

УДК 621.791.927.5

В. І. Савуляк, д. т. н., проф.; С. А. Заболотний, к. т. н.; Д. В. Бакалець

**МІНІМІЗАЦІЯ ДЕФОРМАЦІЙ ТА ТЕПЛОВИХ ВПЛИВІВ У РАМНИХ
КОНСТРУКЦІЯХ ПІД ЧАС ПРИВАРЮВАННЯ НАКЛАДОК ДЛЯ
ПІДСИЛЕННЯ**

Проблемою відновлення зон рами із тріщинами, що з'явилися, методами зварювання є небезпека пошкодження основного металу за рахунок фазово-структурних перетворень. У роботі з використанням планування багатofакторного експерименту досліджено можливості зменшення температурних перепадів і деформацій, які створюють загрозу появи мікротріщин.

Ключові слова: тріщини, ремонтне зварювання, підсилювання, деформації, регресійний аналіз.

Вступ

Рамні конструкції транспортних і технологічних машин у процесі експлуатації піддаються статичним та динамічним навантаженням, унаслідок яких на певних ділянках виникають тріщини та інші пошкодження [1].

Проблемою підсилення небезпечних зон шляхом установаження додаткових елементів, а також ремонт таких зон із тріщинами, що з'явилися, є небезпека пошкодження основного металу рами за рахунок негативних процесів, які можуть мати місце під час зварювання. До таких процесів належать потужні теплові потоки від зварювальної дуги та напруження й деформації, що виникають при цьому [2 – 3]. Якість і міцність зварного шва (з'єднання) залежить від багатьох чинників, а його форма та розміри в більшості випадків стають визначальними для оцінки цих показників [4 – 5]. Проте в літературі бракує чітких рекомендацій щодо технології виконання зварних з'єднань із метою мінімізації деформацій та напружень.

Метою роботи є пошук можливості керування тепловими потоками та деформаціями в матеріалі деталей, які зварюють, зміною параметрів процесу. У роботах [2 – 4] показано, що на формування полів напружень і деформацій впливає неоднорідність і потужність теплових потоків від процесу зварювання. Одним із чинників впливу на перерозподіл теплових потоків між матеріалом конструкції та навколишнім середовищем є просторове положення електрода відносно поверхонь, які зварюють.

У роботі [6] показано, що кут нахилу електрода впливає на розподіл теплової енергії по об'єму деталі та співвідношення між кількістю поглинутого і розсіяного тепла. Ці чинники впливають на форму, глибину і ширину шва під час зварювання та, насамперед, на зміну величини деформацій конструкції. Розробка рекомендацій щодо вибору раціонального положення електрода за критерієм мінімізації деформацій в процесі зварювання є основним завданням роботи.

Модель зварювання внапуск та основні чинники впливу на цей процес

На температуру конструкції під час зварювання й на деформації, які виникають при цьому, впливає сукупність параметрів процесу [7 – 9]. Проте одні й ті ж температури t в заданій точці на певній відстані l від зварного шва можуть виникнути за різних сукупностей значень параметрів зварювання, а деформації Δ (рис. 1), які є їхнім наслідком, змінюються залежно від часу дії дуги та зміни теплового балансу системи. При цьому буде змінюватися загальна геометрія зварного шва, зокрема глибина проплавлення, катет і коефіцієнт форми провару.

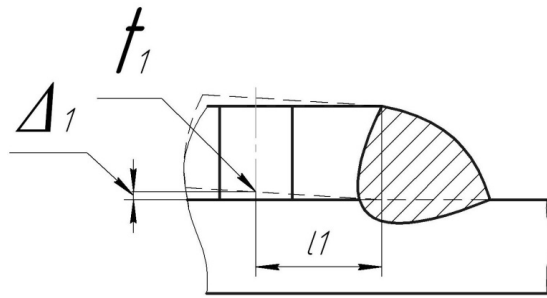


Рис. 1. Основні розрахункові параметри

Розглянемо параметри, які найбільше впливають на температурні поля та деформації у процесі приварювання елементів підсилення внапуск. Із збільшенням товщини металу цих елементів ми змушені пропорційно зменшувати швидкість зварювання. Збільшення діаметра електродного дроту прямо пропорційно збільшує швидкість зварювання, що було встановлено попередніми дослідженнями. Прийнемо як варіативні такі параметри: швидкість зварювання $V_{зв}$, струм I , та просторове положення електроду відносно деталі, яке визначається кутом до осі шва β та кутом у площині, перпендикулярній осі шва α (рис. 2).

