

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

*На правах рукопису*  
УДК 621.791.927.5

**МАЄВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР РУДОЛЬФОВИЧ**

**РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ  
РОЗМІРІВ ШВІВ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ  
ПІД ФЛЮСОМ З КЕРУЮЧИМИ ДІЯМИ**

05.03.06 - Технологія та обладнання для  
зварювання і споріднених процесів

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук

**Маріуполь - 1997**



Робота виконана у Приазовському державному технічному університеті

Науковий керівник - доктор

00752474 (Т)

Розмишляев О.Д.

Науковий консультант - кандидат фізико-математичних наук, професор  
Ярмицький А.Г.

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор

Щетиніна В.І. ;

кандидат технічних наук

Зареченський А.В.

Провідна організація: ГСКТІ концерну "Азовмаш", м.Мариуполь

Захист відбудеться " 6 " 05 1997р. о 14 год. 00 хв.

на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради № КІ4.01.02 Приазовського державного технічного університету за адресою:  
341000, м.Мариуполь, пров.Республіки,7.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці університету.

Автореферат відправлено " 29 " 03 1997р.

Вчений секретар

Спеціалізованої Вченої Ради

доктор технічних наук, професор

В.Я.Зусін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Працездатність зварних з'єднань у значній мірі визначається геометричними розмірами зони проплавлення, формою посилення валика (шва), а також співвідношенням цих розмірів. Основними розмірами стикового з'єднання, що впливають на його якість, надійність та довговічність, з'являються: потрібна глибина провару, ширина шва, висота посилення, кут сполучення основного металу зі швом, мінімальний радіус переходу до основного металу.

Місце переходу від наплавленого валика до основного металу є джерелом концентрації напруг, зокрема, при нанесенні шару емалі на внутрішню поверхню реакторів хімічного виробництва, емаль відлучується в цьому ж місці зварного з'єднання, що змушує застосовувати усунення посилення шва механічним шляхом. Значно розширює можливості керування геометрією валиків (швів) використання поперечних коливань електроду та поперечних й поздовжніх магнітних полів. Але протиріччя літературних даних, що маємо, а також недостатня вивченість процесів взаємодій керуваних магнітних полів із зваривальною дугою та рідким металом ванни не дозволяє використовувати їх з максимальною ефективністю.

Важливим аспектом технології дугового наплавлення й зварювання електродним дротом під флюсом при наявності керуваних дій з'являється можливість теоретичного опису розмірів і форми зони проплавлення та форми посилення валика (шва). Для звичайного процесу (без керуваних дій) розміри зварних швів визначаються за допомогою статистичних, або комбінації теоретичних та експериментальних методів. Однак, ці методи можна вживати тільки у вузькому діапазоні зваривальних режимів та неможливо при наявності керуваних дій. Розвиток систем автоматизованого проектування технологічних процесів також потребує розроблення розрахункових методик, що дозволяють із заданою точністю визначати форму та розміри зварних швів.

Мета роботи полягала у розробленні розрахункової методики для визначення форми і розмірів шва у поперечному перерізі при дуговому зварюванні з керуваними діями.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні науково-технічні завдання:

-розробити модель джерела тепла для розрахунку температур-

них полів у виробі;

-виявити вплив руху рідкого розплаву у зваривальній ванні на температурне поле у виробі;

-дослідити вплив керуваних магнітних полів на геометричні розміри валика (шва);

-розробити методику розрахункового визначення геометричних розмірів валиків й швів при дуговому наплавленні та звариванні під флюсом з керуваними діями;

-оцінити можливість застосування розроблених методів для розрахункового визначення розмірів валика (шва) при дуговому наплавленні (звариванні) під флюсом з керуваними діями.

Наукова новизна. Розроблен метод розрахунку розмірів зваривальної ванни з використанням моделі двох джерел тепла: об'ємного еліпсоїдного джерела, що моделює зону розплавлення під дугою та плоского півеліптичного джерела, що моделює зону кристалізації. Показано, що розрахункові та експериментальні контури зваривальних ванн адекватні при звичайному процесі наплавлення електродним дротом під флюсом, при наплавленні у поздовжньому магнітному полі, а також при наплавленні з поперечними коливаннями електрода. Розроблена узагальнена модель, що дозволяє визначити основні розміри швів при дуговому звариванні стикових з'єднань електродним дротом під флюсом з керуваними діями.

Розрахунковим шляхом, за допомогою тримірної моделі теплопровідності при заданому полі швидкостей, оцінено вплив руху рідкого розплаву на температурне поле у виробі. Показано, що урахування руху рідкого розплаву у зваривальній ванні виявляє вплив, в основному, на довжину і глибину ванни, а вплив його на ширину ванни незначний. Показано, що максимальне відхилення контура, отриманого у результаті розрахунку за методом двох джерел без урахування руху рідкого розплаву, не перевищує 15-20% від експериментального.

Встановлені розміри плями дуги на виробі при дуговому звариванні (наплавленні) під флюсом з керуваними діями, розроблена модель розрахунку деформації рідкого металу під дугою, що відповідає експериментальним даним.

Встановлено, що під час використання постійного й знакоперемінного частотою 50 Гц поздовжнього магнітного поля має місце однакове збільшення ширини валика, що наплавляється, а також однакове зменшення глибини проплавлення основного металу. Це пов'язано зі збільшенням діаметра плями дуги на виробі та змен-

шенням тиску дуги при впливанні поздовнього магнітного поля.

Апробація роботи. Основні положення, наукові та практичні результати роботи доповідались та обговорювались на конференціях та семінарах: "Математические методы и САПР в сварочном производстве" (м.Свердловск, 1990р.); "Региональная научно-техническая конференция" (м.Маріуполь, ММІ, 1992р.); "Термодинамика техпроцессов" (м.Краматорськ, 1992р.); "Термодинамика техсистем" (м.Краматорськ, 1993р.); "Численные методы в гидравлике и гидродинамике" (м.Донецьк, 1994р.); "III региональная научно-техническая конференция" (м.Маріуполь, ПДТУ, 1995р.); на з'єднаному науковому семінарі кафедр "Обладнання та технологія зваривального виробництва" та "Металургія і технологія зваривального виробництва" Приазовського державного технічного університету (м.Маріуполь, 1997р.).

