

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.791.763

В.І. Білобородченко, С.В. Білобородченко*
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики
і відновлення металоконструкцій,
*Національний університет “Львівська політехніка”,
Військовий інститут ім. П. Сагайдачного

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ШОВНОГО КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПАЛИВНИХ БАКІВ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ

© Білобородченко В.І., Білобородченко С.В., 2005

Розглянуто результати оптимізації вибору матеріалу та технологічного процесу шовного контактного зварювання паливних баків на базі аналізу їх модельних описів.

The results of optimization are considered at the choice of a material and technological process of roller contact welding of fuel tanks on the basis of the analysis of their modelling representations.

Існуючі технології виготовлення паливних баків орієнтовані на традиційні матеріали загального машинобудування, зварні вироби з яких не повною мірою враховують підвищені вимоги до спеціальної техніки, зокрема толерантність до різних типів палива з наявними сірководневими сполуками, подовжений експлуатаційний ресурс (не менше 5 років) та “бойову живучість” конструкції – певну опірність механічним ударним та тепловим навантаженням і полегшену ремонтпридатність тощо.

За достатньої технологічності та дефектоскопічності виробу базування на такі матеріали об’єктивно ускладнює технологічний цикл виготовлення та ремонту додатковими операціями; практично не сприяє вдосконаленню показників технологічного процесу виготовлення в напрямку вибору оптимальніших способів складання-зварювання, модернізації основного та допоміжного обладнання, а відповідно – досягнення високих якісних експлуатаційних параметрів виробу.

Тому актуальним завданням є пророблення питань оптимального технологічного циклу виготовлення паливних баків на ЛДБРЗ з урахуванням особливостей зварювання нового матеріалу конструкції.

На підставі попереднього аналізу та узгодження з замовником було запропоновано використати як основний матеріал виробу корозійно стійку сталь марки Х18Н9Т, оскільки вона не потребує після зварювання додаткового оброблення (багатошарового бакелітування) для забезпечення стійкості проти корозії агресивного середовища, має достатні технологічні властивості щодо оброблення холодними та гарячими процесами, а також ремонтно придатна в нестационарних умовах [1]. Крім того, застосування такого матеріалу дає змогу зменшити не менше, як на 15 % вагові показники виробу за одночасного поліпшення його механічних характеристик.

Оцінювання зварності матеріалу виробу проведено за модельним розрахунком еквівалентів нікелю та хрому [1, 2]

$$Ni_e = Ni + 30 C + 0,5 Mn + 30 N = 14,15 \% \quad (1)$$

$$Cr_e = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb + 3,5Ti + W + V = 22,65 \% \quad (2)$$

і передбачає утворення аустенітно-феритної структури литої зони зварного з'єднання за оптимальних режимів зварювання з сумарним вмістом феритної фази

$$\Phi = \frac{8,1 + Ni_{\text{екв}} - 1,1 Cr_{\text{екв}}}{0,09 - 0,02Cr_{\text{екв}}} = 7,8 \% . \quad (3)$$

Особливості експлуатації виробу додатково вимагають провести аналіз очікуваних структурних складових зони термічного впливу, яка складається з декількох ділянок, серед яких найбільшу увагу приділено колошовній з погіршеними механічними властивостями. Для визначення вмісту мартенситної і ферито-перлітної сумішей в зоні термічного впливу використана методика [2]

$$M (\%) = 100(0,95 - \text{EXP}(-K_m \omega^{\text{пм}})) = 90 \% ; \quad (4)$$

$$\Phi\text{П}(\%) = 100 \text{EXP}(-K_{\text{фп}} \omega^{\text{пф}}) \rightarrow 0, \quad (5)$$

де ω – швидкість охолодження; K_m , $K_{\text{ф.п}}$, пм , пф.п – розрахункові коефіцієнти.

Очікувана структура ЗТВ – продукти гартування з вмістом мартенситу не менше 90 %, решта – продукти проміжного метатартованого розкладу перліту.

Оскільки рекомендовані значення параметрів контактного шовного зварювання таких матеріалів мають значну розбіжність, а застосування критеріальних подібностей для їх уточнення вимагає проведення додаткових експериментів [7], прийнято рішення звернутися до методики планованого експериментування для встановлення оптимальних параметрів технологічного процесу на виробництві.

