

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Прохоренко Одарка Володимирівна

УДК 621.791

**РОЗРОБКА ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКЛАДНИХ ПЕРЕРІЗІВ
ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ВІД ЗВАРЮВАННЯ
ПОЗДОВЖНИХ ШВІВ ОДНОМІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі зварювального виробництва Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент **Карпенко Анатолій Степанович**,
Національний технічний університет України “Київський політехнічний
інститут”, доцент кафедри зварювального виробництва.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, академік Національної Академії Наук
України **Лобанов Леонід Михайлович**, Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона Національної Академії Наук України, заступник директора
з наукової роботи, завідувач відділом оптимізації зварних конструкцій,

доктор фізико-математичних наук, професор **Осадчук Василь Антонович**,
Національний університет „Львівська політехніка” МОН України, завідувач
кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення
металоконструкцій.

Провідна установа:

Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова
МОН України, кафедра зварювального виробництва, м. Миколаїв

Захист відбудеться “23” квітня 2007 р. о 15⁰⁰ год. на засіданні спеціалі-
зованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті Украї-
ни “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги,
37, корпус 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного універ-
ситету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, про-
сп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “12” березня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

Головко Л.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одномірні зварні конструкції (ОЗК) поширені в різних областях техніки, зокрема у будівництві, на залізничному та інших видах транспорту, у суднобудуванні, машинобудуванні тощо. Характерною ознакою ОЗК є значно більша довжина одного із габаритних розмірів над двома іншими. Форма поперечного перерізу може бути різною, але переважно він має одну або дві осі симетрії. В багатьох випадках перерізи складаються з елементів прокатного або гнутого профілю. Суттєвим недоліком ОЗК є утворення прогину поздовжньої осі від позацентрово прикладеної усадочної сили внаслідок зварювання поздовжніх швів (ПШ), особливо при пониженій жорсткості конструкції, значній її довжині і порівняно потужних режимах зварювання. Залишковий прогин є найбільш значущим видом залишкової деформації жолоблення для ОЗК і має бути в той чи інший спосіб усунутий з метою підвищення точності виготовлення конструкцій. Використання традиційних способів зменшення прогину передбачає, в основному, зменшення площі поперечного перерізу зони пластичних деформацій скорочення (ЗПДС) шляхом застосування тих чи інших способів охолодження при зварюванні, різних способів зварювання, зварювальної оснастки, попереднього зворотного вигину конструкції, активного її навантаження перед зварюванням, застосування після зварювання теплової правки тощо. Такі способи зменшення прогину переважно є трудомісткими, мало технологічними, дорогими, мало прогнозованими, кінцевий результат часто залежить від досвіду виконання теплової правки конкретним робітником правильником. Все це пов'язано з обмеженими можливостями оперативного розрахунку і аналізу відомими інженерними методами на етапі технологічної підготовки виробництва напружено-деформованого стану (НДС) ОЗК при обраній послідовності зварювання швів, розрахунку технологічних параметрів теплової правки прогину, оптимізації в багатьох випадках погонної енергії зварювання окремих швів так званої другої черги тощо. Вклад відомих вчених в дослідження НДС зварних конструкцій важко переоцінити. Але незважаючи на це, сучасний стан розвитку обчислювальної техніки дає можливість в багатьох випадках для ОЗК розробити нові, більш мобільні і водночас достатньо точні, інженерні методи розрахунку НДС і в такий спосіб розширити сегмент зручних інженерних методів з метою розробки нових підходів для зменшення залишкового прогину ОЗК. Це і визначило актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались відповідно до Державної науково-технічної програми МОН України 5.4 „Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології, обладнання та матеріали для зварних конструкцій і споріднених процесів” за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки „Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” в рамках плану науково-дослідних робіт кафедри зварювального виробництва НТУУ “КПІ” за темою „Підвищення точності виготовлення одномірних зварних конструкцій”, № держреєстрації – 0105U008794, термін виконання – з 01.01.2003 по 31.12.2005 рр. У виконанні досліджень за темою автор приймав участь як відповідальний виконавець теми.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка методу складних перерізів для розрахунку деформацій від зварювання ПШ одномірних конструкцій та йо-

го застосування для розв'язання технологічних задач по зменшенню залишкового прогину.

Для досягнення визначеної мети в роботі вирішені такі задачі:

- розроблена концепція і математична модель для розрахунку на стадії нагрівання максимальних пластичних деформацій скорочення при зварюванні ПШ ОЗК;
- розроблений розрахунковий алгоритм визначення функції поздовжньої усадки металу в околі ПШ ОЗК;
- розроблений новий метод складних перерізів (МСП) для розрахунку залишкових деформацій ОЗК на основі визначення функції усадки при зварюванні ПШ. Метод охоплює весь діапазон можливої жорсткості ОЗК на позацентрове стиснення залишковою усадочною силою і враховує НДС від попередньо зварених швів;
- на основі МСП розроблені розрахункові алгоритми і програми в обчислювальному середовищі MathCAD для розрахунку: залишкового НДС при зварюванні ПШ ОЗК типових поперечних перерізів; параметрів оптимізації погонної енергії зварювання ПШ другої черги за критерієм відсутності залишкового прогину; технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину ОЗК типових поперечних перерізів;
- результати наукових розробок впроваджені на окремих виробничих підприємствах країни, а також в навчальний процес при підготовці інженерно-технічних фахівців у галузі зварювання, в тому числі і на міжнародному рівні.

Об'єкт дослідження – залишковий НДС при зварюванні поздовжніх швів одномірних зварних конструкцій.

Предмет дослідження – розробка на основі визначення функції усадки нового методу розрахунку залишкового НДС при зварюванні ПШ ОЗК та його застосування для оптимізації тепловкладення при зварюванні або теплової правці з метою зменшення залишкового прогину.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводились на основі теорії напружень і деформацій при зварюванні, положень теорії пружності і пластичності, методів математичного моделювання на персональних комп'ютерах.

В експериментальних дослідженнях використовувалось типове обладнання для механічних та зварювальних робіт, прилади для реєстрації параметрів режиму зварювання, спеціальні прилади (деформометри) для вимірювання зварювальних деформацій, перевірені методи експериментального дослідження деформацій при зварюванні, необхідна оснастка для зварювання дослідних зразків, сучасна обчислювальна техніка.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблена концепція і математична модель розрахунку на стадії нагрівання максимальних пластичних деформацій скорочення при зварюванні ПШ ОЗК. Модель призначена для визначення функції усадки і побудови методу складних перерізів для розрахунку залишкового НДС і прогину ОЗК. Метод складних перерізів базується на наближеному визначенні повної деформації у точках зони пластичних деформацій скорочення вздовж проекції на площину зварного з'єднання рухомої квазістаціонарної просторової кривої максимальних температур при зварюванні і забезпечує єдиний підхід до розрахунку залишкових деформацій ОЗК будь-якої жорсткості.

