

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

**ПАЩИН**  
*Микола Олександрович*

УДК 621.791:62 — 112.81

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЕМНИХ ПОДОВЖНИХ ЗМІЩЕНЬ  
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ  
І РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЇХ РЕГУЛЮВАННЯ

05.03.06 —  
зварювання та споріднені технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 1997



Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті  
України.

Науковий керівник

Доктор технічних наук  
член-кор. НАН України  
Л.М.Лобанов,  
Заступник директора  
ІЕЗ ім. Е.О.Патона

Науковий консультант

Доктор технічних наук  
М.Л.Жадкевич,  
Заступник директора  
ІЕЗ ім. Е.О.Патона

Офіційні опоненти

Доктор технічних наук  
А.Я.Недосіка,  
Завідуючий відділом  
ІЕЗ ім. Е.О.Патона

доктор технічних наук  
професор  
В.М.Прохоренко,  
Завідуючий кафедрою  
НТУУ "КПІ"

Провідна установа

Конструкторське Бюро "ПІВДЕННЕ",  
м.Дніпропетровськ

Захист відбудеться 26 листопада 1997 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.50.02.01 при Інституті електрозварювання ім. Е.О.Патона НАН України.

Адреса: 252650, м. Київ-5, вул. Боженко, 11.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Інституту електрозварювання ім.Е.О.Патона НАН України за адресою:  
252650, м. Київ-5, вул. Боженко, 11.

Автореферат розісланий "24" жовтня 1997 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук

В.М.Бернадський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Листові конструкції з легких сплавів широко застосовуються в ракето- і суднобудуванні, де основним методом отримання нероз'ємних з'єднань є зварювання. Умови експлуатації даних конструкцій пред'являють високі вимоги до точності їх виготовлення, що передбачає створення відповідних зварювальних технологій.

Одним з маловивчених видів деформацій, що визначають рівень залишкового формозмінення зварних виробів є взаємне поздоажне зміщення (ВПЗ) елементів, що зварюються. Особливо помітний його негативний вплив на точність конструкцій у разі зварювання елементів з різними площами поперечних перетинів або різної жорсткості. Дослідження механізму ВПЗ і розробка методів його регулювання є актуальним при зварюванні конструкцій високої розмірної точності.

Метою роботи є підвищення точності виготовлення зварних тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів на основі дослідження механізму утворення і регулювання взаємних поздоажних зміщень (ВПЗ) елементів, що зварюються.

При цьому вирішуються задачі:

1. Дослідити ВПЗ елементів стикових і таврових з'єднань в процесі їх зварювання і визначити вплив ВПЗ на розмірну точність тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів.
2. Розробити розрахунковий метод визначення ВПЗ елементів стикових і таврових з'єднань за різних геометричних характеристик тонколистових конструкцій.
3. Розробити розрахунковий метод оцінки впливу ВПЗ на залишкове формозмінення тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів.
4. Розробити технологічні способи регулювання ВПЗ при зварюванні тонколистових конструкцій з метою зниження їх напружено-деформованого стану.
5. Розробити технологію виготовлення зварних панелей високої розмірної точності з алюмінієвих сплавів.

## НАУКОВА НОВИЗНА

1. Досліджено механізм утворення ВПЗ при зварюванні стикових і таврових з'єднань з алюмінієвих сплавів. Показано, що значення ВПЗ визначають теплофізичні та механічні властивості матеріалу, геометричні характеристики з'єднання, а також погонна енергія зварювання.

2. Розроблена розрахункова модель, що описує термодформаційні процеси при зварюванні тонколистових конструкцій, що враховує тимчасовий і остаточний ВПЗ елементів, що зварюються. На прикладах стикових і таврових з'єднань з сплаву АМг6 розроблені варіанти розрахункової моделі, що враховують вплив на ВПЗ інтенсивного охолодження і пружного навантаження елементів конструкцій. Розвинена кінцево-елементна методика чисельної реалізації моделі.

3. Досліджено механізм регулювання ВПЗ елементів стикових з'єднань. Встановлено, що зниження ВПЗ стикових з'єднань доцільно досягати інтенсифікацією тепловідведення з поверхні елемента з меншим поперечним перетином.

Встановлено, що при регулюванні ВПЗ інтенсифікацією тепловідведення ефективними теплопоглиначами є тепловідводні пасти і кристалічні теплопоглинаючі стержні. Визначені їх оптимальний склад, що дозволяє досягати такої швидкості охолодження елементів з'єднань, що необхідна для зниження ВПЗ.

4. Встановлено, що поєднання таких технологічних прийомів, як регулювання ВПЗ стінки відносно полиці тавра і попереднього пружного розтягнення елементів тавра, є ефективним методом зниження подовжніх прогинів тонколистових таврових з'єднань.

### ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ

Розроблено для конструкторського бюро «Південне» (м. Дніпропетровськ) технологічні рекомендації виготовлення великогабаритних тонкостінних зварних панелей високої розмірної точності зі сплаву АМг6НПП, для АТ «Завод «Ленінська кузня» (м. Київ) — виготовлення плоских палубних секцій з подовжнім набором зі сплаву АМг5М, для суднобудівного заводу (м. Поті) — виготовлення корпусних конструкцій швидкісних суден зі сплаву АМг5М.

На захист виносяться:

1. Результати дослідження механізму утворення ВПЗ при зварюванні стикових і таврових з'єднань.
2. Розрахункова модель для визначення ВПЗ при зварюванні стикових і таврових з'єднань з алюмінієвих сплавів.
3. Способи регулювання ВПЗ при зварюванні стикових і таврових з'єднань.
4. Технологія виготовлення зварних панелей високої точності з алюмінієвих сплавів.

Апробація роботи

Основні результати дослідження опубліковані. Доповіді зроблено під час наукових конференцій: II конференції молодих вчених і фахівців (Київ, 1988), III Всесоюзного симпозіуму «Технологічні залишкові напруження» (Кутаїсі, 1988), V Міжнародної конференції «Зварні конструкції» (Київ, 1990), Міжнародної конференції «Зварні конструкції» (Київ, 1995), Міжнародної конференції молодих вчених в галузі зварювання і споріднених технологій (Київ, 1988), Регіонального семінару Якутського наукового Центра СВ РАН «Технологія і якість зварювання в умовах низьких температур» (Якутськ, 1997).