Досліди проводилися на машині МШ-2001, зварні зразки швом завдовжки 100 мм піддавалися руйнівним випробуванням на розривній машині УМ- 50 .

За керовані чинники слугували найбільш пливові, за експертним оцінюванням, установчі параметри устаткування: $\cos\phi$ – регулювання ефективного струму зварювання (код фактора – x1), v – швидкість зварювання (код –x2), P – зусилля стискання роликів (код–x3). Решта установчих та плинних технологічних параметрів режиму зварювання зафіксована на сталому рівні, що відповідає рекомендаціям щодо технології шовного зварювання [7]. Встановлення значень чинників в просторі експериментування проводилося за комплектним для цієї машини вимірювальним обладнанням з нормованими метрологічними показниками.

Оптимізаційними відгуками процесу є: B , мм – ширина шва (код у1); h , мм – глибина проплавлення (у2); P_p , 10^3 Н – зусилля руйнування (у3).

Для встановлення оптимальної області режимів шовного зварювання вибрано планування на кубі, зокрема композиційний симетричний трирівневий план [5], який має такі статистичні показники: ефективність плану за D-критерієм становить 0,895, E-критерій оптимальності – 0,466, середня для області планування нормована дисперсія оцінювання моделі – $0,775 \cdot 10^{-1}$, максимальний модуль коефіцієнта кореляції оцінок параметрів – 0,75. Для симетричних планів оцінки всіх параметрів, крім b_0 , та b_{ii} , є незалежними, що принципово уможливує за умови відхилення від нормальності розподілення відгуків застосувати процедуру відсіювання чинників за зміною коефіцієнта множинної кореляції; дисперсії та коваріації оцінок однакові в середині груп параметрів. План близький за властивостями до D-оптимального, що дає змогу коректно використовувати великий факторний простір.

Під час проведення експерименту застосовано принцип рандомізації та 3-кратного дублювання дослідів у центральній точці плану.

Гіпотеза невинності значень параметрів оптимізації (B, h, P_p) H_0 : встановлена через G-критерій однорідності дисперсій результатів дублювання в центрі плану [6]

$$G = \frac{S_i^2}{\sum S_i} , \quad (6)$$

$$G_{13(B)} = 0,5 \quad G_{13(P_p)} = 0,5 \quad G_{13(h)} = 0,5 \quad \text{при } f_1 = 1, \quad f_2 = 3, \quad \alpha = 0,05 \quad G_k = 0,9669 > G_{13}.$$

Перевірка отриманих значень відгуків масиву даних відповідності нормальному закону розподілення за коефіцієнтами асиметрії та ексцесу [3, 4]

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})}{n \cdot S^3}; \quad E = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n \cdot S^4} - 3 \quad (7)$$

$A_{(в)}$	$A_{(в)}$	$A_{(рр)}$	$E_{(рр)}$	$E_{(h)}$	$E_{(в)}$
-0,157	$-4 \cdot 10^{-10}$	-411	0,817	$5,25 \cdot 10^{-28}$	-1,82

та С.К.В. оцінок асиметрії та ексцесу

$$S_{(A)} = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 12}{14 \cdot 16}} = 0.0472,$$

$$S_{(E)} = \sqrt{\frac{24 \cdot n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}} = \sqrt{\frac{24 \cdot 13 \cdot (11) \cdot 10}{12^2 \cdot 15 \cdot 18}} = 0.94. \quad (8)$$

Для нормального закону розподілення $|X_{гр}| = 3s$ або $A_{гр} = 3s(A)$, $E_{гр} = 3s(E)$ і дає попередню аналітичну оцінку виду розподілення:

$A_{гр}$	$E_{гр}$
0,142	2,82
$A_{(в)} > A_{гр}$	$E_{(в)} < E_{гр}$
$A_{(h)} < A_{гр}$	$E_{(h)} > E_{гр}$
$A_{(рр)} > A_{гр}$	$E_{(рр)} < E_{гр}$

Отже, однозначного підтвердження гіпотези H_0 про нормальність розподілення експериментальних даних не має, результати відповідають двомодальному розподіленню, пов'язаному з виявленою систематичною метрологічною похибкою.