2. Розроблено новий інженерний метод складних перерізів для розрахунку залишкових деформацій при зварюванні ПШ ОЗК. Метод розроблено на основі визначення функції усадки, що відрізняє його від відомих інженерних методів науково обґрунтованістю конфігурації складних розрахункових перерізів і забезпечує більшу точність розрахунку НДС ОЗК, особливо для конструкцій пониженої жорсткості при позацентровому стисненні їх в залишковому стані усадочною силою. Тим самим здійснено розширення сегменту наближених інженерних методів розрахунку НДС для ОЗК.

3. На основі МСП розроблені розрахункові алгоритми і програмне забезпечення: для визначення залишкових деформацій; для оптимізації погонної енергії зварювання ПШ другої черги за критерієм нульового залишкового прогину; для розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину ОЗК типових симетричних поперечних перерізів при зварюванні ПШ.

Практичне значення одержаних результатів. Використання розроблених розрахункових методів дозволяє виконати розрахунок і проаналізувати НДС ОЗК при застосуванні штатної технології зварювання ПШ, при необхідності зменшення або повного усунення залишкового прогину розрахувати оптимальні значення погонної енергії зварювання швів другої черги за наявності такої можливості або розрахувати конструктивно-технологічні параметри теплової правки залишкового прогину і в такий спосіб суттєво підвищити якість виготовлення ОЗК. З використанням розроблених розрахункових методів на підприємстві ВАТ „ХК „Луганськтепловоз” відкориговані технологічні процеси виготовлення зварної балки (креслення 5ЕС.070.409 СБ) електровоза 2ЕЛ-5 завдовжки 17 метрів з поперечним перерізом, складеним з двох швелерів № 16, та зв’язуючої балки коробчатого перерізу грохота ГІЛ-52 на підприємстві ЗАО Луганський машинобудівний завод. Крім того, розроблені розрахункові методи впроваджені в навчальний процес ВНЗ України (НТУУ „КПІ”, Національному університеті “Львівська політехніка”, ТДТУ ім. Пулюя) в рамках вивчення навчальної дисципліни „Напруження та деформації при зварюванні” при підготовці фахівців в галузі зварювання зі спеціальностей 7.092301 (8.092301) – технологія та устаткування зварювання, 7.092302 (8.092302) – зварювальні установки, 7.092303 (8.092303) – технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій, а також для підготовки у Міжгалузевому учбово-атестаційному центрі інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона під егідою Міжнародного Інституту Зварювання персоналу зварювального виробництва за кваліфікаціями: Міжнародний інженер-зварник (IWE), Міжнародний технолог-зварник (IWT), Міжнародний спеціаліст-зварник (IWS).

Особистий внесок здобувача. Дисертація містить результати теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних як особисто автором, так і при його безпосередній участі. Самостійно розроблені розрахункові алгоритми і прикладні програми для визначення: НДС при зварюванні ПШ ОЗК типових симетричних поперечних перерізів на основі функції усадки; параметрів оптимізації за критерієм нульового залишкового прогину погонної енергії зварювання швів другої черги для ОЗК, в яких можливо реалізувати даний підхід; конструктивно-технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину ОЗК, коли спосіб оптимізації погонної енергії зварювання не може бути реалізованим. Самостійно проведені експериментальні

дослідження НДС на зразках з метою перевірки розробленого МСП. У співавторстві розроблялась математична модель та концепція розрахункового методу складних перерізів. В цій роботі автору належать методи розрахунку ширини ЗПДС та визначення максимальних значень пластичних деформацій скорочення на стадії нагрівання при зварюванні ПШ ОЗК.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на II Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, 25-27 червня 2003 р. м. Київ; на міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих наукових співробітників „Сучасні зварювальні і споріднені технології та їх роль у розвитку виробництва”, 28-31 жовтня 2003 р., Україна, м. Миколаїв; на III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, 25-27 травня 2005 р., м. Київ; на науковому семінарі зварювального факультету НТУУ „КПІ”; на щорічних науково-технічних конференціях викладацького складу зварювального факультету НТУУ „КПІ”, 2002 – 2006.

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 10 працях: 6 статей у спеціалізованих виданнях, що увійшли до переліку ВАК України та у 3 збірниках тез доповідей міжнародних науково-технічних конференцій, 1 патент України.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Загальний обсяг роботи включає 157 сторінок, 118 ілюстрацій, 13 таблиць, 4 додатки, список використаних джерел з 94 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і задачі досліджень, показані наукова новизна і практична цінність результатів, приведені відомості про апробацію результатів роботи.

Перший розділ містить аналіз літератури за темою роботи. У ньому наведений огляд сучасного стану інженерних методів розрахунку НДС для ОЗК, які мають досить широке застосування в різних галузях техніки та у будівництві.

Показано, що найбільш значущою деформацією ОЗК від зварювання ПШ є прогин поздовжньої осі конструкції, особливо при її пониженій жорсткості, значній довжині та великій погонній енергії зварювання. Якщо прогин перевищує допустимі значення, він має бути зменшеним технологічними заходами під час зварювання або після нього. Залишковий прогин визначається на основі розрахунку інженерними методами лінійного НДС від зварювання швів. Відомі інженерні методи розрахунку НДС ОЗК деякою мірою вирішують питання визначення НДС, але всі вони мають ті чи інші недоліки, детально розглянуті в роботі.

Показана необхідність розробки нових інженерних методів розрахунку НДС ОЗК на сучасних уявленнях про кінетику деформацій при зварюванні, які були б зорієнтовані на використання зручних і мобільних обчислювальних середовищ для ПК, мали б більший спектр можливостей розрахунку НДС ОЗК і використання їх у вирішенні важливої науково-технічної задачі зменшення залишкового прогину одномірних конструкцій та підвищення їх якості.

Виконано аналітичний огляд існуючих методів зменшення залишкового прогину ОЗК, розглянуто принципів основи методів зменшення прогину. Показано, що всі методи зменшення прогину є наближеними, трудомісткими, мало технологічними, енерговитратними, недостатньо підкріплені розрахунковими методами і потребують проведення подальших досліджень. На підставі літературного огляду обґрунтовано доцільність і необхідність подальших досліджень.