Публікації. На тему дисертації опубліковано 19 друкованих праць.

Структура і обсяг роботи.

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків і переліку літератури. Загальний обсяг роботи 146 сторінки машинописного тексту, 55 малюнків, 9 таблиць; перелік літератури — 195 назв.

У вступі визначено актуальність праці, викладено основні положення і мету роботи.

1-й розділ містить огляд сучасних теорій і концепцій дослідження напружено-деформованого стану зварних з'єднань, а також огляд наявних технологій виготовлення тонколистових зварних конструкцій.

У 2-му розділі експериментально досліджено механізм ВПЗ при зварюванні стикових і таврових з'єднань з алюмінієвих сплавів АМг6 і АМг6НПП. Представлені результати дослідження напружено-деформованого стану стикових і таврових з'єднань при різних значеннях ВПЗ.

У 3-му розділі викладено розрахункову модель прогнозування ВПЗ стикових і таврових з'єднань залежно від погонних енергій, виду зварювання, теплофізичних властивостей матеріалу і геометричних характеристик конструкцій.

У 4-му розділі досліджено механізм регулювання ВПЗ стикових з'єднань інтенсифікацією тепловідведення з поверхні елементів, що зварюються. Представлено результат дослідження з регулювання поздовжніх прогинів таврових з'єднань шляхом компенсації ВПЗ у поєднанні з попереднім пружним розтягненням (ПУР) стінки і полиці тавра.

У 5-му розділі — технологічні рекомендації виготовлення тонкостінних зварних панелей зі сплаву АМг6НПП і суднокорпусних конструкцій зі сплаву АМг5М.

У загальних висновках стисло сформульовано результати роботи.

#### КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Ефективні методи зниження рівня залишкових деформацій формозмінення зварних з'єднань дозволяють вдосконалити традиційні методи забезпечення точності зварних тонколистових конструкцій. Задля цього потрібно всебічно вивчити механізми утворення різних типів деформацій і виявити чинники.

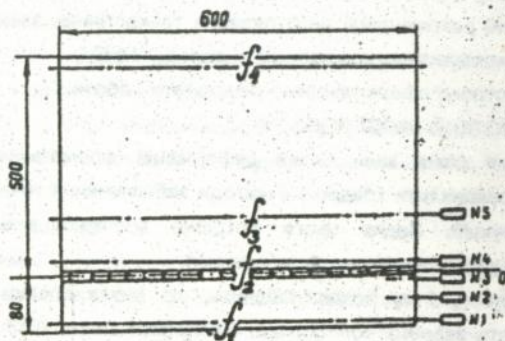
Аналітичний огляд літератури у 1-му розділі свідчить, що низка дослідників оцінювали вплив ВПЗ на точність зварних конструкцій. Зазначали вплив ВПЗ при зварюванні таврових і напусккових з'єднань на крутіття тонколистових конструкцій (В.А.Винокуров), а також на залишкові деформації в площині пластин при зварюванні астик елементів різної товщини (А.М.Касимов). ВПЗ при приварюванні носового обтічника до обшивки факетоносія погіршує складання виробів і стабільність зварного процесу (С.Готт). Прихватки, що їх вживають, щоб запобігти ВПЗ, погіршують формозмінні конструкції, бо спричинюють «вспучення» кромок. Це зауважив Ф.Гловер при приварюванні елементів обшивки до шпангоутного відсіку корпусу ракетоносія та Д.Руді при орбітальному зварюванні тонкостінних трубчастих елементів різних діаметрів.

Приклади впливу ВПЗ на точність конструкцій мають описовий характер. Зазначено конкретні умови зварювання, а не механізм такого впливу загалом. Автори зазначили, що необхідні експериментальні вивчення ВПЗ, які впливають на точність виготовлення тонколистових конструкцій, і нові розрахункові методи прогнозування за властивостями матеріалів, видом зварювання і геометричними характеристиками конструкцій.

У 2-му розділ досліджено механізм ВПЗ стикових і таврових з'єднань тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів.

Для дослідження ВПЗ при зварюванні встик створено лабораторний стенд, що є системою роликів підпор на спільній основі, яка фіксує елементи для зварювання і не дозволяє їм вигинатися.

Досліджено стикове з'єднання зі сплаву АМгб вузької смуги розмірами 600x80 мм, що приварюється автоматичним зварюванням неплавким електродом в аргонному середовищі без прихваток вздовж всього листа з розмірами 600x500 мм. Товщина пластин - 2,5 мм. Співвідношення ширини пластин елементів, що їх зварюють, таке, яке гарантує, що теплові поля в шву і листі істотно різні.



Мал.1. Схема розташування датчиків для вимірювання ВПЗ відносно поздовжньої осі шову при зварюванні встик (лінія О-О), датчики №1 і №5 - на відстані 75 мм, №2 - 40 мм, №3 і №4 - 5 мм,  $f_1$  -  $f_2$  - поздовжні прогини пластин.

Взаємне зміщення поздовжніх елементів при зварюванні встик вимірювали за допомогою індикаторних головок годинникового типу, що встановлюються у певних місцях (мал.1) на поперечних кінцевих кромках смуги і широкого листа.

Автоматичне зварювання зразків виконувалося неплавким електродом в аргонному середовищі. Дані приладів реєстрували під час зварки і після її закінчення. Зварювали у трьох різних режимах (Таблиця 1), які забезпечують повне проплавлення з'єднання. Після зварювання і

оохолодження пластин визначено залишкове формозмінення кінцевих поперечних кромки листа і смуги в площині пластини.

Таблиця 1

Режими автоматичного зварювання встик пластин з алюмінієвого сплаву АМг6

товщиною 2,5 мм

№№ п/п	Напруга зварювання $U_{св}, В$	Струм зварювання $I_{св}, А$	Швидкість зварювання $U_{св}, мм/сек$
1.	18	100	2,5
2.	18	135	4,3
3.	18	170	9,0

Кінетику подовжніх переміщень, що визначають ВПЗ при зварюванні встик на режимах за табл.1, подано на мал. 2(а-в).

