

В.П. Кашицький, В.С. Рибальченко

Луцький національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ БАГАТОФАКТОРНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджено вплив технологічних параметрів процесу контактної зварювання листових конструкцій на міцність зварного з'єднання. Визначено граничні умови та варіантність поєднання різних факторів на здатність формування якісного та міцного зварного з'єднання. Розроблено математичну модель для пошуку оптимальних значень міцності на зсув зварного з'єднання листових конструкцій методом градієнтного спуску по поверхні відгуку. Встановлено оптимальний режим процесу контактної зварювання листів сталі визначеної товщини.

Ключові слова: фактор; параметр оптимізації; матриця планування; математична модель; дисперсія.

V. Kashytskiy, V. Rybalchenko

OPTIMIZATION OF THE REGIME OF CONTACT WELDING OF SHEET STRUCTURES BY THE METHOD OF MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANNING

The influence of technological parameters of the process of contact welding of sheet structures on the strength of the welded joint was studied. The boundary conditions and the variability of the combination of different factors on the ability to form a high-quality and strong welded joint were determined. A mathematical model for finding the optimal values of the shear strength of the welded joint of sheet structures by the method of gradient descent along the response surface was developed. The optimal mode of the process of contact welding of steel sheets of a certain thickness was established.

Key words: factor; optimization parameter; planning matrix; mathematical model; dispersion.

Постановка проблеми. Точкове контактне зварювання є одним з основних способів зварювання виробів з листової сталі. На практиці отримання зварювальних з'єднань заданої якості залежить від оптимальних параметрів процесу зварювання та використання відповідних засобів контролю протягом тривалого циклу виробництва. Основні фактори, які визначають процес зварювання, це тривалість зварювання, величина зварювального струму та зусилля стиснення електродів. Також важливими є електричні характеристики зварювальної машини, які враховують струм конфігурації трансформатора та час вимкнення струму в непровідній частині. Генерація тепла та розподіл температури в зварному шві визначаються розподілом струму та сили на поверхнях розділу листових конструкцій. Розроблені моделі для опису розподілу температури в зоні зварного шва та зростання розміру ядра мають обмежене застосування через неточні вхідні дані для опису перехідних умов, що існують у зоні зварювання. Вирішення проблеми полягає у застосуванні технологічного підходу з урахуванням різноманітних взаємодій між тепловими, електричними, механічними та металургійними явищами, що розвиваються під час процесу зварювання. Моделі, що описують ці явища, повинні бути взаємопов'язані, щоб оптимізувати технологічний процес формування міцного зварного з'єднання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контактне зварювання передбачає утворення тепла за рахунок опору зварюваних деталей в результаті протікання локального електричного струму [1-3]. В технологічному процесі застосовується тиск, який забезпечує адекватний контакт між конфігурацією частин. Це передбачає скоординоване застосування електричного струму та механічного тиску в результаті чого через відносно короткий шлях струму в заготовках відбувається нагрівання за низької напруги та відносно високих струмів для отримання необхідної теплової енергії з метою нагріву локальної зони в місці формування зварювального з'єднання. Послідовність операції полягає в створенні достатньої кількості тепла для розплавлення обмеженого об'єму металу з наступним охолодженням під тиском для забезпечення достатньої міцності утримання деталей разом. Щільність струму та тиск мають бути такими, щоб утворилося зварювальне ядро необхідного розміру (діаметру) з врахуванням умови, щоб розплавлений метал не видалявся із зони зварювання. Викидання розплавленого металу із зони розплаву слід завжди уникати, щоб отримати зварні шви без дефектів.

На основі проведених випробувань авторами роботи [4] доведено, що міцність точкового зварного з'єднання визначається характером руйнування у точковому зварному шві (за менший час зварювання) або в листовій конструкції (за більш тривалий час зварювання) за умови використання робочих параметрів технологічного процесу, який рекомендований розробником. Якщо використовувати довший час зварювання, тоді отримуємо зварні шви з вищою міцністю на розрив від 3% до 21% порівняно з рекомендованими виробником значеннями міцності. Водночас

© В.П. Кашицький, В.С. Рибальченко

використання більш тривалого часу зварювання призводить до більш високого споживання електроенергії та вищих витрат, тому такий режим зварювання доцільно застосовувати за необхідності в особливих випадках.