Публікації. З теми дисертації опубліковано 12 праць та зареєстровано 1 авторське свідство на винахід.

Практичне значення. На основі розробленої моделі розрахунку розмірів зварних швів запропоновані оптимальні режими зварювання, конструкції керуючих пристроїв, параметри керуючих дій, що дозволяють ефективно керувати розмірами та формою зварного шва у поперечному перерізі.

Із застосуванням розробленої моделі знайдено оптимальні режими зварювання електродним дротом стикових з'єднань під емальвання на Полтавському заводі "Хімеш", що дозволило зменшити трудомісткість зняття посилення шва у 2 рази. Використування поздовжніх магнітних полів та поперечних коливань електрода при зварюванні стикових з'єднань під емальвання дозволило повністю відмовитися від механічної обробки швів.

Застосування розробок на зазначеному підприємстві дозволило отримати значний економічний ефект.

На захист виносяться:

- математична модель нагріву виробу дугою за допомогою рухомих еліпсоїдного та півеліптичного джерел;
- методика, алгоритм і формули розрахунку розмірів швів при зварюванні та наплавленні з керуючими діями;
- модель та алгоритм розрахунку розмірів зваривальної ванни з урахуванням руху рідкого розплаву;
- можливість застосування методики двох джерел для оптимізації форми та розмірів поперечних перерізів швів при зварюванні стикових з'єднань.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти глав, загальних висновків, списку літератури (180 найменувань) та двох додатків. Робота викладена на 230 машинописних сторінках, містить 52 малюнки та 14 таблиць.

У додатках наведено програми розрахунків на ЕОМ, що розроблені в процесі виконання досліджень, й довідки про економічну ефективність використання наукових розробок у промисловості.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Властивості зварних з'єднань у значній мірі залежать від властивостей металу шва та його геометричних розмірів. Необхідною умовою отримання швів потрібних розмірів, форми та якості є вірний вибір параметрів режиму дугового зварювання. Для поширення можливостей керування геометрією швів використовують поперечні коливання електроду й вплив магнітних полів на зваривальну дугу та ванну. Найбільш об'єктивну оцінку цього впливу можна зробити за допомогою використання розрахункових методів проектування технологічних процесів. Але ж можливості використання керуваних дій при зварюванні й наплавленні електродним дротом під флюсом ще недостатньо вивчені, немає розрахункових методик, дозволяючих адекватно описати форму та розміри зварних швів.

Тепло зваривальної дуги й потоки рідкого металу у зваривальній ванні є основними джерелами, що формують розміри ванни. Ряд дослідників вважає, що формування розмірів зваривальної ванни виникає внаслідок молекулярного теплопереносу, а конвекція розплаву не відіграє важливої ролі у проплавленні. В той же час вплив потоків рідкого металу на проплавлення під час електродугового наплавлення електродним дротом експериментально підтверджено дослідженнями С.В.Гулакова, Б.І.Носовського та інших авторів.

У працях Н.Н.Рикаліна, А.А.Єрохіна, І.Д.Кулагіна та інших авторів висловлювалось уявлення про те, що зваривальна дуга під флюсом являє собою заглиблене об'ємно джерело теплоти. В.А.Петрунічевим та І.В.Кірдо було показано, що точність розрахованих розмірів зваривальної ванни може бути підвищена, якщо врахувати тепло, що припасено у рідкому металі та шлакові й впливає на зону кристалізації. Н.Н.Рикаліним, В.А.Петрунічевим та іншими

авторами було експериментально показано, що розподіл щільності теплового потоку дуги по поверхні та по глибині виробу може бути апроксимовано нормальним законом. Враховуючи це, процес нагрівання виробу при дуговому звариванні (наплавленні) під флюсом моделювали за допомогою двох джерел тепла (рис.1). Перше джерело (зваривальну дугу) - в головній частині ванни - уявляли як еліпсоїдне з об'ємним розподілом теплового потоку. Воно враховує тепловий та силовий вплив дуги на зваривальну ванну. Закон просторового розподілення теплового потоку прийнято у вигляді

$$q_v = q_{vm} e^{-(k_{x1} x^2 + k_{y1} y^2 + k_{z1} z^2)}, \quad (I)$$

де  $q_v$  - об'ємна щільність теплового потоку;

$q_{vm}$  - максимальна об'ємна щільність теплового потоку;

$k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}$  - коефіцієнти зосередженості теплового потоку першого джерела відповідно вісі  $x, y, z$ .

Друге джерело - у хвостовій частині ванни - уявляли у вигляді півеліпса з розподілом щільності теплового потоку по нормальному закону. Воно враховує теплоту перегрітого металу й шлаку, а також виділення прихованої теплоти кристалізації. Закон розподілення теплового потоку другого джерела прийнято у вигляді

$$q_s = \begin{cases} q_{sm} e^{-(k_{xz} x^2 + k_{yz} y^2)}, & x \leq -L \\ 0, & x > -L \end{cases} \quad (2)$$

де  $q_s$  - щільність теплового потоку;

$q_{sm}$  - максимальна щільність теплового потоку;

$k_{xz}, k_{yz}$  - коефіцієнти зосередженості теплового потоку другого джерела відповідно вздовж вісі  $x, y$ ;

$L$  - відстань між центрами теплових джерел.