Слід зазначити, що кут до осі шва β у процесі зварювання практично не змінюється. Зміна кута α при зварюванні внапуск (рис. 2) найбільшою мірою впливає на форму поперечного перерізу зварного шва (рис. 3) і відповідно на об'єм металу, який необхідно ввести в нього, що й визначає швидкість зварювання.

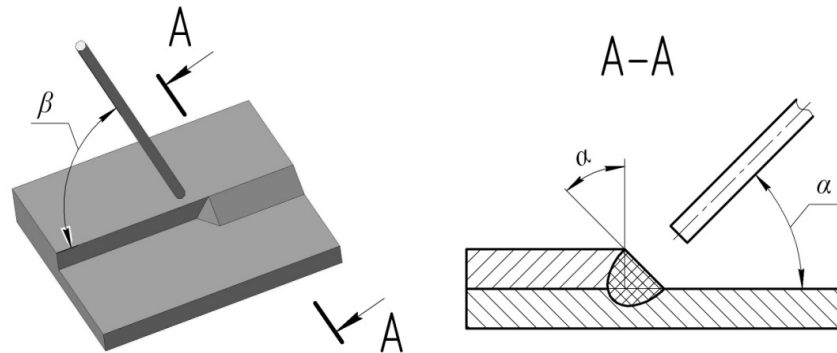


Рис. 2. Кути, що визначають положення електроду в просторі

Значення кута α за [10], можуть коливатися в межах $30 - 60^\circ$. Товщини ремонтних накладок h у більшості випадків не перевищують 10 мм. У таблиці 1 наведено рекомендовані значення швидкості зварювання для різних товщин накладок та кута α .

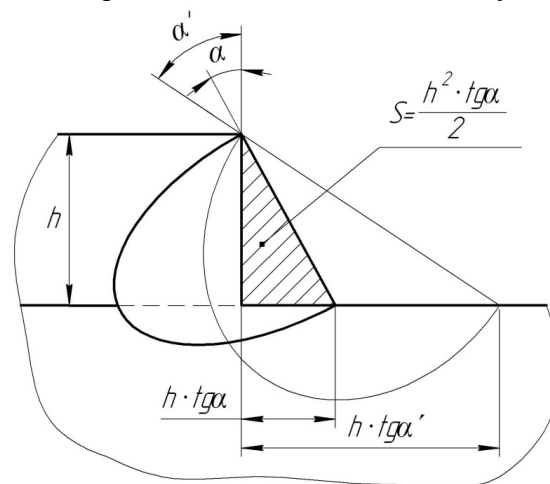


Рис. 3. Поперечний переріз зварного шва

Таблиця 1

Рекомендована швидкість зварювання, м/год

Кут α°	Товщина накладки h , м					
	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,010
30°	39,48	22,21	14,20	9,87	5,55	3,55
35°	32,55	18,31	11,72	8,14	4,58	2,93
40°	27,16	15,28	9,78	6,79	3,82	2,44
45°	22,79	12,82	8,21	5,70	3,21	2,05
50°	19,12	10,76	6,88	4,78	2,69	1,72
55°	15,96	8,98	5,75	3,99	2,24	1,44
60°	13,16	7,40	4,80	3,29	1,85	1,18

Розрахунок параметрів приварювання елементів підсилення з використанням регресійного аналізу

Для розв'язання поставленого завдання розроблено математичну модель, яка описує вплив визначених параметрів ($V_{зв}$, I , α) на температуру та деформації (T , Δ). Доцільним є використання методу планування та постановки повного факторного експерименту з проведенням регресійного аналізу.

Методика проведення регресійного аналізу детально описана в [11], тому далі описуємо лише результати його використання.

Експерименти проведено з використанням інверторного зварювального джерела живлення, стенда для вимірювання температур та деформацій. Зварювання зразків із сталі 09Г2С проводили електродом \varnothing 3мм.

Попередньо отримана лінійна модель свідчить про її неадекватність. Тому доцільно використати апроксимацію функції відгуків y_T та y_Δ поліномом другого порядку виду:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (1)$$

Інтервали варіювання та рівні факторів приведені в таблиці 2.

Для кожного окремого експерименту було виготовлено комплект заготовок, із яких у процесі зварювання знімали дані температур і деформацій. Вимірювання проводили за допомогою терморпар, дані з яких передавались на самописець, та індикатора з ціною поділки шкали 0,01 мм, дані з якого фіксували відеокамерою.