Основними параметрами процесу зварювання листових конструкцій є зварювальний струм, форма анода, сила електрода, час зварювання, тривалість витримки та тривалість стискання [5]. Витрати часу на точкове зварювання є малими в невеликих масштабах, однак у великих масштабах, таких як автомобілебудування, витрати часу на точкове зварювання є вирішальними для оптимізації галузі. Тому, пошук оптимальних значень для кожного параметра допоможе мінімізувати час виробництва та знизити витрати енергії.

Постановка завдань. Метою роботи є побудова математичної моделі процесу контактного зварювання листових сталевих конструкцій з наступним визначення оптимального режиму формування міцного зварного з'єднання.

Викладення основного матеріалу. Процес контактного точкового зварювання відбувається під одночасним впливом факторів, які визначають якість та міцність зварного з'єднання. Особливістю того впливу є поява екстремуму фізичної характеристики, значення якого може відрізнятися від максимальних значень у випадку дослідження впливу кожного з факторів окремо. За такої умови доцільно використовувати метод багатофакторного планування експерименту, який дозволяє отримати математичну модель у вигляді рівняння регресії другого степеню. Побудова математичної моделі відбувається на основі використання експериментальних результатів визначеної кількості співвідношення варіантів поєднання факторів в межах допустимих значень інтервалу варіювання.

Основними факторами, які визначають механічні характеристики зварного з'єднання, вибрано:

де X_1 – електрична напруга на вторинній обмотці трансформатора, В;

X_2 – тривалість дії струму, с;

X_3 – зусилля стискання, МПа;

X_4 – товщина листа сталі, мм.

Мінімальна кількість експериментальних дослідів, які необхідно провести для побудови математичної моделі, становить $N=16$.

Результати досліджень, які відповідають екстремальним значенням монофакторного експерименту, прийнято за основний рівень факторів. Значення факторів на нижньому, основному і верхньому рівнях, а також інтервали варіювання кожного фактору подано у таблиці 1.

Табл. 1.

Рівні факторів і інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
X_1 , В	1,48	1,5	1,52	0,02
X_2 , с	2,5	3	3,5	0,5
X_3 , МПа	0,37	0,4	0,43	0,03
X_4 , мм	1,4	1,5	1,6	0,1

За параметр оптимізації (y) вибрано межу міцності зварного з'єднання на зсув (σ , МПа), оскільки дана характеристика дозволяє оцінити міцність зварного з'єднання під впливом статичних навантажень.

Умови проведення кожного експериментального дослідів визначено згідно правил варіювання та представлено разом з результатами досліджень в матриці планування (табл. 2). З метою забезпечення високого ступеня достовірності експериментальних результатів дослідження параметра оптимізації проводили за 2-ма паралельними випробуваннями. В процесі паралельних випробувань передбачено використання трьох однакових зразків у вигляді листових конструкцій, які були з'єднані методом контактного зварювання згідно умов, які визначені у матриці планування експерименту. Експериментальні результати визначення межі міцності на зсув піддавали математичній обробці з використанням програми Microsoft Excel та формул для розрахунку коефіцієнтів лінійної та парної взаємодії, критерію Кохрена, Стьюдента та Фішера, міжрядної дисперсії та дисперсії відтворюваності, а також параметра оптимізації.

Наступні розрахунки можна проводити у випадку перевірки однорідності дисперсій за допомогою критерію Кохрена. Визначено, що розрахункове значення критерію Кохрена (G_p) становить 0,15, що є допустимим значенням для нашого випадку, оскільки не перевищує табличне значення ($G_r=0,47$). Це дозволяє зробити висновок про однорідність дисперсій та можливість проводити подальші розрахунки. В процесі розрахунків визначено значення дисперсії відтворюваності (S^2_y), яке становить 6,3.