Форму теплового джерела у зоні плавлення знаходили з вирішення задачі по визначенню розмірів лунки, утвореної під тиском дуги у рідкому металі. Для цього використовували експериментальні дані про діаметр плями нагрівання (дуги) на виробі  $d_T$  та про зусилля дуги на вироб  $F_D$ . Діаметр плями нагрівання на виробі визначали за розробленими методиками з використанням тугоплавких вставок (у виду дрітинок) із вольфраму, або з танталу (рис.2). Під час проходження дуги понад рядом тугоплавких вставок здійснювали вибризування зваривальної ванни. За діаметр плями нагрівання на виробі ( $d_T$ ) приймали ширину порожнини між розплавленими торцями вставок (у перерізі I-I). Обробков експериментальних даних отримано вирази для визначення  $d_T$  та  $F_D$ :

Схема до розрахунку температурного поля у виробі при  
спільній дії еліпсоїдного (1) та півеліптичного (2) джерел тепла

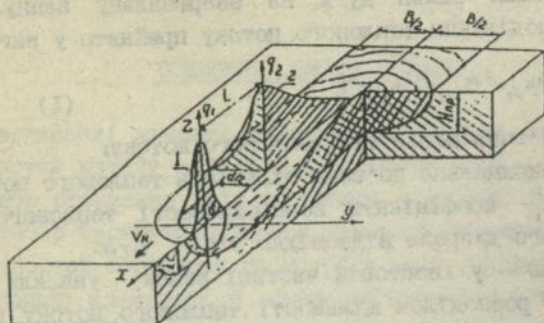


Рис. 1

Схема до визначення теплового діаметра плями дуги на виробі ( $d_T$ )

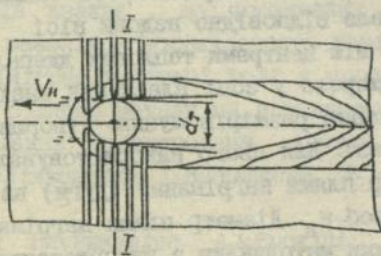


Рис. 2

$$d_{\theta} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; F_{\text{Д}} = 1,25 \cdot 10^{-7} \cdot I_{\text{Н}}^2 \text{ [Н]};$$

$$d_{\text{T}} \cdot 10^3 = -6,67 \cdot 10^{-6} I_{\text{Н}}^2 + 17 \cdot 10^{-3} I_{\text{Н}} - 1,83 - 12(v_{\text{Н}} - 15 \cdot 10^{-3}) - 0,25(U_{\text{Д}} - 34);$$

$$d_{\theta} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; F_{\text{Д}} = 0,76 \cdot 10^{-7} \cdot I_{\text{Н}}^2 \text{ [Н]};$$

$$d_{\text{T}} \cdot 10^3 = -6,67 \cdot 10^{-6} I_{\text{Н}}^2 + 17 \cdot 10^{-3} I_{\text{Н}} - 1,33 - 12(v_{\text{Н}} - 15 \cdot 10^{-3}) - 0,25(U_{\text{Д}} - 34);$$

$$d_{\theta} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; F_{\text{Д}} = 0,44 \cdot 10^{-7} \cdot I_{\text{Н}}^2 \text{ [Н]};$$

$$d_{\text{T}} \cdot 10^3 = -15,56 \cdot 10^{-6} I_{\text{Н}}^2 + 33 \cdot 10^{-3} I_{\text{Н}} - 6,44 - 12(v_{\text{Н}} - 15 \cdot 10^{-3}) - 0,25(U_{\text{Д}} - 34)$$

(3)

де  $d_{\theta}$  - діаметр електродного дроту;

$v_{\text{Н}}$  - швидкість наплавлення (м/с);

$d_{\text{T}}$  - діаметр теплової плями (м).

Значки  $d_{\text{T}}$  й  $F_{\text{Д}}$  визначали форму та розміри лунки за рівнянням рівноваги для вільної поверхні розливу при впливові сил поверхневого натягу, зусилля (тиску) дуги, гравітаційних сил та підпору рідини у підсиленні шва. Теплове джерело у зоні плавлення перетворювали на еліпсоїд з об'ємним розподілом теплового потоку по нормальному закону. Розміри другого джерела визначали за методикою Н.Н.Прохорова. Розрахунком теплового балансу процесу наплавлення електродним дротом під флюсами АН-348А, ОСЦ-45, АН-60 встановлено, що потужність першого джерела складає 70 %, а другого - 16 % від повної потужності, що виділяється зваривальною дугою, незалежно від параметрів режиму наплавлення.

Для постійно діючих за час  $t_{\text{к}}$  рухомих джерел тепла отримано розрахункові вирази для прирощення температури у будь-якій точці виробу у вигляді плоского шару товщиною  $\delta$  з обома горизонтальними адіабатичними межами:

$$\Delta T_1 = \sum_i \int_0^{t_k} \frac{2q_1 \text{ EXP} \left[ -\frac{(x+v\delta t)^2}{4a(t+t_{ox1})} - \frac{y^2}{4a(t+t_{oy1})} \right]}{c\gamma(4\pi a)^{3/2} [(t+t_{ox1})(t+t_{oy1})(t+t_{oz1})]^{1/2}} dt \quad (4)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \text{EXP} \left[ -\frac{(z-2n\delta)^2}{4a(t+t_{oz1})} \right] dt.$$

$$\Delta T_2 = \sum_j \int_0^{t_k} \frac{2q_2 \text{ EXP} \left[ -\frac{(x+v\delta t+L)^2}{4a(t+t_{ox2})} - \frac{y^2}{4a(t+t_{oy2})} \right]}{c\gamma(4\pi a)^{3/2} [(t+t_{ox2})(t+t_{oy2})(t+t_{oz2})]^{1/2}} dt \quad (5)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \text{EXP} \left[ -\frac{(z-2n\delta)^2}{4at} \right] \cdot \left\{ 1 - \text{erf} \left[ (x+v\delta t+L) \sqrt{\frac{t_{ox2}}{4a(t+t_{ox2})}} \right] \right\} dt$$

де  $\sum_i, \sum_j$  - знаки підсумовування відображених теплових і

та  $j$  джерел від бокових поверхнь виробу;

$q_1, q_2$  - ефективні теплові потужності першого та другого джерел;

$$t_{ox1} = 1/(4ak_{x1}); \quad t_{oy1} = 1/(4ak_{y1}); \quad t_{oz1} = 1/(4ak_{z1});$$

$$t_{ox2} = 1/(4ak_{x2}); \quad t_{oy2} = 1/(4ak_{y2});$$

$v$  - швидкість зваривання (наплавлення);

$L$  - відстань до перерізу  $x=-L$ , у якому знаходиться максимум ширини ізотерми плавлення на поверхні.

