. -1985. - С. 183 -189.

7. Влияние фокусировки и локальной развертки пучка на формирование швов при электроннолучевой сварке / В.В.Ардеентов, В.И.Загорников, С.Н.Ковбасенко и др. // Судостроит. пром - сть. - 1986. - N 1. - С. 69-72.

8. Особенности усталостных изломов соединений высокопрочных сталей, выполненных электроннолучевой сваркой / С.Н.Ковбасенко, В.И.Загорников // Автомат. сварка. - 1986. - N 12. - С. 8 - 11.

9. Ударная вязкость сварных соединений из сталей 12Х2Н4МД и 14ХНЗМД, выполненных электроннолучевой сваркой / В.И.Загорников // Сб. науч. трудов N 137. Производство деталей и узлов энергетического оборудования и контроля качества материала. М: МЭИ, 1987.

10. Структурные превращения в высокопрочной стали 12Х2Н4МД под воздействием термического цикла электронно-лучевой сварки / В.И. Загорников, В.Г.Васильев, Д.П. Новикова, Т.А. Корниенко // Автомат. сварка. - N 1. - С.13-16.

11. А.с. 1244855 СССР, МКИ³ В23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / В.И.Загорников, С.Н.Ковбасенко, О.К.Назаренко и др. Не публ.

12. А.с. 1280786 СССР, МКИ³ В23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / В.И.Загорников, С.Н.Ковбасенко, В.И.Шаловал и др. Не публ.

13. А.с. 1552060 СССР, МКИ³ В23К 15/00. Образец с надрезом для испытаний сварного соединения на ударный изгиб / А.Н. Виноцкий, В.И. Загорников, Е.И.Истомин и др.

Особистий внесок автора. Згідно теми дисертації у співавторстві написані 13 робіт, з них одна - самостійно. В роботі 8 розроблені рекомендації по ЕПЗ високоміцних сталей відносно вибору швидкості зварювання, параметрів розгортки променя, схеми та параметрів процесу подавання присадкового матеріалу, прийомів підвищення працездатності зварного з'єднання. В роботах (1,3,13) автором виконані експериментальні дослідження оцінки впливу термічного циклу на структуру з'єднання, технологічних параметрів ЕПЗ на формування швів (1,4), досліджені питання опору стомленості аварних з'єднань (4) та особливості стомлених в'єднань (8). ~~В роботі 8 розроблені рекомендації по ЕПЗ високоміцних сталей відносно вибору швидкості зварювання, параметрів розгортки променя, схеми та параметрів процесу подавання присадкового матеріалу, прийомів підвищення працездатності зварного з'єднання.~~

Підп. до друку 19.11.93. Формат 60x84/16. Пап. офс, № 2. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,16. Обл.-внд. арк. 0,96. Тираж
100 прим. Зам. 502. Безкоштовно.

ІЕС Ім.Е.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.
ПОД ІЕС Ім.Е.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.

153089

Безкоштовно

Ав 28.669