Тому подальше оброблення даних проведене за непараметричними методами, нечутливими до спотворень розподілень масиву даних. Модифікований полігон розподілення (рис. 1) коректно описується моделлю вигляду

$$P(x) = A \exp\left(\left|\frac{X}{\lambda \tau}\right|^2\right). \quad (9)$$

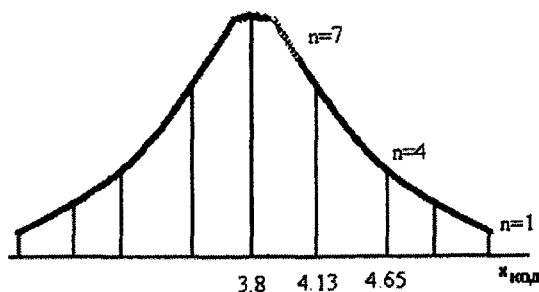


Рис. 1. Визначення закону розподілення експериментальних даних

Розраховані поліноміальні модельні аналоги шовного контактного зварювання виробу становлять

$$Y_1(в) = 7 + 7X_1 - 2X_2 - 1X_3 - 8,375X_1^2 - 7,5 X_2^2 - 7,5 X_3^2 - 0,5X_1X_2 - 0,25X_1X_3 + 0,5X_2X_3;$$

$$Y_2(h) 10^{-4} = 1.75 + 1.75 X_1 - 2.42 X_1^2 - 0.5 X_2 - 2.3 X_2^2 - 0.25 X_3 - 2.203 X_3^2 - 0.125 X_1 X_2 - 0.0625 X_1 X_3 + 0.125 X_2 X_3; \quad (10)$$

$$Y_3(Pp) 10^3 = 52.5 + 52.5 X_1 - 30 X_1^2 - 15 X_2 - 30 X_2^2 - 7.5 X_3 - 23.44 X_3^2 - 3.75 X_1 X_2 - 1.875 X_1 X_3 + 3.75 X_2 X_3 .$$

Дисперсії коефіцієнтів регресії:

$S_{B_0(B)} = 1,723; 10^{-5}$	$S_{B_0(h)} = 3,54$	$S_{B_0(Pp)} = 10,61$
$S_{B_i(B)} = 0,612$	$S_{B_i(h)} = 1,282 10^{-5}$	$S_{B_i(Pp)} = 3,751$
$S_{B_{ij}(B)} = 1.146$	$S_{B_{ij}(h)} = 2.342 10^{-5}$	$S_{B_{ij}(Pp)} = 7.02$
$S_{B_{ii}(B)} = 0,866$	$S_{B_{ii}(h)} = 1,77 10^{-5}$	$S_{B_{ii}(Pp)} = 5,305$

Надійні інтервали для коефіцієнтів полінома:

$\Delta_{B_0(B)} = 22$	$\Delta_{B_i(B)} = 7,78$	$\Delta_{B_{ii}(B)} = 14,55$	$\Delta_{B_{ij}(B)} = 11$
$\Delta_{B_0(h)} = 4,5 10^{-4}$	$\Delta_{B_i(h)} = 1,59 10^{-4}$	$\Delta_{B_{ii}(h)} = 3 10^{-4}$	$\Delta_{B_{ij}(h)} = 2,25 10^{-4}$
$\Delta_{B_0(Pp)} = 134,8$	$\Delta_{B_i(Pp)} = 47,66$	$\Delta_{B_{ii}(Pp)} =$	$\Delta_{B_{ij}(Pp)} = 67,41$

Дисперсія адекватності: $S_a^2(B) = 10$; $S_a^2(h) = 0,97$; $S_a^2(Pp) = 3,71$.

Критерій Фішера: $F_p(B) = 3,33 < F_{кр}$; $F_p(h) = 2,74 < F_{кр}$; $F_p(Pp) = 3,296 < F_{кр}$.