Прирошення температури у будь-якій точці виробу від дії двох джерел

$$\Delta T_{(x,y,z)} = -\Delta T_{1(x,y,z)} + \Delta T_{2(x,y,z)} \quad (6)$$

За розробленою методикою виконали розрахунок розмірів зварювальних ванн, що задовільно співпали з експериментальними даними (Таблиця I)

Таблиця I  
Геометричні розміри зварювальних ванн

N ванн-ков	Параметри режиму наплавлення			Експериментальні розміри * 10 <sup>3</sup> , м			Розрахункові розміри * 10 <sup>3</sup> , м		
	I <sub>H</sub> А	U <sub>Д</sub> В	v <sub>H</sub> *10 <sup>2</sup> М/С	H <sub>пр</sub>	B	L <sub>B</sub>	H <sub>пр</sub>	B	L <sub>B</sub>
1	550	35	1,00	7,0	13,5	54	6,8	13,4	54
2	500	34	1,83	5,4	11,5	45	5,4	11,1	45
3	800	35	1,67	7,0	12,0	68	6,5	12,0	70
4	800	35	0,89	10,8	15,5	70	10,8	16,0	70
5	500	35	2,50	2,7	9,0	40	2,8	8,80	42

Для оцінки впливу руху рідкого розплава на температурне поле у виробу розглядали нелінійне рівняння теплопровідності із конвективним членом у тримірній системі координат, що пов'язана з джерелом нагріву

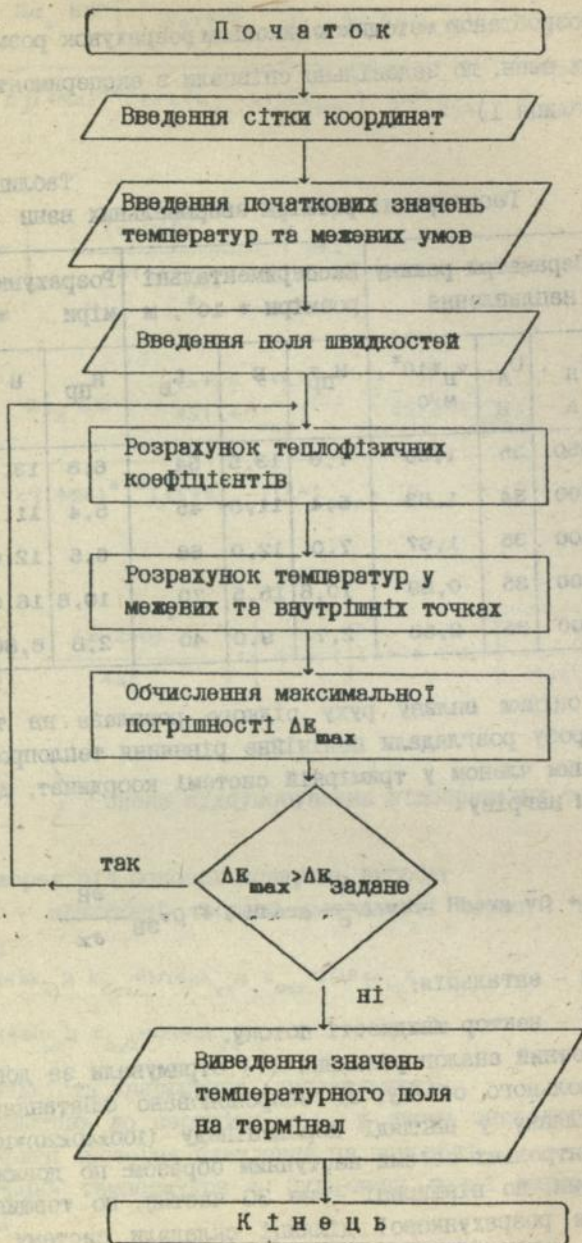
$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \bar{v} \text{grad} H = \text{div} \left( \frac{\lambda}{c} \text{grad} H \right) + \rho v_{зв} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (7)$$

де  $H$  - ентальпія;

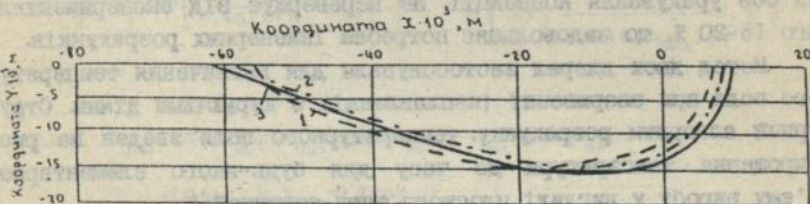
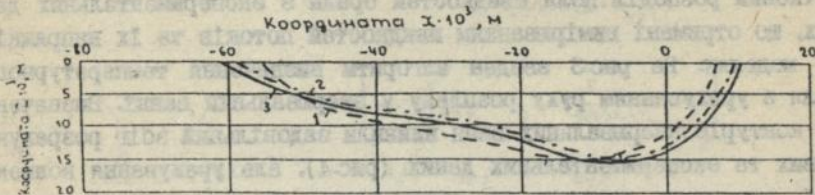
$\bar{v}$  - вектор швидкості потоку.

Дискретний аналог рівняння (7) отримували за допомогою методу контрольного об'єму, що запропоновано С.Патанкарком. Розрахункову ділянку у вигляді паралелепіпеду  $(100 \times 40 \times 20) \cdot 10^{-3}$  м розбивали на контрольні об'єми наступним образом: по довжині виробу - на 50 частин, по півширині - на 30 частин, по товщині - на 10 частин. Для розрахункової ділянки складали систему нелінійних

Блок-схема розрахунку температурного поля у виробі з урахуванням руху розплаву у зваривальній ванні



### Контури зваривальних ванн



$$d_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; I_{3В} = 800 \text{ А}; U_D = 32 \text{ В}; v_{3В} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}; (12 \text{ М/Т});$$

а.-  $y=0$ ; б.-  $z=0$ ;

- 1.- розрахунок без урахування руху розплаву у зваривальній ванні;
- 2.- розрахунок з урахуванням руху розплаву у зваривальній ванні;
- 3.- експериментальні дані.