Таблиця 2

Інтервали варіювання та рівні чинників впливу на стан деталі під час зварювання

Фактори	Інтервали варіювання	Рівні чинників		
		основн. 0	верхн. +1	нижн. -1
x_1 – струм, А	20	120	140	100
x_2 – швидкість зварювання, м/год	4,7	9,5	14,2	4,8
x_3 – кут нахилу електроду, α°	15	45	60	30

За методикою, яку викладено в роботі [11], знайдено коефіцієнти рівняння регресії для функцій $y_T = f(I, V_{зв}, \alpha)$ та $y_\Delta = f(I, V_{зв}, \alpha)$ та їхня дисперсія. За результатами розрахунків і з Наукові праці ВНТУ, 2012, № 4

урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії мають вигляд:

$$y_T = -12,104 + 98,596 \cdot x_2 + 23,523 \cdot x_3 + 13,884 \cdot x_1 \cdot x_3 + 28,643 \cdot x_2 \cdot x_3 + 90,02 \cdot x_3^2. \quad (2)$$

$$y_{\Delta} = -0,537 + 0,095 \cdot x_1 + 0,017 \cdot x_3 + 0,075 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,199 \cdot x_3^2. \quad (3)$$

Адекватність отриманих моделей перевіряли за критерієм Фішера. За 5%-го рівня значущості табличне значення критерію становить $F_T = 4,7$. Розрахункові значення критеріїв склали $F_{Tp} = 3,85$ та $F_{\Delta p} = 4,4$. Оскільки розрахункові величини менше табличного значення, моделі вважають адекватними.

Шляхом використання отриманих рівнянь регресії (2, 3) можна розв'язувати ряд задач, які виникають під час проектування технологічних процесів, у яких використовують дугове зварювання. Серед них найчастіше постають задачі мінімізації напружень та деформацій зварювання, а також задача мінімізації тепловкладення з метою запобігання небажаним структурним перетворенням у зоні температурного впливу.

На рис. 4 а – в для точки, розташованої на відстані 5 мм від зони зварювання, показано поверхні відгуків, які відображають вплив сили струму, швидкості зварювання, кута нахилу електрода на її температуру та зміщення з початкового положення.

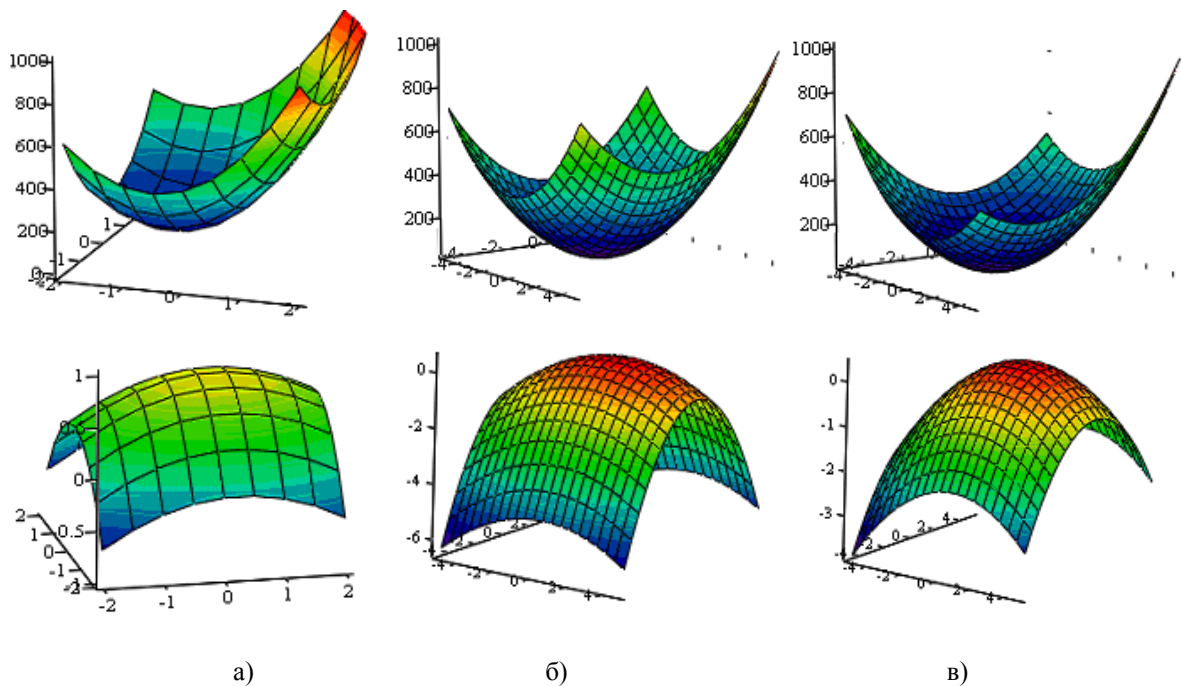


Рис. 4. Поверхні відгуків функцій: а) $y(T)$ та $y(\Delta)$ за I_{max} ; б) $y(T)$ та $y(\Delta)$ за V_{max} ; в) $y(T)$ та $y(\Delta)$ за α_{max}

Усі поверхні відгуків (рис. 4) показали наявність екстремумів, найменших та найбільших значень функцій в області варіації параметрів. Тому доцільно для реальних технологічних процесів поставлені задачі розв'язувати із використанням графоаналітичного методу або методами лінійного програмування за алгоритмом, який наведено нижче.