У другому розділі на прикладі несиметричного стикового з'єднання викладені основи розробленого нового більш точного МСП для розрахунку деформацій і залишкового прогину на основі визначення функції усадки при зварюванні ПШ ОЗК. Представлена концепція алгоритму визначення функції усадки, основна ідея і умови розрахунку ширини ЗПДС на основі розв'язання системи рівнянь рівноваги для силових факторів у рухомому квазістаціонарному складному перерізі ОЗК позаду джерела нагрівання та граничних умов для пружної деформації у точках на межі ЗПДС. МСП відноситься до сегменту інженерних методів розрахунку НДС ОЗК і побудований на сучасних уявленнях про механізми утворення НДС при зварюванні. Метод не має обмежень на величину жорсткості ОЗК і може бути застосований для оптимізації тепловкладення при зварюванні або тепловій правці з метою зменшення залишкового прогину. Зупинимось детальніше на математичній моделі МСП.

Виходячи з відомих уявлень про кінетику поздовжніх пружно-пластичних деформацій при зварюванні ОЗК, можна зробити висновок про існування у точках з обох боків шва позаду джерела нагрівання рухомої квазістаціонарної області між двома кривими Γ_b та Γ_m (рис. 1), які є геометричними місцями точок початку утворення (крива Γ_b) і досягнення максимальних значень (крива Γ_m) поздовжніми пластичними деформаціями скорочення. Γ_m є проекцією на площину з'єднання рухомої кривої максимальних температур. Γ_b може бути побудована на основі розрахунку координат snL та snR її точок відповідно ліворуч та праворуч шва для періодично розміщених з заданим інтервалом у часі поперечних перерізів позаду джерела нагрівання. Алгоритм розрахунку передбачає багатократне розв'язування згаданої вище системи рівнянь для періодичної системи відповідних складних перерізів, розміщених у проміжку між джерелом нагрівання і поперечним перерізом, в якому визначається bnL або bnR . Можна припустити, що гілки кривої Γ_m ліворуч і праворуч шва є симетричними відносно осі шва завжди, навіть за умов урахування відбиття теплового потоку від бічних сторін зварного з'єднання у випадку значної асиметрії розміщення шва. Гілки кривої Γ_b будуть симетричними лише для симетричних зварних з'єднань. Крім того, значення snL та snR поперечних координат точок кривої Γ_b залежать від розподілу повної деформації у даному поперечному перерізі. Для ОЗК можна прийняти відповідність повної деформації поперечного перерізу закону площини (у часткових випадках – закону прямої лінії) зі змінними коефіцієнтами в залежності від відстані поперечного перерізу до джерела нагрівання. Точки перетину кривих Γ_b та Γ_m з обох боків шва визначають значення bnL та bnR ширини ЗПДС відповідно ліворуч та праворуч шва. У випадку симетричного з'єднання відрізки bnL та bnR знаходяться в одному поперечному перерізі і рівні між собою. Для несиметричних з'єднань вони мають різні значення і знаходяться у різних поперечних перерізах, хоч здебільшого і віддалених один від другого на незначну відстань.

Складний переріз принципово має бути геометричним місцем точок, для яких є можливість в той чи інший спосіб виразити пружну деформацію на стадії нагрівання, а кількість рівнянь у системі буде дорівнювати кількості невідомих.

В симетричних з'єднаннях периферійна частина складного перерізу (за межами ширини ЗПДС) розміщена у поперечному перерізі ОЗК, де знаходяться відрізки $bnL = bnR = bn$, які визначаються в процесі розв'язування системи рівнянь. На цій частині складного перерізу пружна деформація визначається різницею між повною та температурною деформаціями. Розподіл температур відомий за теорією Рикаліна М.М. В межах ширини ЗПДС від точок перетину кривих Γb та Γm з обох боків шва складний переріз проходить по кривій Γm до точок з максимальною температурою $500^\circ C$ і на даному відрізку поздовжня пружна деформація дорівнює межі текучості $-\varepsilon_s$. Далі вздовж кривої Γm складний переріз продовжується до точок з максимальною температурою $600^\circ C$. На даному відрізку пружна деформація приймається рівною $-\varepsilon_s(T)$ з лінійною залежністю від значення $-\varepsilon_s$ при $500^\circ C$ до 0 при $600^\circ C$. Заключний відрізок складного перерізу з'єднує у відповідному поперечному перерізі поблизу джерела нагрівання ОЗК точки з обох боків шва з максимальною температурою $600^\circ C$, в яких пружна деформація дорівнює нулю.

У загальному випадку несиметричного з'єднання периферійні частини складного перерізу розміщуються в різних поперечних перерізах, для яких залежності для повної деформації будуть мати різні параметри (4 невідомих) і крім того різними будуть значення bnL та bnR (2 невідомих), в той час як кількість рівнянь системи буде дорівнювати 4.

Отже, обмежитись розглядом одного складного перерізу неможливо. Тому в подібних випадках необхідно послідовно розглядати два складних перерізи $abcdefghr$ та $abcdefgnt$, як показано на рис. 1, і розв'язувати послідовно дві системи рівнянь, з яких перша містить 4 рівняння, а друга – 3. Згадані дві системи можна об'єднати в одну з загальною кількістю рівнянь 7. Результатом розв'язування систем є значення 7 невідомих, з яких відбираємо лише 2, а саме bnL та bnR . Розподіл максимальних пластичних деформацій по ширині ЗПДС визначається їх значеннями у точках складного перерізу на інтервалі його збіжності з кривою Γm . Виходячи з уявлень про складові повної деформації, можна записати для точок на кривій Γm залежність для визначення на стадії нагрівання пластичних деформацій скорочення

$$\varepsilon_{ph}(y) = \varepsilon_{fh}(y) - \varepsilon_T(y) - (-\varepsilon_s),$$

де $\varepsilon_{ph}(y)$ - пластична деформація; $\varepsilon_{fh}(y) = g \cdot y + d$ - повна деформація; g і d - параметри повної деформації (визначаються розв'язуванням системи рівнянь для складного перерізу, який частково збігається з даним поперечним перерізом); $\varepsilon_T(y) = \alpha \cdot Tm(y)$ - температурна деформація; α - коефіцієнт температурного розширення; $Tm(y)$ - максимальні температури; $-\varepsilon_s$ - пружна деформація на рівні межі текучості. Залежності для максимальних температур з урахуванням відбиття теплових потоків від бічних сторін з'єднання наведені в роботі.

