

УДК 519.233.5

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-3(13)-114-122

Станіслав Радченко, Сергій Лапач

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ

Актуальність теми дослідження. Завдяки високим міцнісним характеристикам і стійкості до агресивних середовищ полівінілхлоридні труби знаходять широке застосування в промисловому будівництві. При спорудженні трубопроводів виникає багато технічних проблем при визначенні оптимальних режимів зварювання труб.

Постановка проблеми. Використання статистичного моделювання дає змогу встановити причинні, структурні й кількісні зв'язки між групою керованих факторів і модельованими критеріями досліджуваних процесів і істотно підвищити ефективність вибору технологічних режимів контактного зварювання труб.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі дослідження і вдосконалення складних систем і процесів доцільно використовувати побудову багатофакторних регресійних моделей.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Необхідним є системний підхід до отримання регресійних моделей: процес повинен включати побудову плану експерименту, формалізований вибір структури моделі, стійке оцінювання коефіцієнтів моделі.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є використання методики регресійного аналізу для дослідження й побудови високоточних статистичних моделей характеристик процесу контактного зварювання полівінілхлоридних труб.

Виклад основного матеріалу. Дослідження було проведено за планом повного факторного експерименту $3^3//27$, що дозволило отримати оцінки коефіцієнтів регресії незалежні (у статистичному сенсі) один від одного. Використання результатів дослідження дозволило побудувати адекватні, інформативні, стійкі моделі межі міцності на розтяг зварного шва, ступеня деградації матеріалу зварного шва й коефіцієнта зварювання залежно від факторів, що впливають: температури нагрівника, часу оплавлення зварюваних торців, питомого тиску осадки.

Висновки відповідно до статті. З урахуванням побудованих статистичних моделей проведено аналіз впливу умов зварювання на характеристики якості зварного шва. Результати експерименту підтвердили доцільність запропонованого підходу і використаних методів моделювання.

Ключові слова: регресійний аналіз; статистичне моделювання; план експерименту; структура моделі; контактне зварювання.

Табл.: 2. Рис.: 1. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Завдяки високим характеристикам міцності та стійкості до агресивних середовищ полівінілхлоридні труби знаходять широке застосування в промисловому будівництві. При спорудженні трубопроводів виникає багато технічних проблем при визначенні оптимальних режимів зварювання труб, пов'язаних із багатофакторною залежністю показників якості зварювання від технологічних факторів і зовнішніх умов зварювання.

Постановка проблеми. Завдяки високим характеристикам міцності та стійкості до агресивного середовища труби з полівінілхлориду широко застосовуються в промисловому будівництві. При з'єднанні окремих ділянок труб між собою з використанням контактного зварювання виникає багато проблем, викликаних необхідністю вибору технологічних умов зварювання, які мають забезпечити високу вихідну якість з'єднань і їх довговічність при наступній експлуатації. Важливими показниками якості зварного шву є межа міцності на розрив σ_b і відсутність перепаленого матеріалу у шві. Саме цим показникам приділяється основна увага під час дослідження й оптимізації режимів зварювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки на показники якості шва впливає велика кількість факторів – керованих, некерованих, контрольованих – вибір оптимальних технологічних умов зварювання є складним завданням. Незважаючи на те, що використання планування експериментів для дослідження й оптимізації процесів зварювання почалося досить давно [1], практично в усіх роботах у цій галузі продовжують використовувати однофакторний експеримент, тоді як задачі такого класу вимагають застосування багатофакторного моделювання технологічних процесів [2–7]. Розроблена методологія регресійного аналізу враховує основні властивості й особливості технологічних процесів і систем та дає змогу будувати моделі з найкращими можливими властивостями.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Планування експериментів є складовою частиною загального планування дослідження й одночасно частиною вибіркового методу [8–10]. Суть його у формуванні набору експериментальних умов, які забезпечують багатофакторні регресійні моделі з найкращими критеріями якості при обмеженні на використовувані ресурси. Нині найкращими для використання в промислових умовах є робастні плани, які ґрунтуються на багатофакторних регулярних планах або на ЛП_т рівномірно розподілених послідовностях. Такі плани стійкі (робастні) щодо вибору структури (конкретної специфікації) моделі й відповідають або близькі критеріям D -, A -, E -, G -, Q -оптимальності.