За отриманими моделями (рівняннями регресії), за фіксованого значення одного із параметрів процесу приварювання елементів підсилення, будують ізолінії, що показують вплив інших значень параметрів на температурні поля та деформації, спричинені горінням зварювальної дуги. Наприклад, задаючи мінімальне та максимальне значення кута α (рис. 4 а, б) отримуємо ізолінії, що характеризують вплив швидкості зварювання та сили струму на температури та деформації у відповідних точках.

Використання таких методик дозволяє визначати необхідні режими зварювання. Отже,

можна визначити режими, що забезпечують мінімальне значення деформацій у зоні температурного впливу. При цьому потрібно враховувати необхідні співвідношення кутів нахилу електроду зі швидкістю зварювання. Їхні рекомендовані значення наведено в таблиці 1.

Задачу розв'язано графічним методом. Для визначення деформацій за фіксованого значення кута α (вибрано 60°) на графіку поверхні відгук $y(A)$ (рис. 5а) побудовано пряму швидкості зварювання, що відповідає координаті (-1), та отримано точки перетину з ізолініями деформацій. Мінімальними деформації будуть при силі струму I , що відповідає координаті -0,95 по осі I , максимальними – в області 1 і становитимуть 0,228 мм. На графіку (рис. 5 б) зображено поверхні відгуків для кута $\alpha = 30^\circ$, причому швидкість зварювання буде максимальною і пройде через координату 1 вісі V . Мінімальні та максимальні деформації становлять відповідно 0,147 і 0,362 мм.

Шляхом накладання ізотерм графіка $y(T)$ (рис. 5 в) на ізолінії деформацій $y(A)$ (рис. 5 а) отримаємо точки перетину, що дозволяють визначити температуру та деформації для будь-якої точки з області значень (рис. 5 г). Так, наприклад, для того, щоб у точці з координатами (-0,2;0,8) отримати температуру 300°C та деформації 0,27 мм, необхідно встановити такі режими: $I=116\text{ A}$, $V_{36}=11,36\text{ м/год}$, $\alpha=60^\circ$.