Шляхом перебору з вибраним інтервалом поперечних перерізів на довжині L_m в межах ЗПДС визначимо розподіл максимальних пластичних деформацій скорочення по ширині ЗПДС. Детальний алгоритм розрахунку викладений в роботі. Характерний вигляд кривої $\epsilon_{ph}(y)$, обмеженої при $T \geq 600^\circ C$, показаний на рис. 2.

Подальша реалізація алгоритму розрахунку відповідно до МСП стосується визначення залишкового НДС. Крива $\epsilon_{ph}(y)$ на рис. 2 розраховується із застосуванням матричного числення і тому вона представлена на основі обчислення вектора-стовпчика своїх значень в залежності від вектора-стовпчика координат точок по ширині ЗПДС. Для подальшого її використання в розрахунках виконується інтерполяція матричних результатів за відомою методикою. Як правило, інтерполяційна крива $fit\epsilon_{ph}(y)$ добре збігається з кривою ϵ_{ph} , що підтверджується коефіцієнтом кореляції Пірсона для векторів ϵ_{ph} та $fit\epsilon_{ph}(y)$, який, зазвичай, дорівнює 1.

Розрахунок НДС для залишкового стану виконується на основі розв'язування системи рівнянь рівноваги силових факторів тепер уже для будь-якого поперечного перерізу ОЗК з доданням граничних умов для пружної деформації у точках на межі зони пластичних деформацій видовження на стадії охолодження. Пластична деформація видовження на стадії охолодження зменшує по висоті епюру пластичних деформацій скорочення ϵ_{ph} (рис. 2). Вигляд залишкової епюри пластичних деформацій скорочення ϵ_{pr} показаний на рис. 3. Залишкові деформації у поперечному перерізі несиметричного стикового з'єднання показані на рис. 4. Порівняння розрахунків з експериментальними даними показує задовільну їх кореляцію. Зварювалось під флюсом симетричне стикове з'єднання із сталі Ст.3 розмірами $1400 \times 350 \times 10$ мм з погонною енергією $q_n = 1,156 \times 10^4$ Дж/см. Зіставлення усадочних сил, визначених МСП, експериментально та іншими методами показано на рис. 5. Найбільше відхилення від експерименту за методами Ніколаєва Г.О., Вінокурова В.О. та Трочуна І.П., а найменше – за методами автора (МСП), Гатовського К.М., Касаткіна Б.С.

У третьому розділі з метою апробації МСП наведені розроблені алгоритми і результати розрахунків НДС ОЗК на прикладі модельних задач про нагрівання поздовжньої крайки штаби (рис.6) за схемами ПШЛД та РЛД та зварювання тавра (рис. 7) за схемою нагрівання ПШЛД. Розглядались такі модельні задачі: а) для штаби (схема ПШЛД) $L = 1000 \text{ см}$, $B = 20 \text{ см}$, $\delta = 1 \text{ см}$ із сталі ВСт. Зсп, погонна енергія нагрівання – $q_n = 1,28 \times 10^4 \text{ Дж/см}$, усадочна сила $P_{yc} = 159,532 \text{ кН}$, залишковий прогин $f = 11,993 \text{ см}$; б) для штаби (схема РЛД) $L = 200 \text{ см}$, $B = 5 \text{ см}$, $\delta = 0,5 \text{ см}$ із сталі ВСт. Зсп, погонна енергія нагрівання – $q_n = 1,833 \times 10^3 \text{ Дж/см}$, усадочна сила $P_{yc} = 22,54 \text{ кН}$, прогин $f = 2,143 \text{ см}$; в) для тавра (схема ПШЛД) із сталі ВСт. Зсп завдовжки $L = 1000 \text{ см}$ з поясом $2B = 20 \text{ см}$, ребром $H = 8 \text{ см}$, товщиною пояса і ребра $\delta = 0,6 \text{ см}$, погонна енергія нагрівання – $q_n = 8,16 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}$, усадочна сила $P_{yc} = 159,927 \text{ кН}$, залишковий прогин $f = 12,014 \text{ см}$. Розподіл повних $\epsilon_{fr}(y)$, пружних $\epsilon_{er}(y)$, і пластичних $\epsilon_{pr}(y)$ деформацій у поперечному перерізі штаби і тавра у залишковому стані показано на рис. 8 і 9. Як видно з рис. 8 і 9, залишковий НДС у штабі і таврі, обчислений за МСП не протирічить загальним уявленням теорії напружень і деформації при зварюванні і відомим з літератури результатам, отриманим за іншими інженерними методами.

У четвертому розділі викладена концепція забезпечення відсутності залишкового прогину ОЗК шляхом оптимізації погонної енергії зварювання швів, так званої, другої черги, розглянуті основи розробки алгоритмів розрахунку параметрів оптимізації, наведені результати розрахунків для модельних задач ОЗК типових поперечних перерізів. Ідея виготовлення ОЗК без залишкового прогину шляхом оптимізації погонної енергії зварювання швів другої черги відноситься до конструкцій, у яких у поперечному перерізі є не менше двох ЗПДС від поздовжніх швів, розташованих по різні сторони центральних осей перерізу. Технологія виготовлення передбачає певну послідовність зварювання швів. Спочатку зварюються шви першої черги з утворенням ЗПДС з однієї сторони центральної осі перерізу і відповідним прогином конструкції. Далі виконується зварювання швів другої черги з утворенням

ЗПДС з другої сторони центральної осі і прогином у протилежну сторону. Сумарний прогин може бути далеким від нульового значення з різних причин, детально розглянутих в роботі. Окрім інших причин, важливе значення для таких ОЗК має процес пластичного видовження в ЗПДС раніше зварених швів першої черги, який значним чином буде впливати на розбаланс сумарного згинального моменту, навіть для осесиметричного перерізу конструкції. Звідси стає зрозумілою ідея оптимізації погонної енергії зварювання швів другої черги, яка має зменшити сумарний згинальний момент до практично нульового значення.