Значення подовжніх переміщень у вузькій смузі перевищують аналогічні параметри в широкому листі. Від'ємність ВПЗ фіксується в момент закінчення зварювання, а при охолодженні пластин їх значення зменшується на 15-25% за рахунок релаксації температурного поля  $T(x,y)$  зварювального нагріву.

Геометрія кінцевої поперечної кромки вузької смуги залежить не лише від просадкових зусиль від зварювання, але і від поздовжніх сил, які виникають внаслідок ВПЗ. Залишкові зміщення збільшують значення поздовжніх прогинів (мал.1) пластин.

Таблиця 2

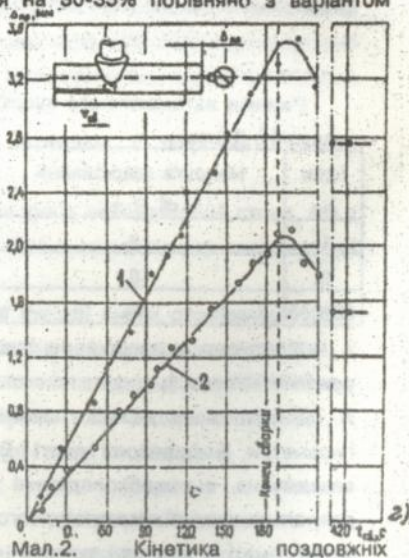
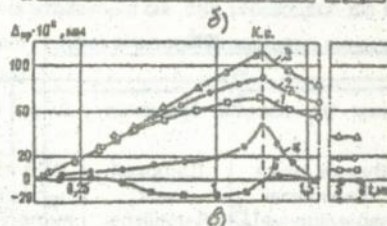
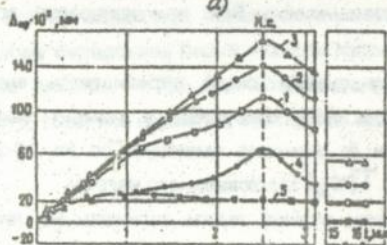
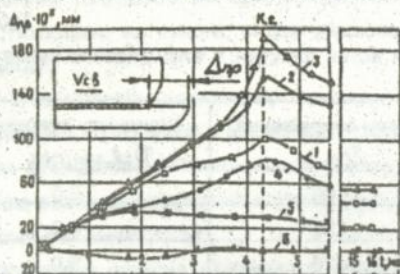
Поздовжні прогини  $f_1 - f_4$ , переміщення  $U_x$ , взаємні зміщення  $\Delta_{пр}$  кромки стикових з'єднань зі сплаву АМг6

№№ п/п.	Швидкість зварювання $U_{св}, мм/сек$	Поздовжній прогин $f_1/f_2/f_3/f_4$ , мм	Вузька смуга. Залишкові переміщення $U_x^3$ зони датчика №3, мм	Широкий лист. Залишкові переміщення $U_x^4$ у зоні датчика №4	ВПЗ кромки листа у зонах датчиків №№3 і 4, мм
1.	2,5	43/28/16/10	0,53	-0,22	0,75
2.	4,3	43/23/7/3	0,45	-0,23	0,68
3.	9,0	20/23/8/0	0,34	-0,18	0,52
4.	4,3 (з прихватками)	45/32/8/4	-0,2	-0,2	0,0

Примітка: номери датчиків та поздовжні зміщення, що їх вимірюють, є на мал.1.

У таблиці 2 є результати, що ілюструють вплив ВПЗ стикових з'єднань на величини їх подовжніх прогинів (режими і умови зварювання зразків див. табл. 1). У дослідних пластинах, ВПЗ яких не обмежено (зварювання без прихваток), помітне зменшення значень поздовжніх прогинів та зменшення ВПЗ (п.п.1-3 табл. 2). Якщо

струмування зміщення в поздовжньому напрямку (зварювання з прихватками п.4 табл. 2), величини прогинів  $f_1-f_4$  підвищуються на 30-35% порівняно з варіантом зварювання, за якого ВПЗ вільні (п.2 табл2).



змінь при зварюванні стикових з'єднань - а, б, в (режими 1-3 табл. 1) і взаємних змінь таврових з'єднань - г (режими табл. 3). Номери кривих при зварюванні встик відповідають номерам датчиків мал. 1, при зварюванні таврових з'єднань 1-АДЗ, 2 - ЕПЗ.

Кінетику поздовжніх змінь при зварюванні таврових з'єднань з сплавів АМГ5М і АМГ6НПП вивчали на лабораторному стенді, що унеможлиблює будь-які зсуви стінки і полиці тавра в процесі зварювання і охолодження, крім поздовжніх (вздовж лінії шва). Фіксувалося поздовжнє зміщення полиці щодо стінки таврового з'єднання. Використовували два види зварювання - плавким електродом в аргонівому середовищі (АДЗ) і електронно-променеве зварювання (ЕПЗ). Режими зварювання і розміри зразків таврових з'єднань є у таблиці 3.

Кінетика ВПЗ при зварюванні таврових з'єднань на мал.2г. Помітно, що із збільшенням довжини шва зростає величина зміщення ребра відносно листа.

Вимірювали поздовжні прогини таврових з'єднань з вільними ВПЗ та з прихватками. Режими зварювання і розміри в таблиці 3. Вимірювали у зоні ребра і вільної кромки листа. Результати вимірювань подані в таблиці 4, з якої видно, що іще на 30% у випадках, коли ВПЗ стримуються, порівняно з випадками, коли ВПЗ не стримуються.