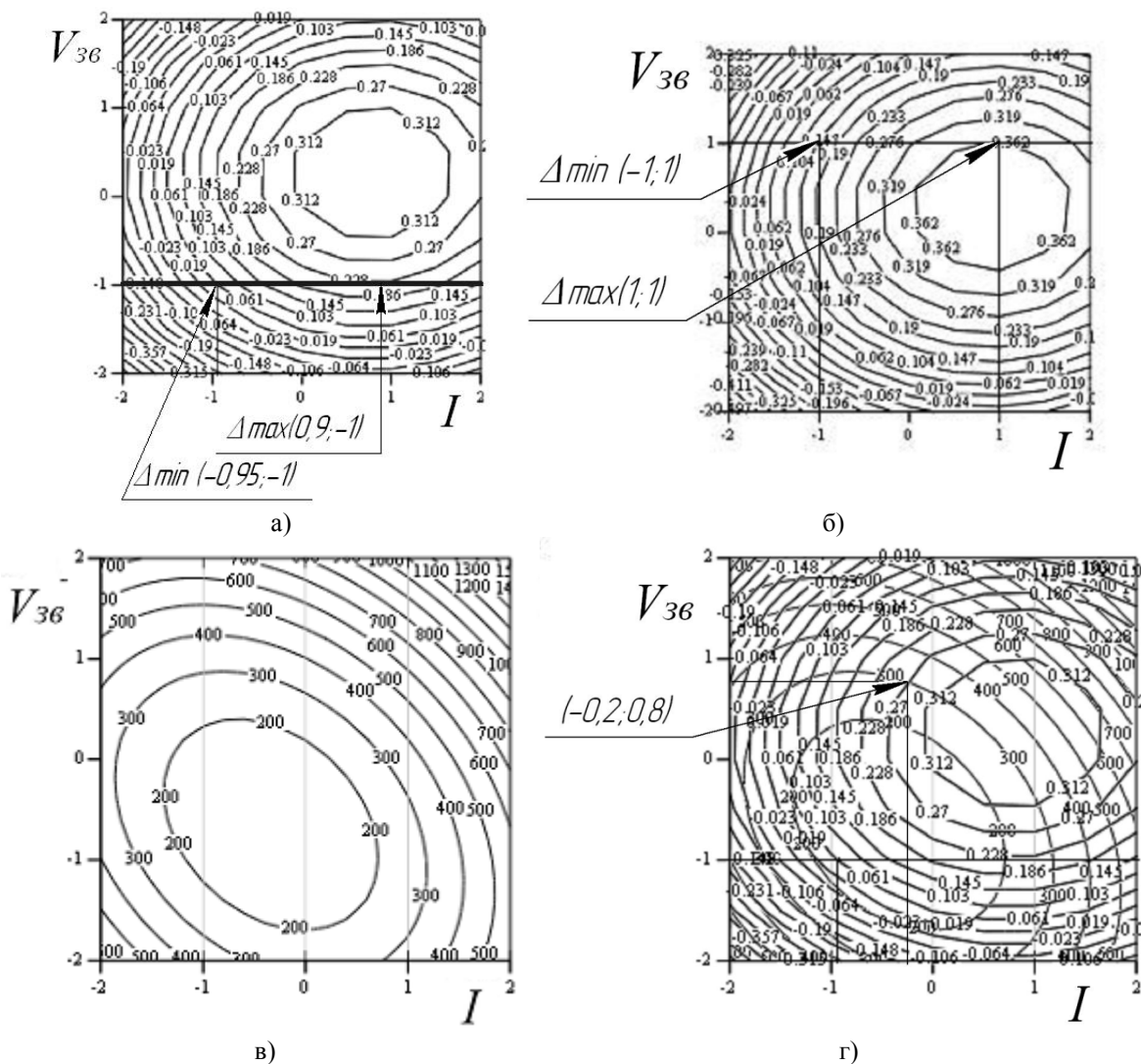


Рис. 5. Графічний розв'язок задачі оптимізації режимів зварювання

Висновки

Визначення раціональних параметрів, що забезпечують мінімальні температурні впливи та деформації у процесі приварювання елементів підсилення внапуск, доцільно вести із використанням наведених рівнянь регресії. Проведені дослідження із використанням плану багатофакторного експерименту довели можливість зменшення деформацій, які спричиняють загрозу появи мікротріщин, шляхом зміни кута нахилу електрода у процесі зварювання.

Використання методики мінімізації деформацій на етапах розробки технологічного процесу ремонтного зварювання з приварюванням накладок для підсилення забезпечило зниження деформацій у межах 10 – 12% та дозволило коректно розраховувати температурні поля для прогнозування фазових перетворень у зоні температурного впливу зварювальної дуги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Циклические деформации и усталость металлов. Т. 2. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов / [В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский и др.]. – К. : Наук. думка, 1985. – 222 с.
2. Василик А. В. Теплові розрахунки при зварюванні / А. В. Василик, Я. А. Дрогомирецький, Я. А. Криль. – Івано-Франківськ : Факел, 2004. – 209 с.
3. Кархин В. А. Тепловые основы сварки / В. А. Кархин. – Л. : Изд-во Ленинград. гос. ин-та, 1990. – 100 с.
4. Осадчук В. А. Визначення тривісного розподілу залишкових напружень в зварних з'єднаннях елементів конструкцій прямолінійними швами і оцінка їх впливу на міцність з'єднань за наявності дефектів типу тріщин / В. А. Осадчук, Л. І. Цимбалюк, А. Р. Дзюбик // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2011. – 54, № 1. – С. 121 – 129.
5. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наук. думка, 2006. – 620 с.
6. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / [И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко и др.] ; под ред. И. К. Походни. – АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.
7. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. — М. : Машиностроение, 1951. — 296 с.
8. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник / Н. И. Пригоровский. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.
9. Палаш Р. В. Визначення раціональних факторів впливу на залишкові напруження в зварних з'єднаннях конструкцій із високоміцних сталей / Р. В. Палаш // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : УкрДЛТУ. – 2006. – № 16.6. – С. 87 – 89.
10. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. / Редкол.: Г. А. Николаев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1 / Под ред. Н. А. Ольшанского. 1978. – 504 с.
11. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

Савуляк Валерій Іванович – д. т. н., професор, завідувач кафедри технології підвищення зносостійкості.

Заболотний Сергій Антонович – к. т. н., доцент кафедри технології підвищення зносостійкості.

Бакалець Дмитро Віталійович – аспірант кафедри технології підвищення зносостійкості.
Вінницький національний технічний університет.