Повний факторний експеримент містить усі можливі комбінації факторів по вибраній кількості рівнів варіювання кожного фактора. Для повного факторного експерименту кількість можливих структурних ефектів (елементів) моделі дорівнює кількості дослідів плану експерименту $N_{\text{п}}$. Отримана статистична модель буде адекватна результатам експерименту, оскільки множина структурних елементів необхідна й достатня для опису результатів дослідів. Усі ефекти повного факторного експерименту ортогональні один одному [8, с. 26–29], що забезпечує структурну й обчислювальну стійкість побудованої регресійної моделі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. До побудови регресійних моделей необхідно підходити системно: процес повинен охоплювати побудову плану експерименту, формалізоване формування структури моделі, стійке оцінювання моделі. Якщо кількість дослідів повного факторного експерименту занадто велике і його реалізація неможлива з огляду на ресурсні обмеження, то використовують багатофакторні регулярні плани і плани на основі ЛП_т рівномірно розподілених послідовностей, властивості яких найбільш близькі повному факторному експерименту. Для формування чи вибору плану експерименту необхідна інформація про кількість факторів, які впливають на показники якості системи чи процесу факторів і складності індивідуального впливу, тобто степені поліному, достатньої для адекватного опису.

Використання системного підходу побудови регресійних дозволяє оптимально вирішувати складні прикладні задачі [2; 7; 11; 12].

Мета статті. Метою роботи є застосування методології багатофакторного регресійного аналізу для дослідження і побудови високоточних статистичних моделей характеристик процесу контактного зварювання полівінілхлоридних труб.

Викладення основного матеріалу. Для апроксимації вихідних даних будемо використовувати клас поліноміальних математичних моделей лінійних за параметрами і нелінійних за факторами. Їх використання обґрунтоване теоремами Вейерштрасса, Стоуна, Джексона [2, с. 87–88]. Вважається, що структура регресійної моделі априорі досліднику не відома (на відміну від класичної теорії планування експериментів). Елементи структури регресійної статистичної моделі вибираються з множини структурних елементів схеми повного факторного експерименту

$$\prod_{i=1}^k (1 + x_i^{(1)} + x_i^{(2)} + \dots + x_i^{(s_i-1)}) \rightarrow N_{\text{п}},$$

де 1 – значення фіктивного фактора $x_0 \equiv 1$;

$x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(s_i-1)}$ – ортогональні контрасти факторів X_i ;

s_i – кількість різних рівнів фактора X_i ;

k – загальна кількість факторів, $1 \leq i \leq k$;

(1), (2), ..., (s_i – 1) – степені контрастів фактора X_i ;

$N_{\text{п}}$ – кількість структурних елементів повного факторного експерименту.

Для формування структури моделі використовується алгоритм RASTA3 [2, с. 188–189].

Стійкість структурних елементів досягається за рахунок представлення головних ефектів і взаємодій як систему ортогональних контрастів, яка еквівалентна системі ортогональних поліномів Чебишева [2, с. 61–63]. Ортогональні контрасти необхідно нормувати.

Ортогональна структура багатofакторної статистичної моделі дозволяє отримати статистично незалежні оцінки коефіцієнтів модельованої функції. Така структура може бути однозначно визначена зі статистично значущими коефіцієнтами. Нормування ортогональних контрастів забезпечує обчислювальну стійкість коефіцієнтів моделі. Таким чином, задача буде коректно поставленою.

Побудовані регресійні статистичні моделі перевіряють на адекватність, інформативність, стійкість та інші критерії якості моделі [2, с. 67–80]. На підставі отриманих результатів перевірки приймається рішення про можливість і межі застосування моделі.