рівнянь, яка вирішувалась на кожній ітерації методом змінних напрямків по трьох координатах. За допомогою залежності  $n=n(\lambda/c)$  та  $n=n(\rho)$  уточняли значення теплофізичних коефіцієнтів, а також урахували теплоту фазових переходів плавлення та кристалізації. Для прискорення збігу за початковий розподіл температури брали температурне поле, що отримано у результаті застосування запропонованого методу двох джерел для цієї ділянки. Початковий розподіл поля швидкостей брали з експериментальних даних, що отримані вимірюванням швидкостей потоків та їх напрямків на моделях. На рис.3 зведен алгоритм визначення температурного поля з урахуванням руху розплаву у зваривальній ванні. Визначення контурів зваривальних ванн виявили задовільний збіг розрахункових та експериментальних даних (рис.4), але урахування конвекції достатньо складно та трудомістко. Максимальне відхилення контура зваривальної ванни, що розрахований за схемою двох джерел без урахування конвекції, не перевершує від експериментального 15-20 %, що задовольняє потребам інженерних розрахунків.

Метод двох джерел застосовували для визначення температурного поля при звариванні (наплавленні) з керуваними діями. Структурний алгоритм розрахунку температурного поля зведен на рис.5. Прирошення температури до часу для будь-якого елементарного об'єму виробу у вигляді плоского шару товщиною  $\delta$

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{d(\Delta T_{1(x,y,z)})}{dt} + \frac{d(\Delta T_{2(x,y,z)})}{dt} \quad (8)$$

де  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  — приращення температури у точці  $(x,y,z)$ , відповідно, від першого та другого джерел.

Величини  $d(\Delta T_1)/dt$  та  $d(\Delta T_2)/dt$  визначались у наступному вигляді :

$$\frac{d(\Delta T_1)}{dt} = \sum_i \frac{q_i dt}{c\gamma(4\pi a)^{3/2}} \frac{\text{EXP} \left[ -\frac{r_{x1}^2}{4a(t+t_{0x1})} - \frac{r_{y1}^2}{4a(t+t_{0y1})} \right]}{[(t+t_{0x1})(t+t_{0y1})(t+t_{0z1})]^{1/2}}$$

$$* \sum_{n_1=-\infty}^{n_1=+\infty} \left\{ \text{EXP} \left[ -\frac{r_{z1}^2}{4a(t+t_{Oz1})} \right] \left[ 1 + \text{erf} \left( r_{z1} \sqrt{\frac{t_{Oz1}}{4at(t+t_{Oz1})}} \right) \right] \right\} + \quad (9)$$

$$+ \text{EXP} \left[ -\frac{\bar{r}_{z1}^2}{4a(t+t_{Oz1})} \right] \left[ 1 - \text{erf} \left( r_{z1} \sqrt{\frac{t_{Oz1}}{4at(t+t_{Oz1})}} \right) \right] \left. \right\}$$

$$\frac{d(\Delta T_2)}{dt} = \sum_j \frac{2q_2 dt}{c\gamma(4\pi a)^{3/2} [(t+t_{Ox2})(t+t_{Oy2})t]^{1/2}} \frac{\text{EXP} \left[ -\frac{r_{x2}^2}{4a(t+t_{Ox2})} - \frac{r_{y2}^2}{4a(t+t_{Oy2})} \right]}{*} \quad (10)$$

$$* \sum_{n_2=-\infty}^{n_2=+\infty} \left\{ \text{EXP} \left[ -\frac{r_{z2}^2}{4a(t+t_{Oz2})} \right] \right\} \left[ 1 - \text{erf} \left( r_{x2} \sqrt{\frac{t_{Ox2}}{4at(t+t_{Ox2})}} \right) \right]$$

де  $t_{Ox1} = 1/(4ak_{x1})$ ;  $t_{Oy1} = 1/(4ak_{y1})$ ;  $t_{Oz1} = 1/(4ak_{z1})$ ;

$t_{Ox2} = 1/(4ak_{x2})$ ;  $t_{Oy2} = 1/(4ak_{y2})$ ;

$$\sum_i \quad ; \quad \sum_j$$

- знаки підсумовування відображених теп-

лових і джерел (для першого джерела) та  $j$  джерел (для другого джерела) від бокових поверхнь виробу;

$$r_{z1} = [z_{II}(0) + z - z_{II}(t) - 2n\delta] ;$$

$$\bar{r}_{z1} = [z_{II}(0) + z + z_{II}(t) - 2n\delta] ;$$

$$r_{z2} = (z - 2n\delta) ;$$

$$r_{x1} = [x_{II}(0) + x - x_{II}(t)] \cos \alpha_1 + [y_{II}(0) + y - y_{II}(t)] \sin \alpha_1 ;$$

$$r_{y1} = [x_{II}(0) + x - x_{II}(t)] (-\sin \alpha_1) + [y_{II}(0) + y - y_{II}(t)] \cos \alpha_1 ;$$