Алгоритм розв'язування подібних задач складається з двох частин. У першій частині на основі МСП розв'язується задача про залишковий НДС для даної ОЗК після зварювання швів першої черги. У другій частині розв'язується оптимізаційна задача. Вводиться один (може бути і більше) параметр оптимізації ψ . Тоді при погонній енергії зварювання швів першої черги q_n , для швів другої черги вона буде дорівнювати $\psi \cdot q_n$. Значення ψ може бути як більше, так і менше 1 і має бути розраховане відповідно до математичної моделі задачі. Сутність математичної моделі полягає в наступному. Для процесу нагрівання при зварюванні швів другої черги і для залишкового стану після цього складається одна об'єднана система рівнянь рівноваги силових факторів у складному перерізі на стадії нагрівання і у будь-якому перерізі в залишковому стані з доданням граничних умов для пружної деформації у точках на межі зони пластичних деформацій видовження в ЗПДС швів першої черги на стадії охолодження. Інколи і на стадії нагрівання необхідно додавати такі умови для точок тих же зон. Необхідність урахування такого процесу на стадії нагрівання перевіряється поточним моніторингом результату розрахунку оптимізаційної задачі і здійснюється відповідною корекцією об'єднаної системи рівнянь.

На етапі розв'язування першої частини задачі залишковий НДС після зварювання швів першої черги розраховується у повній відповідності до МСП стосовно

визначення функції усадки. Знайдена функція усадки в ЗПДС швів першої черги враховується і при складанні рівнянь об'єднаної системи для стадії нагрівання в процесі зварювання швів другої черги і визначення границь ЗПДС швів другої черги. Однак, в ЗПДС швів другої черги в процесі реалізації алгоритму оптимізації параметра ψ , точно визначити функцію усадки за таким же алгоритмом в обчислювальному середовищі MathCAD занадто важко. Тому запропоновано ввести певне спрощення, сутність якого полягає в обчисленні на стадії нагрівання функції усадки не на основі розрахунку значень повної деформації в точках по ширині ЗПДС як таких, що мають місце на кривій Γt , а на основі розрахунку її значень для поперечного перерізу, в якому визначається величина bn в даному елементі конструкції. Таке спрощення за нашими оцінками зменшує в межах до 5 % точність розрахунку залишкового НДС, але з практичної точки зору з цим можна погодитись.

Кількість рівнянь об'єднаної системи може бути різною в залежності від форми поперечного перерізу ОЗК і розмірів кожного з його конструктивних елементів. Нижче для модельних задач, які будуть розглянуті в даному розділі, кількість рівнянь об'єднаної системи буде названа.

Першою розрахована і проаналізована класична модельна задача для штаби з нагрітим крайком, яка вже розглядалась у розділі 3 для схеми нагрівання ПШЛД. Кількість рівнянь об'єднаної системи становить 7 і система має вигляд

$$\left. \begin{aligned} N_h = 0; \quad M_h = 0; \quad N_r = 0; \quad M_r = 0, \\ \varepsilon_{eh2}(y = bn2) = -\varepsilon_s; \quad \varepsilon_{er2}(y = sB2) = \varepsilon_s, \\ \varepsilon_{er2}(y = B - sB1r) = \varepsilon_s. \end{aligned} \right\},$$

де N_h і N_r - осьові сили; M_h і M_r - згинальні моменти поздовжніх напружень відносно осі Z , перпендикулярної до площини штаби; ε_{eh2} і ε_{er2} - пружні деформації. Названі силові фактори відносяться до розрахункових перерізів відповідно на стадіях нагрівання другої крайки (індекс h) і в залишковому стані після її охолодження (індекс r). Знайдене значення $\psi = 1,332$. Це означає, що для отримання штаби без прогину погонну енергію нагрівання другої крайки треба збільшити приблизно на 33 % порівняно з погонною енергією нагрівання першої крайки. Розподіл по перерізу залишкових деформацій без оптимізації і з оптимізацією показано на рис. 10 і 11. Без оптимізації прогин - 3,127 см, з оптимізацією - $5,79 \times 10^{-3}$ см.

Досить поширеним є симетричний двотавровий переріз ОЗК з поясами різної ширини. Алгоритм оптимізації погонної енергії приварювання до ребра другого пояса є значно складнішим. Об'єднана система налічує 15 рівнянь. Супутній моніторинг розподілу деформацій у перерізі на стадії нагрівання і в залишковому стані за результатами розрахунку є обов'язковим. Для двотавра $L = 1000$ см, з поясами $2B = 44$ см і $2D = 20$ см, ребром $H = 10$ см, товщиною всіх елементів $\delta = 1$ см із сталі ВСт. Зсп розроблені алгоритми і програми розрахунку деформацій

та прогину без оптимізації режиму приварювання другого пояса $2D$ та з його оптимізацією. Результати розрахунку показані на рис. 12 і 13. Без оптимізації залишковий прогин $f = 1,224$ см буде в сторону ширшого пояса. З оптимізацією прогин практично відсутній ($f = 0,237$ см). Параметр оптимізації погонної енергії приварювання другого пояса меншої ширини $\psi = 0,452$. Розрахунки параметрів оптимізації за розробленим алгоритмом для різних співвідношень ширини поясів показують зростання ψ із збільшенням ширини $2D$ і зменшення $2B$. Якщо значення $2D$ і $2B$ поміняти місцями, то отримаємо $\psi = 2,592$, що з технологічної точки зору не є прийнятним і в такому разі треба використовувати інші підходи, зокрема теплову правку залишкового прогину.

Широке розповсюдження мають ОЗК коробчастого перерізу, складеного з 4-х елементів у вигляді стінок та поясів, зварених між собою поздовжніми швами у певній технологічній послідовності, наприклад, як показано на рис. 14 цифрами. Попередньо стержень збирається на прихватках і вважається, що в силовому відношенні всі елементи перерізу працюють при зварюванні як єдине ціле, а теплові потоки з одного елемента на інший через не заварені шви не розповсюджуються. Товщина всіх елементів однакова, хоч це питання не є принциповим. Режими зварювання швів 1 і 2 однакові, а швів 3 і 4 оптимізуються за критерієм відсутності залишкового прогину конструкції з розрахунком відповідних параметрів оптимізації ψ_3 і ψ_4 . Приймаємо також припущення, що повна деформація на стадії нагрівання у поперечних перерізах стержня між тими двома крайніми з них, в котрих визначаються відрізки ЗПДС ліворуч і праворуч шва, практично є однаковою і відповідає закону площини, що підтверджується багатьма розрахунками подібних задач. З метою скорочення часу на розрахунки оптимізаційної задачі будемо припускати, що максимальну пластичну деформацію скорочення в межах ширини ЗПДС на стадії нагрівання можна визначати за спрощеним алгоритмом як різницю між повною деформацією поперечного перерізу і сумою температурної та пружної деформацій у точках кривої Γt в межах ширини ЗПДС з обох боків шва.