Пошук екстремуму поверхні відгуку $S_{стац}$ проведено чисельним аналізом модельних рівнянь та визначає стаціонарну область режиму зварювання, що лежить поза експериментальною зоною та частково не може бути задоволена конструктивними режимами обладнання:

X_1	X_2	X_3
0,36		4,36
	0,32	
0,27	0,54	14,6
10	7	14

Звідси випливає, що компромісне рішення з оптимізації режимів зварювання повинно проводитись за базовими моделями $Y(B), Y(h)$ та нормалізуватися щодо моделі $Y(Pp)$. Для базових моделей функція Лагранжа становить

$$\Phi = f(X_1, \dots, X_k) + \lambda[\gamma(X_1 X_2 X_3) - B]. \quad (11)$$

Звідки допоміжна функція $F(X_1, X_2, X_3, \lambda)$;

$$F(X_1 X_2 X_3) = f(X_1 X_2 X_3) + \lambda[(X_1 X_2 X_3) - B].$$

Прийнято $B_{opt} = 7$ мм, тоді

$$F = 1,75 + 1,75 - 2,42 - 0,125 + \lambda(7 - 8,375 - 0,5 + 7 - 7).$$

Компромісне рішення такої системи проведено графоаналітичним методом в середовищі Mathcad (рис. 2, 3).

Аналіз розрахованих модельних аналогів формування зварного з'єднання за установчими параметрами технологічного процесу свідчить: ширина шва в найбільшому ступені залежить від швидкості обертання роликів і сягає свого екстремального значення за максимуму ефективного значення струму зварювання ($X_1=0$). Найбільш впливовою на формування ширини шва є ефективна величина зварювального струму, найменш – зусилля стискання роликів. Те саме спостерігається під час формування глибини проплавлення та зусилля руйнування шва.

Серед ефектів парної взаємодії установчих параметрів машини однозначно негативними є одночасний вплив ефективного значення зварювального струму і швидкості зварювання, оскільки їх утримування на різних рівнях призводить до зменшення ширини шва. Однаково впливають на зростання ширини шва парна взаємодія установчих параметрів машини: швидкість зварювання та зусилля стискання.

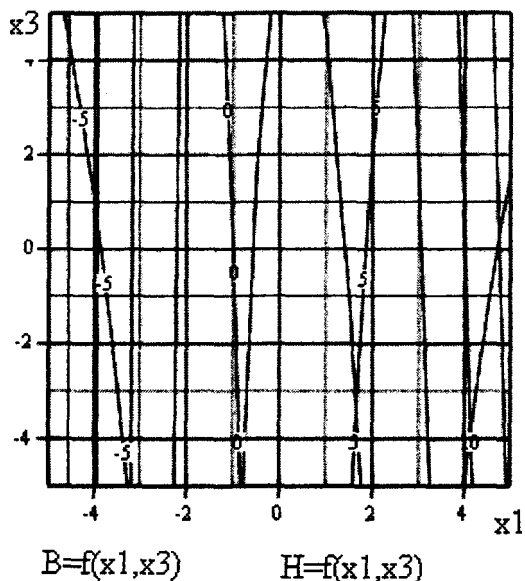


Рис. 2. Двовимірні перерізи поверхонь відгуку при пошуку компромісного рішення встановлення оптимальних режимів шовного зварювання

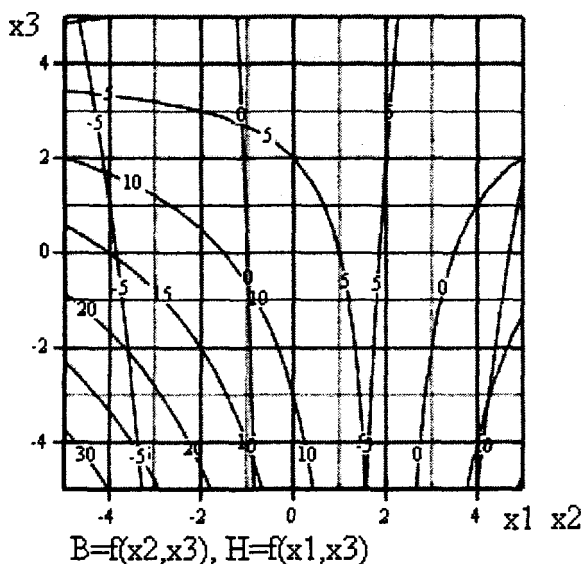


Рис. 3. Двовимірні перерізи поверхонь відгуку при пошуку компромісного рішення встановлення оптимальних режимів шовного зварювання

Діапазон розкиду оптимальних значень установчих параметрів під час формування ширини шва практично однаковий як для зварювального струму, швидкості зварювання, так і зусилля стискування роликів.