Блок-схема розрахунку температурного поля у виробі  
при наявності керуваних дій

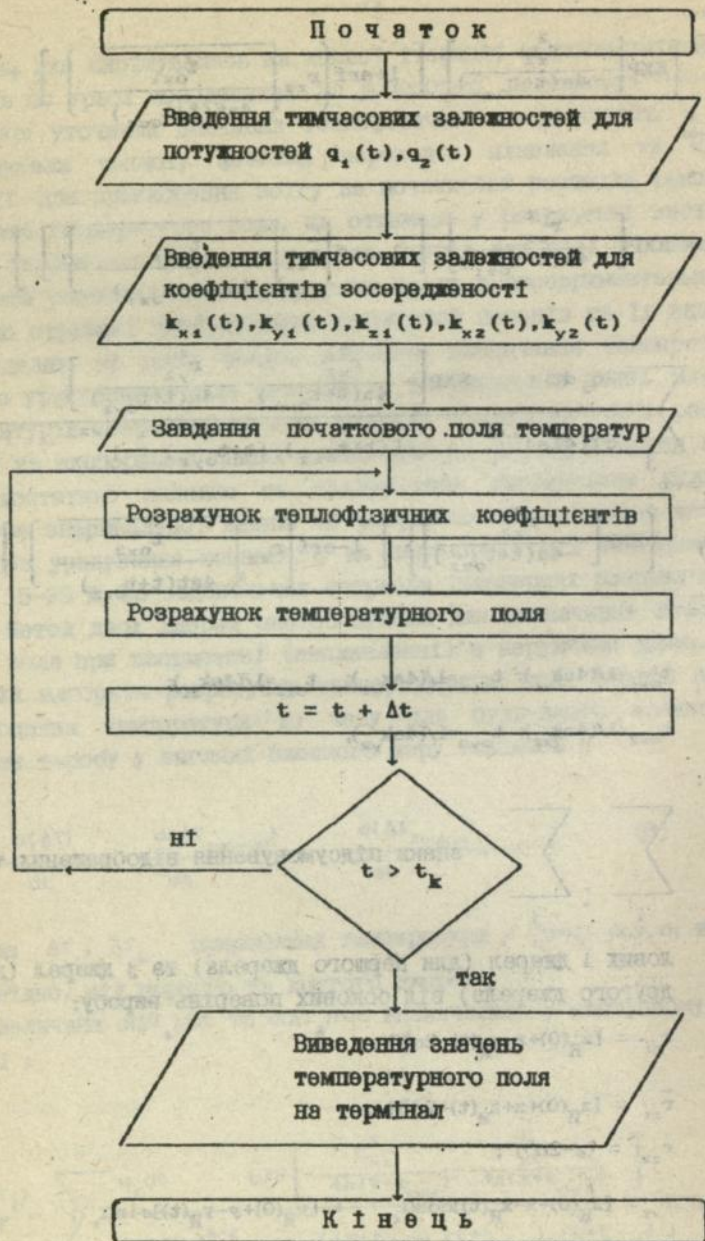


Рис.5

$$r_{xz} = [x_{II}(0) + x_{II}(t_0)] \cos \alpha_2 + [y_{II}(0) + y_{II}(t_0)] \sin \alpha_2;$$

$$r_{yz} = [x_{II}(0) + x_{II}(t_0)](-\sin \alpha_2) + [y_{II}(0) + y_{II}(t_0)] \cos \alpha_2;$$

тут  $x, y, z$  - координати, у яких визначається прирощення температури у рухомій системі координат, що зв'язана із центром першого джерела;

$\alpha_1, \alpha_2$  - кути, утворені додатними напрямками вісі  $x$  та дотичної до траєкторії руху теплового джерела (дуги) у точках, відповідних миттєвому положенню центрів першого та другого джерел (рис-6);

$t_0$  - час розповсюдження теплоти від другого джерела за обліку, що воно рухається то той самій траєкторії, що й перше, але із запізненням на час  $t_{01}$ , який визначався законом руху дуги;

$x_{II}(t), y_{II}(t), z_{II}(t)$  - закон руху теплового джерела (дуги) у нерухомій системі координат.

Інтегрування рівняння (8) проводили від  $t=0$  до  $t=t_K$

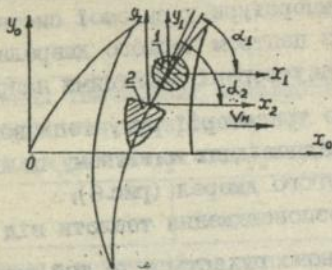
Перевірку запропонованої розрахункової схеми за присутності керуючих дій проводили при наплавленні у поздовжньому магнітному полі (ПДМП) та при наплавленні коливальним електродом. При експериментальному дослідженні встановлено, що постійне й знакоперемінне частотом  $f=50$  Гц ПДМП однаково впливає на геометричні розміри валика (рис-7). При збільшенні діаметра електроду (та однакових параметрах режиму наплавлення) значно збільшується ефект впливу ПДМП на прирощення ширини валика, що пов'язано зі зменшенням поглиблення дуги в основний метал та меншим шунтуванням магнітного поля феромагнітним виробом у зоні дуги. Обробкою експериментальних даних отримано вирези для визначення діаметра плями нагрівання на виробі ( $d_T$ ) та зусилля дуги на основний метал ( $F_D$ )

$$\left. \begin{aligned} d_{\theta} &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & d_T &= d_T + 0,041 \cdot B_z \text{ [мм]}; & F_D &= F_D - 3 \cdot 10^{-4} \cdot I_{H_z} \text{ [Н]}; \\ d_{\theta} &= 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & d_T &= d_T + 0,058 \cdot B_z \text{ [мм]}; & F_D &= F_D - 2 \cdot 10^{-4} \cdot I_{H_z} \text{ [Н]}; \\ d_{\theta} &= 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & d_T &= d_T + 0,175 \cdot B_z \text{ [мм]}; & F_D &= F_D - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot I_{H_z} \text{ [Н]}; \end{aligned} \right\} \text{ (II)}$$

де  $d_T, F_D$  - відповідно діаметр плями нагрівання та зусилля дуги на основний метал без впливу ПДМП;

$B_z$  - поздовжня компонента індукції магнітного поля, Тл.

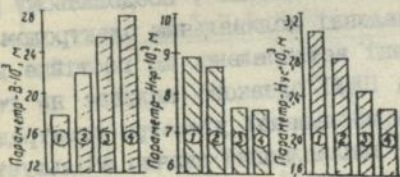
Схема до розрахунку температурного поля у виробі  
при наявності керуючих дій



1.- еліпсоїдне джерело; 2.- півеліптичне джерело.

Рис.6

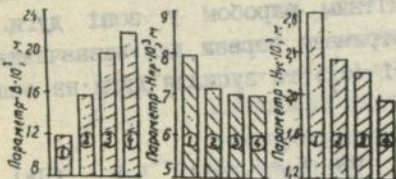
Залежність розмірів нагріваних валків  
від частоти поздовжнього магнітного поля



1- без дії магнітних  
полів;

2,4- з дією ПДМП -  
 $f=4\text{Гц}, f=50\text{Гц}$ ;

3- з дією постійного  
ПДМП



б)

(  $B_z = 20 \cdot 10^{-8}$  Тл );

а.-  $d_{\text{в}} = 5 \cdot 10^{-9}$  м;  $I_{\text{H}} = 750-780$  А;  $U_{\text{Д}} = 34-36$  В;  $v_{\text{H}} = 8,33 \cdot 10^{-8}$  м/с;

б.-  $d_{\text{в}} = 4 \cdot 10^{-9}$  м;  $I_{\text{H}} = 550-570$  А;  $U_{\text{Д}} = 34-35$  В;  $v_{\text{H}} = 1,20 \cdot 10^{-8}$  м/с.