Табл. 2.

Матриця планування і результати експериментальних дослідів

№	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		y ₁	y ₂	\bar{y}
	Код	Мас. ч.	Код	Мас. ч.	Код	Мас. ч.	Код	Мас. ч.			
1	+	1,52	+	3,5	+	0,43	+	1,6	212,5	214,4	213,45
2	-	1,48	+	3,5	+	0,43	+	1,6	192,6	198,2	195,4
3	+	1,52	-	2,5	+	0,43	+	1,6	207,3	209,2	208,25
4	-	1,48	-	2,5	+	0,43	+	1,6	168,7	171,6	170,15
5	+	1,52	+	3,5	-	0,37	+	1,6	235,5	232,4	233,95
6	-	1,48	+	3,5	-	0,37	+	1,6	220,2	223,8	222
7	+	1,52	-	2,5	-	0,37	+	1,6	225,6	227,4	226,5
8	-	1,48	-	2,5	-	0,37	+	1,6	180,5	184,8	182,65
9	+	1,52	+	3,5	+	0,43	-	1,4	232,8	228,1	230,45
10	-	1,48	+	3,5	+	0,43	-	1,4	215,9	218,6	217,25
11	+	1,52	-	2,5	+	0,43	-	1,4	218,4	221,3	219,85
12	-	1,48	-	2,5	+	0,43	-	1,4	178,4	175,7	177,05
13	+	1,52	+	3,5	-	0,37	-	1,4	245,3	241,5	243,4
14	-	1,48	+	3,5	-	0,37	-	1,4	237,6	241,2	239,4
15	+	1,52	-	2,5	-	0,37	-	1,4	245,8	240,8	243,3
16	-	1,48	-	2,5	-	0,37	-	1,4	193,4	189,7	191,55

В математичній моделі використовують значимі коефіцієнти, визначення яких проводять з використанням критерію Стюдента (табл. 3).

Табл. 3.

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

b _i	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄
	13,98	11	-9,43	-6,87	-8,08	0,037	0,013	-0,844	-1,344	-0,3
t _p	35,85	28,205	24,183	17,61	20,72	0,096	0,032	2,164	3,445	0,769
t _r	2,14									

В результаті розрахунку коефіцієнтів лінійної і парної взаємодії отримано рівняння:

$$y = 213,4 + 13,98X_1 + 11X_2 - 9,43X_3 - 6,87X_4 - 8,08X_1X_2 + 0,037X_1X_3 + 0,013X_1X_4 - 0,844X_2X_3 - 1,344X_2X_4 - 0,3X_3X_4$$

Після перевірки значимості коефіцієнтів згідно $t_p > t_r$, встановлено, що значимими є наступні коефіцієнти лінійної та парної взаємодії:

$$b_1 = 13,98; b_2 = 11; b_3 = -9,43; b_4 = -6,87; b_{12} = -8,08; b_{23} = -0,844; b_{24} = -1,344.$$

Після видалення коефіцієнтів, які не відповідають умові ($t_p < t_r$) отримано наступне рівняння:

$$y = 213,4 + 13,98X_1 + 11X_2 - 9,43X_3 - 6,87X_4 - 8,08X_1X_2 - 0,844X_2X_3 - 1,344X_2X_4$$

Перевірку рівняння на ступінь адекватності проведено за критерієм Фішера (F). Результати розрахунку параметра оптимізації та міжрядної дисперсії представлено у табл. 4.

В результаті розрахунку значення критерію Фішера ($F_p=1,75$) визначено, що розрахункове значення критерію Фішера не перевищує табличне ($F_r=2,4$). Це дозволяє стверджувати, що математична модель є адекватною і її можна використовувати його для пошуку екстремального значення параметра оптимізації.

Табл. 4.