Таблиця 3

## Режими зварювання і розміри зразків таврових з'єднань

№ пп	Матеріал	Вид зварювання	Напруга зварювання $U_{св}, В$	Струм зварювання $I_{св}, А$	Швидкість $U_{св}$ , мм/сек	Струм фокусування $I_{ф}, А$	Розміри зразків, мм	
							лист	ребро
1.	AMr5M	Плавким електро-дом (АДЗ)	20	160-165	40-42	—	200x500x5	200x100x4
2.	AMr6HPP	Електрон-но-променеве зварювання (ЕПЗ)	$60 \cdot 10^{-3}$	$37 \cdot 10^{-3}$	41	710.10	200x350x8	200x50x5

Таблиця 4

## Вплив ВПЗ на поздовжні прогини таврових з'єднань

№№ пп	Вид зварювання	Матеріал	ВПЗ стінки відносно полиці тавра, мм	Повздовжній прогин, $f_1/f_2$ , мм
1.	АДЗ	AMr5M	2,81	37/41
	АДЗ (з прихватками)	AMr5M	0,0	49/53
2.	ЕПЗ	AMr6HPP	2,62	21/22
	ЕПЗ (з прихватками)	AMr6HPP	0,0	29/31

Досліджено залишкові зварні напруження стикових і таврових з'єднань у зразках двох типів, виконаних у режимах таблиць 1 і 3. При зварюванні з'єднань першого типу ВПЗ вільне. Поздовжні розтягуючі напруження у пластинах, виконаних без прихваток, менші 120 МПа; що на 30% нижче, ніж в з'єднаннях з прихватками. При цьому зазначено асиметричність епюри розтягуючих напружень з боку вузької смуги для варіанту зварювання з прихватками, а площа активної зони на смузі перевищує площу активної зони на широкому листі. Температурне розширення пружнопластичної зони смуги більше, ніж на широкому листі (через асиметричність тепловідведення), воно відбувається в поздовжньому напрямку. У той же час наявність прихваток не дозволяє поперечному перетину смуги реалізувати ВПЗ відносно листа. Таким чином, нереалізовані переміщення вузької смуги вздовж повздовжньої кромки листа спричиняють підвищення рівня напруженого стану з'єднання. Вимірювання напружень на зразках таврових з'єднань дуговим і променевим зварюванням показали, що поздовжні напруження за умов вільної реалізації і стримування ВПЗ аналогічні в якісному відношенні стиковим.

Розроблено розрахунковий метод прогнозування ВПЗ і оцінки його внеску в напружено-деформований стан зварних конструкцій. Моделювання ВПЗ складається з трьох окремих послідовних задач.

Перша задача складається з визначення температурних полів стикових і таврових з'єднань. Застосовано прямокутну систему координат  $(x, y)$ , в якій розглядається стикове з'єднання пластин різної ширини, обмежених контуром  $\Gamma$  (мал. 3а). Властивості матеріалу є лінійно термопружними та ізотропними. Теплове поле описуємо рівнянням балансу енергії:

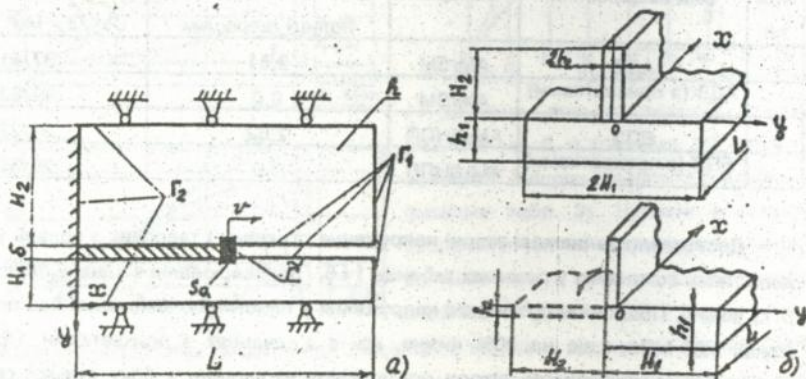
$$C_v \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - (\hat{\gamma}_s^+ + \hat{\gamma}_s^-) (\theta - \theta_0) + q_v \quad (1)$$

де  $\theta$  - усереднена по всій товщині абсолютна температура;

граничною умовою:

$$-k \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y \right) = \gamma (\theta - \theta_0) \quad (2)$$

що описує за нормальним законом тепловідведення з бічних кромek пластин, обмежених контуром  $\Gamma$ , де  $n_x, n_y$  - компоненти вектора зовнішньої нормалі до  $\Gamma$ , а також початковою умовою:  $\theta = \theta_0$ , що задає температурний стан зразка на момент початку зварювання.



Мал.3. Схеми зварних з'єднань, що використовуються в розрахунковій моделі:

а) стикове з'єднання, б) таврове, що перетворюється на стикове.

Дещо відрізняється схема рішення задачі для випадку зварювання таврових з'єднань. Особливість в тому, що вона є трьохмірною. Однак, припущення, що стінка тавра розташовується симетрично в поздовжньому напрямі відносно полиці, дозволяє замінити початкову задачу на плоску за допомогою перетворення геометрії з'єднань, як показано на мал. 3б. Адекватність спрощеної моделі підтверджується узгодженням температурних полів, розрахованих в рамках плоских задач для початкового і перетвореного перетинів зі зварювальним джерелом нагріву в центрі. Схема закріплення таврового з'єднання аналогічна стиковому.

Задача квазістатичної рівноваги включає рівняння рівноваги для плоского напруженого стану:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

кінематичні рівняння:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \epsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Термопружні співвідношення закону Гука:

$$\sigma_x = 2G\epsilon_x, \quad \sigma_y = 2G\epsilon_y, \quad \sigma_{xy} = G\epsilon_{xy}, \quad (\sigma_x + \sigma_y) = 3k(\epsilon_x + \epsilon_y) - 3\alpha(\theta - \theta_0) \quad (5)$$

$\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y, \epsilon_x, \epsilon_{xy}, \epsilon_y$  - відповідно компоненти тензорів напружень і деформацій.

$\sigma_x, \sigma_{xy}, \sigma_y,$

$\epsilon_x, \epsilon_{xy}, \epsilon_y$  - компоненти відповідних девіаторів,

$G$  і  $k$  - відповідно модулі зрушення і об'ємного стиснення,

$\alpha$  - коефіцієнт лінійного теплового розширення.

З схеми, представленої на мал.3а можна бачити, що контур  $\Gamma$  складається з вільного кордону  $\Gamma_1$  і шарнірно опертого кордону  $\Gamma_2$ , тобто  $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ . Ділянки кордону  $\Gamma$  дають можливість реалізувати переміщення в площині пластин, що зварюються, і визначаються граничними умовами:  $\sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y = 0, \tau_{yx} + \sigma_y n_y = 0$  (6)

Ділянки кордону  $\Gamma$  зафіксовані від переміщень жорстким закладенням і шарнірним опиранням. У цьому випадку граничні умови визначаються:  $u_n = 0, \tau_n = 0$  (7)

Тут  $u_n$  - нормальна складова переміщень,  $\tau_n$  - дотична складова вектора напружень,  $n_x$  і  $n_y$  - координати вектора зовнішньої нормалі до ділянок кордону  $\Gamma$ .