Об'єднана система рівнянь, складається для стадій нагрівання і залишкових станів при зварюванні швів 3 і 4. При складанні рівнянь можливі помилки концептуального характеру стосовно уявлень про механізми перебігу процесу пружно-пластичного деформування, які необхідно контролювати супутнім моніторингом результату розрахунку на предмет перевищення в ЗПДС окремих елементів перерізу пружною деформацією рівня межі текучості. За наявності такого стану здійснюється корекція відповідних рівнянь системи і розрахунок повторюється заново. Досвід подібних розрахунків свідчить, що помилки зустрічаються досить рідко, а корекція системи рівнянь багато часу не вимагає.

На рис. 15 представлені кінцеві результати розрахунку модельної оптимізаційної задачі для коробчатого стержня із сталі ВСт.3сп при таких початкових даних: розміри перерізу стержня по середній лінії контуру – $B = 15 \text{ см}$, $H = 5 \text{ см}$; товщина $\delta = 0,5 \text{ см}$ поясів і стінок однакова; погонна енергія зварювання швів 1 і 2 $q_n = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}$. Ставилась задача оптимізувати режими зварювання швів 3 і 4 порівняно з режимом зварювання швів 1 і 2, тобто знайти параметри ψ_3 та ψ_4 , а також у порядку моніторингу прослідкувати за кінетикою деформацій в елементах стержня на різних етапах виконання зварних швів. Об'єднана система налічує 48 рівнянь, на жаль достатньо громіздких. Час розв'язування задачі на сучасному ПК складає в залежності від розмірів перерізу орієнтовно 30 – 60 хвилин. Результати обчислень детально наведені в роботі. За розрахунками $\psi_3 = 1,03$, $\psi_4 = 1,136$. Це означає, що погонну енергію зварювання шва 3 практично можна залишити без змі-

ни, а для шва 4 її необхідно збільшити орієнтовно на $\sim 14\%$. При цьому залишковий прогин стержня буде відсутнім, а усадочна сила $P_{yc} = 176,1 \text{ кН}$.

У п'ятому розділі представлена узагальнена математична модель наближеного інженерного методу розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину ОЗК з ортогональним розташуванням конструктивних елементів у поперечному перерізі в тих випадках, коли шляхом оптимізації погонної енергії зварювання окремих швів вирішити це питання не вдається з тієї чи іншої причини. Модель враховує геометричну форму і розміри поперечних перерізів типових ОЗК, а також залишкові пластичні деформації скорочення в ЗПДС швів та їх зміну на стадії нагрівання і охолодження при тепловій правці, що дозволяє в режимах реального часу проводити числові експерименти для дослідження впливу режиму зварювання на такі технологічні параметри теплової правки прогину як ширина зони нагріву, середня температура зони нагріву, координата центра зони нагріву для несиметричних випадків і визначати їх оптимальні значення. Визначальна система рівнянь рівноваги силових факторів та умов для пружної деформації у перерізі ОЗК наведена нижче:

$$\left. \begin{aligned} Nh(nr, B, Si, c, d, e) = 0, \quad Mhx(nr, B, Si, c, d, e) = 0, \quad Mhy(nr, B, Si, c, d, e) = 0, \\ Nr(nr, B, Si) = 0, \quad Mrx(nr, B, Si) = 0, \quad Mry(nr, B, Si) = 0, \\ \varepsilon eh(i = sHhi_1) - \varepsilon_s = 0, \quad \varepsilon eh(i = sHhi_2) - \varepsilon_s = 0, \dots\dots\dots, \\ \varepsilon er(i = sHri_1) - \varepsilon_s = 0, \quad \varepsilon er(i = sHri_2) - \varepsilon_s = 0, \dots\dots\dots \end{aligned} \right\},$$

де c, d, e - параметри повної $\varepsilon fh(x, y, c, d, e)$ деформації поперечного перерізу на стадії нагрівання для правки; B - ширина зони нагріву елемента перерізу; nr - повна залишкова деформація перерізу після правки; Si - координата центра зони нагріву по ширині B (за необхідності); $sHhi_j, sHri_j$ - границі зон пластичного видовження відповідно на стадіях нагрівання (за наявності таких границь відповідно до прийнятої версії про кінетику пластичного деформування) і охолодження; $\varepsilon eh, \varepsilon er$ - пружні деформації на стадії нагрівання і в залишковому стані відповідно; $Nh, Mhx, Mhy, Nr, Mrx, Mry$ - осьові сили і моменти в поперечному перерізі ОЗК відносно осей x та y на стадії нагрівання та в залишковому стані відповідно; ε_s - пружна деформація на рівні межі текучості; $i = x, y; j = 1, 2, \dots$. Повна деформація на стадії нагрівання

$$\varepsilon fh(x, y) = \frac{e - c}{A} \cdot x + \frac{d - c}{B} \cdot y + c, \text{ де } A, B - \text{габаритні розміри поперечного перерізу}$$

ОЗК. Розподіл температури по ширині зони нагріву є лінійним і визначається залежністю:

$$T(i) = \frac{\alpha \cdot T(i)}{\alpha} = \frac{\varepsilon fh(i) - \varepsilon eh - \varepsilon ph_{\min}}{\alpha} = \frac{\varepsilon fh(i) + \varepsilon_s - (nr - \varepsilon_s)}{\alpha} = \frac{\varepsilon fh(i) + 2\varepsilon_s - nr}{\alpha},$$

де α - коефіцієнт лінійного розширення.

На основі створеної математичної моделі розроблені алгоритми і прикладні програми та розв'язані чотири модельні задачі по розрахунку технологічних параметрів теплової правки для таких перерізів ОЗК: прямокутний (штаба), симетричний тавровий, симетричний двотавровий з поясами різної ширини, коробчастий з двома односторонніми боковими швами. В роботі наведені і проаналізовані результати розрахунків, які підтверджують працездатність методу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виготовлення ОЗК з поздовжніми швами в багатьох випадках супроводжується утворенням значного за величиною залишкового прогину поздовжньої осі конструкції, особливо при її пониженій жорсткості на позацентрове стиснення залишковою усадочною силою від зварювання поздовжніх швів.

2. Аналіз відомих інженерних методів розрахунку НДС ОЗК показав, що всі згадані методи мають ті чи інші недоліки, часто концептуального характеру, які в цілому зводять нанівець можливості на сучасному інженерному рівні якісного розв'язання науково-технічної задачі розрахунку НДС конструкції, величини очікуваного її залишкового прогину та оптимізації тепловкладення при зварюванні або тепловій правці з метою зменшення прогину і підвищення в такий спосіб точності виготовлення ОЗК.