Рис.7

Використуючи дані про  $d_T$  та  $F_d$  робили розрахунок контурів зварювальних ванн й валиків при наплавленні у ПДМП. За пропонованою методикою також розраховували контури зварювальних ванн при наплавленні коливальним електродом. Порівняння розрахункових та експериментальних даних за критерієм Фішера показало адекватність моделі двох джерел при наявності керуючих дій.

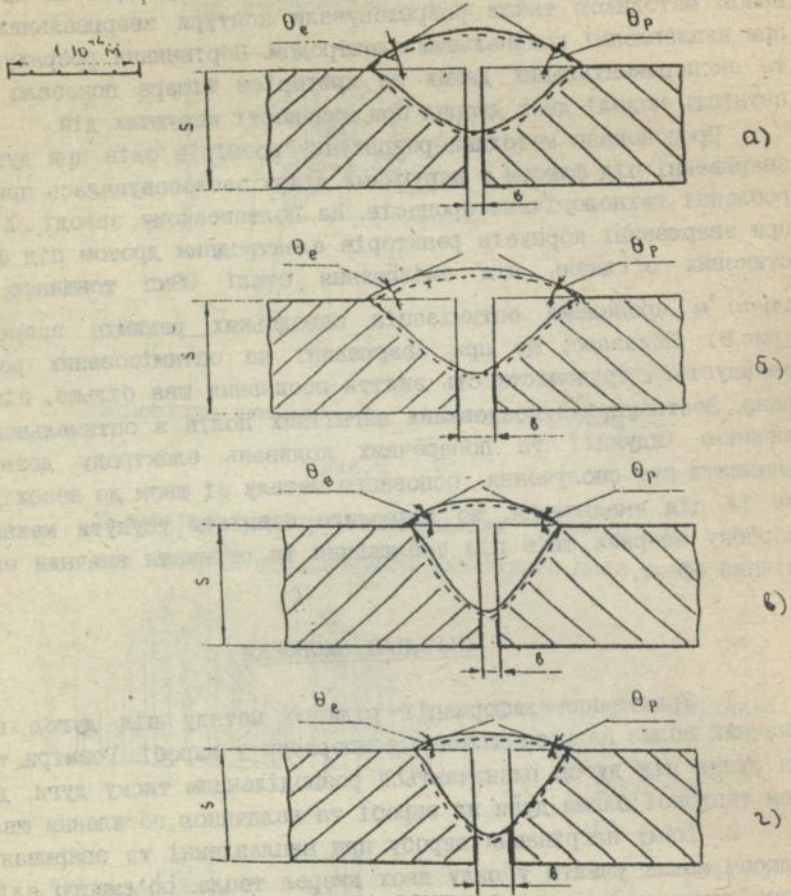
Пропонована методика розрахунку розмірів швів при дуговому зварюванні під флюсом з керуючими діями застосовувалась при розробленні технологічних процесів. На Полтавському заводі "Хімаш" при зварюванні корпусів реакторів електродним дротом під флюсом стикових з'єднань під емалювання сталі 08кп товщиною  $(10-14) \cdot 10^{-3}$  м проведена оптимізація заводських режимів зварювання (рис.8). Показано, що при зварюванні на оптимізованих режимах зменшується трудомісткість зняття посилення шва більше, ніж у 2 рази. Застосування поздовжніх магнітних полів з оптимальною величиною індукції та поперечних коливань електроду дозволили зменшити кут сполучення основного металу зі швом до необхідного за ТУ під емалювання, що дозволило повністю усунути механічну обробку зварних швів під емалювання та отримати значний економічний ефект.

#### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Урахування деформації рідкого металу під дугою виявляє значний вплив на розподілення температур у виробі. Розміри та форма лунки під дугою визначаються розподіленням тиску дуги, діаметром теплової плями дуги на виробі та величиною посилення шва.

2. Схему нагрівання виробу при наплавленні та зварюванні під флюсом можна уявити у виду двох джерел тепла: об'ємного еліпсоїдного джерела, що моделює зварювальну дугу з урахуванням її теплового та силового впливу і поверхневого півеліптичного джерела, що ураховує теплоту перегрітого металу та шлаку, а також виділення прихованої теплоти кристалізації. Застосування метода двох джерел дозволяє отримати певні дані про розміри зони проплавлення при звичайному процесі наплавлення електродним дротом під флюсом, при наплавленні у поздовжньому магнітному полі, а також при наплавленні з поперечними коливаннями електрода. На основі цього методу розроблена модель, що дозволяє визначити температурне поле у виробі при зварюванні та наплавленні під флюсом з керуючими діями. Із

Поперечні перерізи швів стикових з'єднань



$a - b = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; I_{3B} = 465 \text{ А}; U_{Д} = 32 \text{ В}; v_{3B} = 0,95 \cdot 10^{-2} \text{ м/с (34 м/т)}$

$\theta_p = 47,1^\circ; \theta_e = 49^\circ; F_{H(p)} = 24,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; F_{H(e)} = 25,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$

$b - b = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \theta_p = 40,1^\circ; \theta_e = 42^\circ; F_{H(p)} = 20,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; F_{H(e)} = 21,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$

$s = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; I_{3B} = 550 \text{ А}; U_{Д} = 36 \text{ В}; v_{3B} = 1,20 \cdot 10^{-2} \text{ м/с (43 м/т)}$

$b - b = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \theta_p = 36,3^\circ; \theta_e = 38^\circ; F_{H(p)} = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; F_{H(e)} = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$

$\Gamma - b = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \theta_p = 23,4^\circ; \theta_e = 24^\circ; F_{H(p)} = 13,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; F_{H(e)} = 13,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$

— — — — — експериментальні дані;

----- розрахункові дані.