Джерело зварювального нагріву є областю, яка переміщається лінією шва зі швидкістю зварювання  $v$ . При цьому має місце рухливу межу  $\tilde{\Gamma}$ , що розділяє заварену і незаварену частини шва.

Для рішення цієї задачі розроблено методику на кінцево-елементному підході.

$$\delta J = 0, \delta \beta = 0$$

$$J = \frac{1}{2} \int_{\tilde{\Gamma}} \int_K \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + 2 \int_C v \theta d\theta + (\hat{\gamma}_s^+ + \hat{\gamma}_s^-) (\theta - \theta_0)^2 - 2\theta q ds + \frac{1}{2} \int_{\tilde{\Gamma}} \int_{\tilde{\Gamma}} (\theta - \theta_0)^2 d\ell \quad (8)$$

$$\beta = \int_{\tilde{\Gamma}} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + 2\sigma_{xy} \epsilon_{xy}) dS - \int_{\tilde{\Gamma}} (t_x u_x + t_y u_y) d\ell \quad (9)$$

де:  $S$  - середина площина пластин,  $t_x, t_y$  - компоненти вектора зовнішнього навантаження;  $t_x = \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y$ ,  $t_y = \tau_{yx} n_x + \sigma_y n_y$ ;  $\delta J, \delta \beta$  - відповідно функціонали балансу енергії і пов'язаного з нею напружено-деформованого стану елементів, що зварюються. Колошовна зона і основний метал з'єднання є сукупністю чотирьох вузлових кінцевих елементів, що згущені в області шва.

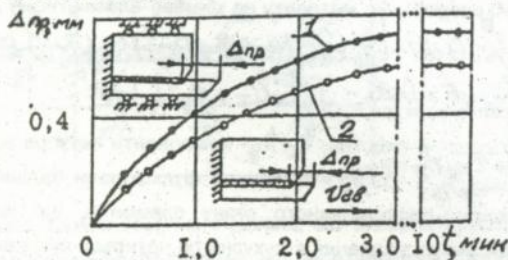
Розподіл температури на певний час використовується для вирішення деформаційної задачі. Якщо функціонал  $\beta = 0$  стаціонарний, тоді вирішується система рівнянь щодо переміщень.

Для точності рішення і зменшення кількості вузлових точок застосовуємо пересувну кінцево-елементну сітку, згущену поблизу джерела тепла. Щоб спростити схему розрахунку всю пластину, включно з незавареною частиною шва, поділено на кінцеві елементи. Вважаємо, що значення теплофізичних і механічних характеристик

групи елементів, що імітують складальний зазор, дорівнюють нулю. Дотримуємося умов теплової ізоляції і вільної межі на кромках з'єднання і вільного пересувного кордону  $\Gamma$  в області джерела нагріву. Таким чином, в звареній частині елементи з'єднання є єдиним цілим і спільно реагують на термодформаційні впливи джерела нагріву. У незвареній частині з'єднання, позаяк дорівнюють нулю фізико-механічні характеристики матеріалу в області складального зазору, кромки, що зварюються, до моменту зварювання деформувалися роздільно, згідно з закономірностями, що описані рівняннями (4-9), причому на кожному кроці підрахунку фіксуємо накопичення ВПЗ більш нагрітої кромки з'єднання.

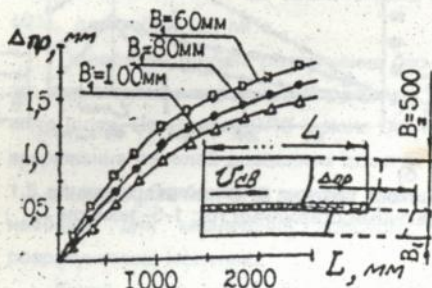
Зіставлено розрахункові і експериментальні дані для стикових і таврових з'єднань, що їх режими зварювання і геометричні характеристики наведені відповідно в таблицях 1 і 3. Точність результатів розрахунку у порівнянні з результатами експерименту, становить 10-12%.

Моделюємо різні варіанти граничних умов закріплення пластин, є розраховуємо ВПЗ. Так, умови закріплення, що відповідають вимогам шарнірноопертої межі  $\Gamma_2$  (рівняння 8), замінюємо на умови вільного кордону  $\Gamma_1$  (рівняння 7). Таким чином, загальні граничні умови опирання контура  $\Gamma$  описано рівнянням 7. Параметри автоматичного дугового зварювання встик зразків відповідають режиму, № 2 таблиці 1. Розміри зразків є на мал. 1, а ВПЗ розраховано як різниця показань датчиків № 3 і № 4. Кінетику ВПЗ за різного закріплення пластин подано на мал. 4. Ця модель дає надійну оцінку залишкового ВПЗ. Умови закріплення пластин впливають як на ВПЗ, так і на значення поздовжніх переміщень.

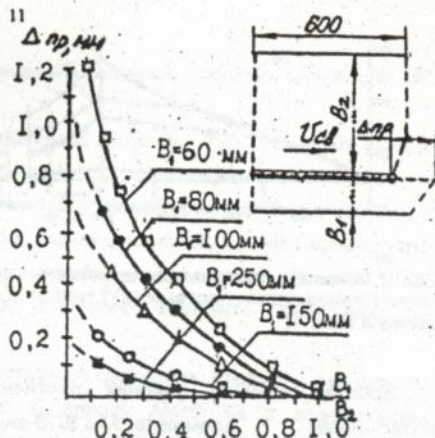


Мал.4. Кінетика ВПЗ при зварюванні встик: 1 - розрахунок в умовах шарнірного опирання поздовжніх вільних кромки; 2 - розрахунок в умовах вільних поздовжніх кромки.

За розрахунками довжина з'єднання  $L$  впливає на поздовжні з'єднання елементів при зварюванні встик. Розраховували залишкові ВПЗ з'єднання смуг різної ширини (60, 80, 100 мм) з листом (500 мм). Зварювання у режимі № 2 таблиці 1. Залежність ВПЗ від довжини зварного з'єднання є на мал. 5.