3. Методи зменшення залишкового прогину, в основному, є наближеними, орієнтовними, трудомісткими, мало технологічними, енерговитратними, недостатньо підкріплені розрахунковими методами і потребують подальших досліджень.

4. Вперше на основі уявлень про кінетику пружно-пластичного деформування при зварюванні поздовжніх швів ОЗК розроблена математична модель для розрахунку функції усадки і побудови концепції більш точного методу складних перерізів з метою застосування його для визначення НДС, залишкового прогину та оптимізації тепловкладення при зварюванні чи тепловій правці ОЗК.

5. Вперше розроблено, експериментально перевірено і практично апробовано новий більш точний МСП для розрахунку НДС та прогину ОЗК при зварюванні ПШ. МСП розширює сегмент відомих інженерних методів, але концептуально відрізняється від них більш повним урахуванням кінетики пружно-пластичного деформування при зварюванні та наявністю методики розрахункового визначення в процесі розв'язання задачі функції поздовжньої усадки металу в околі зварних швів. Експериментальна перевірка результатів розрахунку усадочної сили за розробленим методом, а також порівняння її з розрахунками за методами інших авторів підтвердили якісну та кількісну адекватність розробленої математичної моделі, а також працездатність розробленого МСП, який більшою мірою узгоджується з результатами експериментів і поширюється на діапазон конструкцій пониженої жорсткості.

6. На основі МСП створені алгоритми і розроблені в математичному пакеті MathCAD прикладні програми для розрахунку НДС ОЗК, оптимізації (за наявності відповідних умов) тепловкладення при зварюванні швів другої черги за критерієм відсутності залишкового прогину, розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину. Характерною особливістю розроблених алгоритмів оптимізації є супутній моніторинг кінетики пружно-пластичних деформацій при зварюванні кожного поздовжнього шва, що дає можливість уникати значних помилок у процесі розрахунків в межах попередньо прийнятих припущень.

7. Показано, що незначне, в межах до 10 %, умовне розрахункове перевищення пружною деформацією рівня ϵ_s в окремих ЗПДС при зварюванні деяких із швів мало впливає на напружено-деформований стан конструкцій та параметри оптимізації погонної енергії зварювання швів другої черги, що дає можливість не проводи-

ти корекцію рівнянь розрахункової системи і тим самим зменшити відповідний обсяг додаткової роботи по розв'язуванню задачі.

8. Вперше розроблено двоваріантний напівобернений метод розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину ОЗК, зумовленого зварюванням поздовжніх швів.

9. Результати досліджень використані на підприємстві ВАТ „ЖК „Луганськтепловоз” при виготовленні зварної балки електровоза 2ЕЛ-5 завдовжки 17 метрів з коробчастим поперечним перерізом із двох швелерів № 16 та на підприємстві ЗАО Луганський машинобудівний завод при проектуванні технології зварювання балки коробчастого перерізу грохота ГЛ-52. Розроблені методи розрахунку також впроваджені в навчальний процес в НТУУ „КПІ”, Національному університеті “Львівська політехніка”, ТДТУ ім. Пулюя, а також при підготовці міжнародних інженерів по зварюванню під егідою Міжнародного Інституту Зварювання у Міжгалузевому учбово-атестаційному центрі інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України при вивченні дисципліни „Напруження та деформації при зварюванні” .

ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Прохоренко О.В. Оптимізація погонної енергії зварювання поздовжніх швів одномірних зварних конструкцій за критерієм відсутності деформації залишкового прогину. // Технологические системы. – 2006. – № 1(33). – С. 62 – 71.

2. Прохоренко О.В. Розрахунок технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину одномірних зварних конструкцій. Повідомлення 1. Конструкції першого типу. // Технологические системы. – 2006. – № 2(34). – С. 55 – 59.

3. Прохоренко О.В. Розрахунок технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину одномірних зварних конструкцій. Повідомлення 2. Конструкції другого типу. // Технологические системы. – 2006. – № 3(35). – С. 78 – 86.

4. Прохоренко О.В. Алгоритми розрахунку деформацій методом складних перерізів при нагріванні поздовжнього крайка штаби. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2006. – № 6(100), частина 1 – С. 32 – 36.

5. Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстро движущимся линейным источником. // Технологические системы. – 2005. – № 4(30). – С. 49 – 55.

Автору належать методи розрахунку ширини ЗПДС та визначення максимальних значень пластичних деформацій скорочення на стадії нагрівання при зварюванні поздовжніх швів ОЗК.

6. Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 2. Нагрев движущимся линейным источником. // Технологические системы. – 2005. – № 5-6(31-32). – С. 46 – 49.

Автору належить узагальнення методу складних перерізів для умов зварювання одномірних конструкцій за схемою лінійного рухомого джерела нагрівання.

7. Патент України 40352 Ф, 7 G01L1/06. „Спосіб визначення ширини зони пластичних деформацій при зварюванні” / Прохоренко О.В. Опубл. 16.07.2001; Бюл. № 6.

8. Прохоренко О.В. Метод криволінійних перерізів для розрахунку ширини зони пластичних деформацій при зварюванні. // II Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”. Збірка тезисів. – К.: 25-27 червня 2003. – С. 35.

9. Карпенко А.С., Прохоренко О.В. Розрахунок температури нагріву при термічній правці прогину зварних балок. // Міжнародна наук. техн. конф. студентів, аспірантів і молодих наукових співробітників „Сучасні зварювальні і споріднені технології та їх роль у розвитку виробництва”. Матеріали конференції, – Україна, м. Миколаїв, 28-31 жовтня 2003. – С. 69.

10. Прохоренко О.В. Розробка нового алгоритму розрахунку ширини зони пластичних деформацій скорочення при зварюванні поздовжніх швів одномірних конструкцій. // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”. – К.: 25-27 травня 2005. – С. 91.

АНОТАЦІЯ

Прохоренко О.В. Розробка та застосування методу складних перерізів для розрахунку залишкових деформацій від зварювання поздовжніх швів одномірних конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені технології. – Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, Київ, 2007.