Рис.8

застосуванням статистичних методів виявлено адекватність розрахункової та експериментальної моделей.

3. Вплив руху рідкого розплаву на температурне поле у виробі може бути оцінено за допомогою тримірної моделі по диференціальному рівнянню теплопровідності з конвективним членом при заданому полі швидкостей. Розрахунковим шляхом виявлено, що найбільший вплив руху рідкого розплаву виявляє на довжину та глибину зваривальної ванни, а його вплив на ширину ванни незначний. Максимальне відхилення контура, отриманого у результаті розрахунку за методом двох джерел без урахування руху рідкого розплаву, не перевищує 15-20% від експериментального.

4. Встановлено, що при наплавленні під флюсом ширина валика збільшується, а глибина проплавлення металу зменшується в однаковому ступені при збільшенні індукції постійного й знакоперемінного частотом 50 Гц поздовжнього магнітного поля. Змінення розмірів зони проплавлення пов'язані зі збільшенням діаметра плями дуги на виробі та зменшенням тиску дуги при дії поздовжнього магнітного поля.

5. Застосування розробленої розрахункової методики дозволяє оптимізувати параметри режиму зваривання швів під емалювання, зменшити площу й трудомісткість зняття посилення шва. Застосування розробленої методики при звариванні стикових з'єднань під емалювання у поздовжньому магнітному полі дозволяє оптимізувати режим зваривання, зменшити кут сполучення основного металу зі швом до необхідного та відмовитися від механічної обробки по усуненню посилення шва.

6. Упровадження запропонованих розробок на Полтавському заводі "Хімаш" дозволило отримати значний економічний ефект.

#### ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Маевский В.Р., Размышляев А.Д. Моделирование пространственного распределения теплового потока сварочной дуги // Діп.в УКРНИНТИ №1571 УК-90 от 7.09.90. 12с.
2. Маевский В.Р., Темирбек О.Д., Размышляев А.Д. Расчет размеров сварочной ванны при дуговой наплавке под флюсом при заданной схеме движения электрода // Сварочное производство. 1995. №11. С.21-24.
3. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Методика расчета размеров сварочной ванны при дуговой наплавке под флюсом // Сварочное

производство. 1994. №7. С.20-23.

4 . Размышляев А.Д., Темирбек О.Д., Маевский В.Р. Расчет контура сварочной ванны при наплавке колеблющимся электродом // Математические методы и САПР в сварочном пр-ве. Свердловск: 1990. С.37.

5 . Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Исследование магнитных полей для управления размерами и формирования валиков (швов) при дуговой наплавке (сварке) под флюсом // Тезисы докладов III региональной научно-технической конференции. Мариуполь-ПТУ, 1995. Т.3. С.94.

6 . Размышляев А.Д., Маевский В.Р., Рогачевский А.Х. Совершенствование технологии автоматической сварки швов стыковых соединений под эмалирование // Термодинамика технологических процессов. Краматорск: КИИ, 1992. С.47-48.

7 . Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Технология автоматической сварки под флюсом швов под эмалирование // Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. Т.2. Машиностроение. Мариуполь-ММИ, 1992. С.68.

8 .Размышляев А.Д., Маевский В.Р., Акритов А.С. Моделирование процесса теплопереноса для определения размеров ванны при дуговой сварке под флюсом // Численные методы в гидравлике и гидродинамике. Донецк: ДонГУ, 1994. С.69.

9 . Маевский В.Р., Размышляев А.Д. Сварка швов под эмалирование с поперечными колебаниями электрода // Термодинамика технологических систем. Краматорск: КИИ, 1993. С.129.

10. А.с.1815058 СССР. Устройство для сварки магнитоуправляемой дугой /А.Д.Размышляев, В.Р.Маевский, С.А.Волков и В.Ю.Коваленко. Опубл. в Б.И. 1993. №18.

11. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Моделирование температурного поля пространственно-распределенного источника // Деп.УКРНИИТИ №1570-УК90 от 7.09.90. 10с.

12. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом // Сварочное производство. 1996. №2. С.17-19.

13. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Расчет температурного поля от подвижных пространственно распределенных источников // Вестник ПТУ. Мариуполь: ПТУ, 1996. С.185-188.

*Маевский*

АННОТАЦІЯ

Маєвський В.Р. Розробка методики розрахування розмірів швів при дугової зварки під флюсом з управляючими впливами.

Рукопис. Дисертація на соискание ученої ступені кандидата технічних наук по спеціальності 05.03.06 - "Технологія і обладнання для зварки і родственных процесів". Приазовський державний технічний університет, Маріуполь, 1997.

Розроблена методика розрахування розмірів швів при дугової наплавки і зварки під флюсом з управляючими впливами з використанням моделі двох джерел тепла: об'ємного еліпсоїдного, моделюючого зварочну дугу, і плоского еліптичного, моделюючого зону кристалізації. С допомогою тривимірного нелінійного рівняння теплопровідності з конвективним членом при заданому полі швидкостей виявлено вплив руху рідкого розплаву на температурне поле в изделиї. Досліджено вплив управляючих впливів на геометричні розміри шва, показана адекватність розрахункових і експериментальних даних. Розглянуто застосування розробленої методики для оптимізації параметрів при проектуванні технологічних процесів зварки стыкових з'єднань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: зварювання, методика розрахування, керуючі дії, джерело тепла, магнітне поле.

ABSTRACT

Mayevsky V.R. Development of method of calculation of the weld sizes at submerged arc welding with controlling effects.

Manuscript. The dissertation is presented for Candidate of Sciences degree receiving in the speciality 05.03.06-"Technology and equipment for welding and allied processes".Priazovsky State Technical University, Mariupol, 1997.

Method of calculation for determining the sizes of welds have been developed at arc surfacing and submerged melt welding with using controlling effects with model two sources of heat, simulating welding arc and crystallization zone. With help of a heat transfer equation with convective member at given a field of speeds have been discover influence movement of liquid melt on temperature field in weldment. Influence of controlling effects to geometrical sizes of a weld have been researched. Application of a developed method for optimization of parameters is considered at designing of technological processes of welding butt joints.









AB 37.403