Мал. 5. Залежність ВПЗ від довжини шва  $L$  при зварюванні встик смуг різної ширини ( $V$  - ширина вузької смуги, мм)



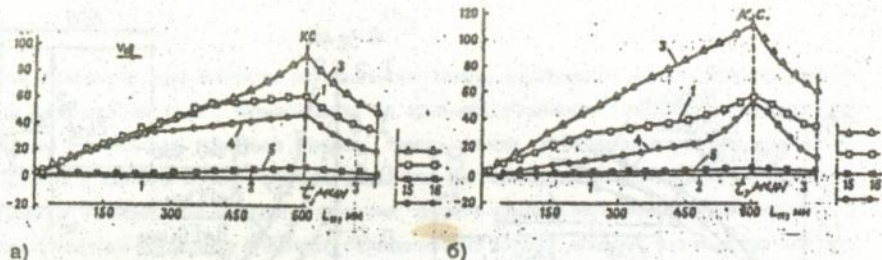
Мал. 6. Залежність ВПЗ від співвідношення ширини пластин, що зварюються.

Значення зростають при збільшенні  $L$  від 0 до 1000-1100 мм, після чого відбувається насичення значень поздовжніх зміщень, тобто на кожний погонний метр шва маємо подібний за величиною приріст ВПЗ. Характеристика формозмінення довгих зварних конструкцій необхідна для визначення величин оптимальних складальних припусків.

Розрахунково оцінено залежність ВПЗ при зварюванні встик від розмірів вузької і широкої пластин на (мал. 6). Маємо різні значення ширини  $B_2$ , в той час як значення  $B_1$  вважаємо фіксованими (рівними 60, 80, 100, 150, 250 мм). Значення  $B_2$  спочатку брали рівними  $B_1$  і потім збільшувалися до 600 мм. З кривих на малюнку можна бачити, що за будь-яких співвідношень  $B_1/B_2$ , якщо  $B_1$  більше за 250 мм, значення ВПЗ надто малі.

Регулювання ВПЗ дозволяє підвищити точність конструкцій. Розрахунково оцінено вплив інтенсивного охолодження на ВПЗ. Охолодження усуває асиметрію тепловідведення до елементів, які зварюються, що дозволяє вирівняти їхні поздовжні переміщення. Брали до уваги, що інтенсивне охолодження при розрахунку є зміною коефіцієнта поверхневої тепловіддачі  $\hat{\gamma}_s^+$  (із зовнішньої поверхні елемента меншої ширини). Коефіцієнт  $\hat{\gamma}_s^+$  використали у рівнянні балансу енергії (1) і його поточні значення зростали доки було асиметричним тепловідведення, що на стадії розв'язання деформаційної задачі виключає ВПЗ.

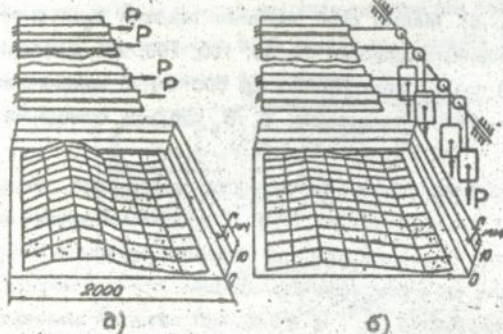
Розроблено способи регулювання ВПЗ з метою зниження напружено-деформованого стану стикових і таврових з'єднань. Основним способом регулювання ВПЗ при зварюванні встик є інтенсивне тепловідведення з поверхні елемента з меншим поперечним перетином. Ефективними для регулювання ВПЗ при зварюванні встик є теплопоглинаючі пасти і кристалічні теплопоглинаючі стержні. Підібрано оптимальні склади паст і стержнів, що зменшують ВПЗ на 45-50%. Мал. 7.



Мал. 7. Кінетика позовжніх переміщень і залишкова картина ВПЗ при зварюванні з теплопоглинаючими пастами (а) і теплопоглинаючими стержнями (б); 1-5- номери датчиків мал. 1.

Зростає точність зварних листових конструкцій з попереднім пружним розтягненням елементів. Але ВПЗ знижує ефективність цього методу, особливо щодо таврових з'єднань.

Розроблено спосіб регулювання ВПЗ таврових з'єднань, що поєднані з попереднім пружним розтягненням. ВПЗ спричинені переміщеннями стінки відносно полиці тавра у перебігу зварювання. Зменшуються зусилля розтягнення ребра  $\epsilon_p$  під час зварювального циклу. Необхідно фіксувати співвідношення поперечного розтягнення стінки і полиці, але вже на початку зварювання розтяжка ребра становить 0,45-0,65 від початкового  $\epsilon_p$ , а в наприкінці зварювання  $\epsilon_p = 0$ . Це призводить до зростання позовжніх прогинів (мал. 8а).



Мал. 8. Профілограми поверхонь панелей зі сплавом АМг6НПП

а) без стабілізації при зварюванні;

б) при стабілізації за рахунок компенсації ВПЗ.

Запропоновано спосіб стабілізації  $\epsilon_p$  під час циклу зварювання і охолодження з'єднання. Це дозволяє забезпечити необхідне співвідношення  $\epsilon_p$  і  $\epsilon_x$  (листа) по всій довжині з'єднання. (мал. 8б).

Об'єктом дослідження є панелі зі сплаву АМг6НПП, кожна з яких складається з листа розмірами 2400x1900x8 мм з привареними до нього ребрами жорсткості розміром 1900x50x5 мм. Відстань між ребрами 170 мм. Панелі виконувалися електронно-променевим зварюванням у режимах таблиці 3. Оптиміальні стабілізовані

зусилля розтягнення, що забезпечують мінімальні позовжні прогини, для листа 165 МПа, для ребра 125 МПа.

Попереднє пружне розтягнення без стабілізації зусилля  $\sigma_p$  елементів панелі, що зварюються електронним променем, спричинює позовжні прогини 2,7-3,0 мм на метр шову. При цьому ВПЗ складо 0,8-0,9 мм/метр. Компенсація ВПЗ під час циклу зварювання панелей дозволила досягти таких значень прогинів, що не перевищують 1,5 мм/метр. Стабілізовано зусилля пружинними силовими елементами. Значення ВПЗ, необхідні для визначення робочого ходу силового елемента, визначено за розрахунковою моделлю.