В роботі представлена математична модель наближеного інженерного методу складних перерізів (МСП) для розрахунку на основі визначення функції усадки залишкового напружено-деформованого стану (НДС) і прогину поздовжньої осі при зварюванні поздовжніх швів (ПШ) одномірних зварних конструкцій (ОЗК) за схемами нагрівання потужним швидкодіючим лінійним джерелом (ПШЛД) та рухомим лінійним джерелом (РЛД). МСП апробовано шляхом розробки алгоритмів, програм та виконанням числових розрахунків НДС і залишкового прогину для модельних задач ОЗК типових поперечних перерізів та співставленням експериментальних результатів з розрахунковими. На основі МСП розроблено математичні моделі, алгоритми та програми для оптимізації погонної енергії зварювання ПШ другої черги за критерієм відсутності залишкового прогину для деяких видів геометричної форми поперечного перерізу ОЗК. Розв’язані числові модельні задачі. Результати розрахунків підтвердили працездатність розробленого методу розрахункової оптимізації тепловкладення при зварюванні за критерієм відсутності залишкового прогину для ОЗК, що мають декілька зон пластичного скорочення у поперечному перерізі. Кореляція розрахункових результатів по залишковому НДС з відомими літературними даними не є суперечливою. Розроблена математична модель методу розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину ОЗК типових поперечних перерізів для випадків, коли оптимізація погонної енергії зварювання швів другої черги неможлива з огляду на особливості геометричних форм деяких видів поперечних перерізів. Розроблені алгоритми, програми та виконані числові розраху-

нки модельних задач теплової правки залишкового прогину для чотирьох видів перерізу. Результати роботи знайшли практичне використання на вітчизняних підприємствах та в навчальному процесі вузів при підготовці фахівців зварювального виробництва.

Ключові слова: одномірні зварні конструкції, поздовжні шви, зварювання, тепла правка, напружено-деформований стан, залишковий прогин, математичні моделі, оптимізація тепловкладення.

АННОТАЦІЯ

Прохоренко Д.В. Разработка и применение метода сложных сечений для расчета остаточных деформаций при сварке продольных швов одномерных конструкций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – Сварка и родственные технологии. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, 2007.

В работе представлена математическая модель инженерного метода сложных сечений (МСС) для расчета на основе определения функции усадки остаточных деформаций и прогиба продольной оси при сварке продольных швов (ПШ) одномерных сварных конструкций (ОСК) для схем нагрева мощным быстродвижущимся линейным источником и подвижным линейным источником.

МСС апробирован путем разработки алгоритмов, программ и выполнением числовых расчетов для модельных задач ОСК типовых поперечных сечений, выполнением экспериментальных исследований на примере симметричного стыкового соединения и сопоставлением экспериментальных результатов с расчетами по МСС, а также инженерным методам других авторов.

Апробация подтвердила работоспособность МСС и лучшую его корреляцию с экспериментальными данными по усадочной силе в сравнении с инженерными методами других авторов, особенно для конструкций пониженной жесткости.

На основе МСС разработаны математические модели, алгоритмы и программы для оптимизации погонной энергии сварки ПШ второй очереди по критерию отсутствия остаточного прогиба для некоторых видов геометрической формы поперечного сечения ОСК: прямоугольник (полоса с двумя нагретыми продольными кромками), симметричный двотавр с поясами различной ширины, коробчатое сечение с четырьмя продольными швами.

Решены числовые модельные задачи. Результаты расчетов подтвердили работоспособность метода расчетной оптимизации тепловложения при сварке некоторых ОСК по критерию отсутствия остаточного прогиба.

Разработана математическая модель метода расчета технологических параметров тепловой правки остаточного прогиба ОСК типовых поперечных сечений для тех случаев, когда оптимизация погонной энергии сварки швов второй очереди невозможна в связи с особенностями геометрических форм поперечных сечений, когда в сечении есть только одна зона пластических деформаций укорочения от сварки ПШ. При несимметричном ее расположении относительно центра сечения ОСК ос-

таточный прогиб большей или меньшей величины будет иметь место всегда и его устранение может быть достигнуто только тепловой правкой.

Разработаны алгоритмы, программы и выполнены числовые расчеты модельных задач тепловой правки остаточного прогиба для четырех видов сечений: прямоугольного (полоса с продольной нагретой кромкой), симметричного таврового (приваривание пояса к ребру тавра), симметричного двутаврового с поясами различной ширины (приваривание поясов к стенке двутавра), коробчатого с двумя односторонними боковыми швами (приваривание стенки к П-образному профилю). В работе приведены и проанализированы результаты расчетов, которые подтверждают работоспособность метода.

Результаты работы нашли практическое использование на отечественных предприятиях ОАО “Холдинговая компания “Лугансктепловоз” при изготовлении сварной балки электровоза 2ЕЛ-5 и ЗАО Луганский машиностроительный завод им. А.Я. Пархоменко при изготовлении связь-балки коробчатого профиля грохота ГИЛ-52, а также в учебном процессе при подготовке специалистов сварочного производства в НТУУ “КПИ”, Национальном университете “Львовская политехника”, ТГТУ им. Пулюя, Межотраслевом учебно-аттестационном центре ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.

Ключевые слова: одномерные сварные конструкции, продольные швы, сварка, тепловая правка, напряженно-деформированное состояние, остаточный прогиб, математические модели, оптимизация тепловложения.

SUMMARY

Prokhorenko D.V. Development and application of complex sections method for the calculation of residual strains by welding longitudinal welds of one-dimensional constructions. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in speciality 05.03.06 – Welding and Allied Technologies. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic institute”, Kyiv, 2007.

The generalized mathematical model of engineering complex sections method (CSM) on basis of shrinkage function for calculation residual strains and long axis flexure by welding longitudinal welds of one-dimensional welded constructions (ODWC) for schemes of heating by powerful fast moving line source and movable line source is produced in this work.

On the basis of CSM work up mathematical models, algorithms and programs for optimization rate of energy input by welding longitudinal welds second order by the criterion of absence residual flexure for some type geometrical shape of ODWC cross-section: rectangular (band with two heated long edge), symmetric H section with band different width, box-shaped section with two or four longitudinal weld.

In that cases, when optimization rate of energy input at welding second order seams is impracticable in view of geometrical sectional shapes singularity the mathematical model for method of calculation technological parameters of thermal correcting residual flexure of ODWC with cross-section standard type is developed.

The algorithms, programmes and numerical calculate model tasks of residual flexure thermal correcting to four type section has been developed and accomplished: rectangular (band with heated long edge), T-shape, H section with band of different width, box-shaped section with two one-sided longitudinal welds.

The results of the work are applied on the national enterprises and in educational processes of college during the training technician of welding engineering.

Key words: one-dimensional constructions, longitudinal welds, welding, thermal correcting, stress and strain mode, residual flexure, mathematical models, optimization of heat-input.