Глибина проплавлення також однозначно визначається парною взаємодією установчих параметрів машини, таких як швидкість обертання роликів і зусилля їхнього притискання. Решта – ефекти парного керування, а саме: ефективне значення зварювального струму та зусилля притискання дають однозначну глибину проплавлення тільки за умови утримування їх на різних рівнях. Аналогічно до вищенаведеного оптимальний діапазон допуску варіації установчих режимів зварювання, оцінений за квадратичними членами моделі, вказує на їх практичну рівноцінність.

Середнє очікуване значення зусилля руйнування при встановленні установчих параметрів машини на нульовому рівні (в плані експерименту) становить 52500 Н. Найбільш впливовим на

зростання зусилля руйнування є збільшення струму зварювання, а найменш чутливою є варіація зусилля стискання роликів.

Серед ефектів парної взаємодії однозначно впливовим на забезпечення заданої міцності шва є ефект парної взаємодії зусилля стискання та швидкість обертання роликів. Решта парних взаємодій, а саме – зварювальний струм, швидкість зварювання та зусилля стискання, як і в попередніх випадках, сприяють забезпеченню міцності шва, тільки за умови їх знаходження на різних рівнях.

Діапазони варіації установчих параметрів режиму області оптимуму практично є рівнозначними.

Результати графоаналітичного пошуку компромісних рішень за базовими моделями ширини шва і глибини проплавлення демонструють, що їх задані значення лежать поза областю експерименту і відповідають значенню $X_1 = 1,7$, $X_3 = -3$. Відповідне оцінювання отриманого розв'язку за тими самими базовими моделями, але за парної взаємодії установчих факторів, а саме – швидкість зварювання, зусилля стискання роликів та величина зварювального струму і зусилля стискання зміщує зусилля стискання в області оптимального максимуму $X_3 = -4$. Звідси дійсні рекомендовані значення установчих параметрів режиму становлять: струм зварювання $10 + 0,5$ кА, швидкість зварювання $0,9 + 0,2$ мм/с, зусилля стискання $5,5 + 1 \cdot 10^3$ Н.

Висновки. 1. Матеріал конструкції та прогнозована структура зони зварного з'єднання (в зоні термопливу 90 % мартенситу, решта – продукти гартованого розпаду перлітної фази, лита зона аустеніт – 92 %, ферит до – 8 %) задовольняють вимогам експлуатаційної надійності виробу.

2. Встановлені технологічні режими зварювання виробу контактним швом оптимізовані на основі постановки та проведення планованого експериментування. За результатами дослідження розбудовані моделі, які відтворюють вплив установчих параметрів машини на формування основних показників якості з'єднання: ширина шва, глибина проплавлення, зусилля руйнування. Встановлено, що провідним установчим параметром, який забезпечує гарантовану якість виробу, з решта рівних умов, є величина струму зварювання, задана кутом фазового зсуву моменту відкриття тиристорного комутатора зварювальної машини. Результати графоаналітичного подання модельних аналогів процесу за парним набором установчих параметрів машин дали змогу уточнити границі їх стаціонарної області, а також знайти локальну зону компромісу, яка задовольняє вимогам до зварного з'єднання: величина зварювального струму – $10 + 0,5$ кА, швидкість зварювання – $0,9 + 0,2$ мм/с, зусилля стискання роликів – $5,5 + 1 \cdot 10^3$ Н, ширина шва – 7 мм, величина проплавлення – не гірше 0,8–0,1 сумарної товщини відбортовки, прогнозоване зусилля руйнування (за стандартними зразками) – не гірше 98000 Н.

1. Каховский Н.И. Сварка высоколегированных сталей. – К.: Техника, 1975. 2. Лебедев Б.Д. Расчеты в теории сварочных процессов. – К.: НМК ВО, 1993. 3. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. 4. Новицкий П.В., Зограф И.Л. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. 5. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (Справочное издание) / Р.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др. – М.: Металлургия, 1982. 6. Барабашук В.И., Креденцер В.П. Планирование эксперимента в технике. – К.: Техніка, 1984. 7. Орлов Б.Д., Дмитриев Ю.В., Чакалев А.А. Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1975.