Такий метод силового впливу на конструкцію дозволив створити технологію зварювання великих тонкостінних панелей зі сплаву АМг6НПП з коефіцієнтом використання матеріалу (КВМ) 0,8. Підвищено КВМ, бо зменшено зону знеміцнювання таврового зварного з'єднання електронним променем. Маємо високі службові характеристики кутових шовів завдяки оптимальній конструкції таврового з'єднання, що її розроблено для променевих методів зварювання.

Ця технологія використана КБ «Південне» (м. Дніпропетровськ) для тонкостінних і оболонкових конструкцій виробів нової техніки.

Регулювання ВПЗ теплопоглинаючими пастами при зварюванні встик дозволило підвищити точність виготовлення корпусних конструкцій швидкісних судів з алюмінієвого сплаву (довжина - 26 м, ширина - 6,1, висота 2,2 м). Корпус судна має багато з'єднань елементів складної форми і різної жорсткості, що спричинює загалом високий рівень деформації конструкції. Охолодження елементів обшивки зменшує позовжній прогин корпусу до необхідної величини. Цей метод регулювання впроваджено на суднобудівному заводі (м. Поті).

#### ВИСНОВКИ:

1. Взаємне позовжнє зміщення елементів при зварюванні стикових і таврових з'єднань є одним з визначальних чинників, що впливають на напружено-деформований стан тонколистових зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів. На величину ВПЗ впливають теплофізичні і механічні властивості матеріалу, геометричні характеристики зварних з'єднань і погонна енергія зварювання.

2. Встановлено, що залишкові позовжні напруження і позовжні прогини в стикових і таврових з'єднаннях менші у випадках, коли зміщення мають можливість вільної реалізації, порівняно з варіантами, коли зміщення стримуються. Для стикових з'єднань з сплаву АМг6 і таврових з'єднань зі сплавів АМг5М і АМг6НПП зменшення напружень і прогинів у разі реалізації зміщень сягає 25-30%.

3. Розроблена розрахункова модель прогнозування ВПЗ при зварюванні стикових і таврових з'єднань тонколистових конструкцій і кінцево-елементна методика її чисельної реалізації. Показано, що при збільшенні довжини з'єднання до

певного розміру  $L$  відбувається зростання значень поздовжніх зміщень до величини, що задається механічними, теплофізичними властивостями матеріалу, геометрією з'єднання і режимом зварювання, а при перевищенні розміру  $L$  відбувається насичення значень поздовжніх зміщень, тобто на кожний погонний метр шва має місце рівний приріст значень ВПЗ. Встановлено, що при збільшенні ширини елементів, що зварюються, значення ВПЗ зменшуються. Показано, що при зварюванні встик елементів зі сплаву АМг6 шириною до 600 мм при збільшенні співвідношення поперечних перетинів від 0,2 до 0,6 величина зміщення зменшується від 1,2 до 0,3 мм, а при подальшому збільшенні близька до нуля.

4. Встановлено, що ефективним способом зниження ВПЗ при зварюванні встик є інтенсивне охолодження елемента з'єднання меншої ширини. Доведена ефективність застосування теплопоглинаючих паст і стержнів для зниження поздовжніх зміщень. Розроблені склади паст і стержнів, що забезпечують високу швидкість охолодження. Показано, що застосування розроблених охолоджуючих систем дозволяє знизити залишкові значення зміщень при зварюванні алюмінієвих сплавів на 45-50%.

5. Встановлено, що при зварюванні таврових з'єднань ефективним методом підвищення точності виготовлення тонколистових конструкцій є попереднє пружне розтягнення елементів, що зварюються в поєднанні з компенсацією ВПЗ. Стабілізація зусилля розтягнення стінки тавра під час циклу зварювання за рахунок пружного навантаження дозволяє компенсувати негативний вплив ВПЗ на конструкцію і знизити поздовжні прогини в 2-3 рази порівняно з варіантом зварювання без компенсації.

6. Розроблено технологію виготовлення великогабаритних тонкостінних панелей високої розмірної точності з алюмінієвого сплаву АМг6НПП, із застосуванням електронно-променевого зварювання у поєднанні з попереднім пружним розтягненням елементів, що зварюються. Технологія зменшує подовжні прогини конструкцій до 0,8 мм на погонний метр шову. Підвищено коефіцієнт використання матеріалу від 0,2 до 0,8.

Основні результати дисертації висвітлені у таких працях:

1. Спосіб з'єднання електрода з струмоведучим стержнем. /Б.А.Задерій, Г.К.Харченко, С.С.Котенко, М.О.Пашин// Авторське свідоцтво № 137435 від 07.04.86.
2. Теплопоглинаючий елемент і склад для його виготовлення /Л.М.Лобанов, В.П.Логинов, М.О.Пашин, В.В.Лисак// Авторське свідоцтво № 1449727 від 28.10.86.
3. Спосіб з'єднання електрода з струмоведучим стержнем /Б.А.Задерій, Г. К.Харченко, С.С.Котенко, М.О.Пашин// Авторське свідоцтво № 15106509 від 04.04.88.

4. Технологія і обладнання для автоматичного бездеформаційного зварювання панельних конструкцій з легких сплавів /М.О.Пашин// II конференція молодих вчених і фахівців: Тези доповідей, Київ, 1988, стор. 38.

5. Регулювання напружено-деформованого стану при зварюванні тонкостінних великогабаритних панелей з високоміцних алюмінієвих сплавів /В.І.Павловський, М.О.Пашин// Матеріали III Всесоюзного симпозіуму «Технологічні залишкові напруження», Кутаїси, 1988, с.293-299.

6. Вплив багатократних підварок електронним променем на механічні характеристики великогабаритних оребрених панелей з високоміцного сплаву АМгбНПП /М.О.Пашин, Г. А.Чайка, С.В.Назаренко// Міжнародна конференція молодих вчених в області зварювання і споріднених технологій: Тези доповідей, Київ, 1988, с.79.