Розрахунок параметра оптимізації та дисперсії адекватності

№	\bar{y}_γ	\hat{y}_γ	$\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma$	$(\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma)^2$
1	213,45	211,58	1,875	3,5156
2	195,4	199,68	-4,275	18,276
3	208,25	210,11	-1,863	3,4689
4	170,15	165,89	4,2625	18,169
5	233,95	232,65	1,3	1,69
6	222	220,9	1,1	1,21
7	226,5	227,81	-1,313	1,7227
8	182,65	183,74	-1,088	1,1827
9	230,45	228,58	1,875	3,5156
10	217,25	216,73	0,525	0,2756
11	219,85	221,74	-1,888	3,5627
12	177,05	177,56	-0,513	0,2627
13	243,4	248,45	-5,05	25,503
14	239,4	236,75	2,65	7,0225
15	243,3	238,24	5,0625	25,629
16	191,55	194,21	-2,662	7,0889
$\sum_{\gamma=1}^N (\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma)^2 = 122,09$				

Визначення екстремального значення параметра оптимізації проводять за допомогою методу крутого сходження по поверхні відгуку. Покроковий рух в напрямку градієнта по кожному фактору здійснюють з врахуванням зміни величини, значення якої розраховують згідно методики.

Результати розрахунків натуральних значень вибраних факторів під час використання методики крутого сходження за градієнтом по поверхні відклику представлені у таблиці 5.

Табл. 5.

Результати розрахунку параметра оптимізації

	Натуральні значення факторів				Параметр оптимізації, МПа
	X ₁ , В	X ₂ , с	X ₃ , МПа	X ₄ , мм	
Основний рівень	1,5	3	0,4	1,5	
b _γ	13,98	11,00	-9,43	-6,87	
I _γ	0,02	0,5	0,03	0,1	
b _{yx} I _γ	0,28	5,5	-0,283	-0,687	
Δ _γ	0,01	0,1944	-0,01	-0,024	
Округлення	0,01	0,2	-0,01	-0,02	
Умовний дослід №1	1,51	3,2	0,39	1,48	227,90
– // – №2	1,52	3,4	0,38	1,46	239,53
– // – №3	1,53	3,6	0,37	1,44	248,32
– // – №4	1,54	3,8	0,36	1,42	254,27
– // – №5	1,55	4	0,35	1,4	257,36
– // – №6	1,56	4,2	0,34	1,38	257,61
– // – №7	1,57	4,4	0,33	1,36	255,01
– // – №8	1,58	4,6	0,32	1,34	249,56

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті використання отриманої математичної моделі встановлено, що максимальне значення параметра оптимізації (межа міцності на зсув) отримано в умовному досліді №6. В наступному покроковому переміщенні відбувається зниження досліджуваної характеристики, тому отриманий результат (σ= 257,61 МПа) задовольняє

© В.П. Кашицький, В.С. Рибальченко

вимогам поставленої задачі. Оптимальний режим контактного зварювання забезпечить отримання міцного зварного з'єднання у випадку: електричної напруги на вторинній обмотці трансформатора – 1,56 В; тривалість протікання струму – 4,2 с; зусилля стискування – 0,34 МПа за визначеної товщини сталевих листів 1,38 мм, що забезпечує досягнення максимального значення межі міцності на зсув зварного з'єднання листових конструкцій. В майбутньому планується провести серію досліджень з використанням інших марок сталі для перевірки адекватності розробленої математичної моделі.

Список використаних джерел

1. Williams N.T., Parker J. D. (2004). Review of resistance spot welding of steelsheets Part. Modelling and control of weld nuggetformation, *International Materials Reviews*, 49(2), 45-74.
2. Brozek M. (2014). Working variables optimization of resistance spot welding. *Manufacturing Technology*, 14(4), 522-527.
3. Kascak L., Spisa E. (2014). Effect of welding parameters on the quality of spot welds combining AHSS steel and HSLA steel. *Key Engineering Materials*, 586, 162-165.
4. Brozek M., Novakova A., Niedermeier O. (2017). Resistance Spot Welding of Steel Sheets of the Same and Different Thickness, *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*, 65(3):807-814.
5. Khader R., Valappil A., Murad M., Qudeiri J. (2023). Effect of Spot-Welding Parameters on the Strength of the Weld of Metal Sheets. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 1047-1059.