7. Виготовлення зварних великогабаритних тонкостінних панелей з високоміцних алюмінієвих сплавів /Б.Є.Патон, Л.М.Лобанов, В.І.Павловський, М.О.Пашин// журн. "Автоматич. сварка", № 10, 1989 с.28-36.

8. Розробка технології виготовлення зварного корпусу океанської яхти для перегонів «ФАЗИСИ» /В.І.Павловський, М.О.Пашин// Міжнародна конференція «Зварні конструкції»: Тези доповідей, Київ, 1990, с.39.

9. Регулювання термдеформаційних циклів при зварюванні листових конструкцій із застосуванням теплопоглиначів /Л.М.Лобанов, В.І.Павловський, В.П.Логинов, М.О.Пашин// журн. «Автоматич. сварка» № 9, 1990, с.25-31.

10. Спосіб виготовлення зварної ребристої панелі /Л.М.Лобанов, В.І.Павловський, Л.Ф.Чопенко, М.О.Пашин// Авторське свідоцтво №1660908 від 08.03.91.

11. Забезпечення точності виготовлення зварного корпусу океанської яхти для перегонів //В.І.Павловський, Л.М.Лобанов, А.Н.Гриценко, М.О.Пашин// Журн. «Автоматич. сварка» №3, 1993, с.35-41.

12. Підвищення якості таврових з'єднань зварних тонкостінних панелей з нагартованного сплаву АМгбНПП /Л.М.Лобанов, М.Л.Жадкевич, М.О.Пашин// Журн. «Автоматич. сварка» № 1, 1995, с.44-49.

13. Вплив взаємного поздовжнього зміщення елементів, що зварюються, на залишкові формозмінення листових конструкцій з алюмінієвих сплавів /Л.М.Лобанов, В.І.Павловський, М.О.Пашин// Міжнародна конференція «Зварні конструкції»: Тези доповідей, 1995, с.27.

14. Вплив взаємного поздовжнього зміщення елементів, що зварюються на напружено-деформований стан листових конструкцій з алюмінієвих сплавів /Л.М.Лобанов, В.І.Павловський, М.О.Пашин// Журн. "Автоматич. сварка", №3, 1996, с.19-36.

15. Регулювання взаємного поздовжнього зміщення при зварюванні встик тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів за допомогою водовмісних теплопоглиначів /Л.М.Лобанов, В.І.Павловський, М.О.Пашин// Журн. "Автоматич. сварка" №5, 1997, с.17-28.

16. Модель термомеханічного процесу при зварюванні пластин, що їх не згинають, з урахуванням їх відносних зміщень /І.К.Сенченков, Г.А.Табієва, М.О.Пашин, О.П.Червінко// Журн. "Технічна механіка", надійшло до ред.25.03.97.

17. Розрахункова модель для визначення взаємних поздовжніх зміщень при зварюванні тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів /Л.М.Лобанов, В.І.Павловський, В.А.Санченко, М.О.Пашин, І.К.Сенченков, Г.А.Табієва// Журн. «Автоматич. сварка», надійшло до ред. 20.04.997.

18. І.К.Сенченков, Л.М.Лобанов, О.П.Червінко, М.О.Пашин. Закономірності відносних поздовжніх зміщень пластин при стиковому електрозварюванні.// Журн. Доповіді НАН України. Надійшло до ред. 18.07.97.

19. Акустичний контроль зварних швів панелей з алюмінієвих сплавів /М.Л.Жадкевич, Л.М.Лобанов, М.О.Пашин//Регіональний семінар Якутського наукового центру СВ РАН «Технологія і якість зварювання в умовах низьких температур», Якутськ, 1997, с.53-55.

Особистий внесок автора. У (1) показано актуальність вивчення взаємного поздовжнього зміщення /ВПЗ/ при зварюванні стикових і таврових з'єднань для підвищення точності тонколистових зварних конструкцій. У (2) розроблено методику і проведено експериментальні дослідження ВПЗ стикових і таврових з'єднань з алюмінієвих сплавів. У (3) запропоновано методологічний підхід і розроблено граничні умови, що дозволяють моделювати ВПЗ і оцінювати його внесок в залишкове формозмінення. У (4) запропоновано методи регулювання ВПЗ стикових і таврових з'єднань. У (5) розроблено технології виготовлення тонкостінних панелей зі сплаву АМгНПП із застосуванням електронно-променевого зварювання у поєднанні з попереднім пружним розтягненням елементів, що зварюються, а також підвищення точності суднокорпусних конструкцій зі сплаву АМг6.

#### АННОТАЦІЯ

Пашин Н.А. Рукопись диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 «Технология и машины для сварки и смежных процессов» на тему «Исследование взаимных продольных смещений (ВПС) элементов конструкций при сварке и разработка методов их регулирования».

Защищаются результаты экспериментального исследования и регулирования ВПС элементов при сварке стыковых и тавровых соединений, а также расчетный метод для определения ВПС и оценка его влияния на точность сварных конструкций.

Ключевые слова: взаимные продольные смещения, сварные конструкции, стыковые и тавровые соединения, расчетный метод.

#### АНОТАЦІЯ

Пашин М.О. Рукопис дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Технологія та устаткування для зварювання та споріднених процесів» на тему «Дослідження взаємних поздовжніх зміщень (ВПЗ) елементів конструкцій при зварюванні та розробка методів їх регулювання».

Захищаються результати експериментального дослідження і регулювання ВПЗ елементів при зварюванні стикових та таврових з'єднань, а також розрахунковий метод для визначення ВПЗ та оцінка його впливу на точність зварних конструкцій.

Ключові слова: взаємні поздовжні зміщення, зварні конструкції, стикові та таврові з'єднання, розрахунковий метод.

#### ABSTRACT

Investigation of reciprocal longitudinal displacement (RLD) elements of structures during welding and working out methods of it's controls by Paschin N.A. The dissertation of a Candidate of Technical Sciences on the Speciality 05.03.06 - Technology and Equipment for Welding and Related Processes. Patons Institute of Electric Welding, Ukraine, Kiev, 1997.

The results of experimental investigation RLD elements during Welding butt and T-joints and prediction method of determination influence RLD on accuracy of welded structures.

Key words: reciprocal longitudinal displacement, welded structures, butt and T-joints, Prediction method.







434319

AV 38.734