Досліджувався технологічний процес контактної труби із ПВХ-100 для визначення умов створення високоякісного зварного шва. Труби з ПВХ-100 мають високу міцність і теплостійкість, відзначаються значної хімічної стійкістю, високими діелектричними показниками. Характеристики міцності зварного шва повинні бути не нижче аналогічних характеристик основного матеріалу. Ці характеристики шву пов'язані з характером течій оплавленого матеріалу всередині шва. Стікання шарів матеріалу один відносно іншого призводить до появи залишкових напружень, які діють у площині, перпендикулярній основному навантаженню. Поява в зоні такого шва дефектів (від перегрітого матеріалу, пор, не проварювання тощо) значно послаблює з'єднання, у зв'язку з чим необхідні підвищені вимоги до точності підтримання режиму зварювання.

Оцінювання якості зразків зварювання виконувалась за такими показниками:

y_1 – межа міцності на розтягнення, σ_b , МПа;

y_2 – оцінка ступеня деструкції матеріалу зварного шва, Д, бали;

y_3 – коефіцієнт зварювання, К.

Ступінь деструкції матеріалу шва оцінювалась за кольором зламу зварного шва – у балах від 1 до 5; 1 – ясно видима деструкція, 5 – колір відповідає кольору основного матеріалу. Коефіцієнт зварювання К обчислюється як відношення значення межі міцності на розтяг σ_b зварного шва до межі плинності основного матеріалу труби σ_T , отриманого при випробуванні зразків.

Факторами, які впливають на якість зварного шва були вибрані:

X_1 – температура інструмента, T_n , °С;

X_2 – час оплавлення зварюваних торців труб, t_{on} , с;

X_3 – питомий тиск осаджування труб, P_{oc} , МПа.

На початковому етапі проведення дослідження були виконані допоміжні серії випробувань зварних швів труб для попереднього визначення зони оптимум режимів зварювання. За результатами цих дослідів були вибрані діапазони варіювання факторів і кількість рівнів варіювання.

Було прийняте рішення використовувати план повного факторного експерименту $3^3/27$: три фактора, кожен із яких змінюється на трьох рівнях, усього 27 дослідів. Кожен рівень кожного фактора сполучається з будь-яким із рівнів іншого фактора один раз. Виконання експериментів за цим планом дозволяє отримати оцінки коефіцієнтів регресії статистично незалежні одне від одного.

Робоча матриця дослідження технологічного процесу значення рівнів факторів і результати експериментів наведені в табл. 1. Під час проведення експерименту кожен дослід повторювався двічі. Це необхідно для визначення оцінки дисперсій відтворюваності й виявлення викидів. У табл. 1 наведено середні значення результатів кожного дослідів для \vec{o}_1 , \vec{o}_2 , \vec{o}_3 .

Таблиця 1

Робоча матриця й результати дослідів

Кодовані теоретичні значення рівнів варіювання факторів			Фактори			Функції		
			Натуральне позначення факторів			Натуральне позначення функцій		
			T_H	$t_{оп}$	$P_{ос}$	σ_B	Д	К
			Кодоване позначення факторів і натуральні значення їх рівнів			Кодоване позначення функцій		
F_1	F_2	F_3	X_1	X_2	X_3	y_1	y_2	y_3
0	0	0	210	40	4,2	Середні значення результатів дослідів		
1	1	1	225	80	5,0			
2	2	2	240	120	5,8	\bar{o}_1	\bar{o}_2	\bar{o}_3
Дослід 1			210	40	4,2	218,5	5,0	0,34
2			210	40	5,0	400,0	5,0	0,62
3			210	40	5,8	156,5	5,0	0,25
4			210	80	4,2	611,5	5,0	0,97
5			210	80	5,0	488,5	5,0	0,77
6			210	80	5,8	592,5	5,0	0,92
7			210	120	4,2	638,0	5,0	1,0
8			210	120	5,0	610,5	5,0	0,95
9			210	120	5,8	565,0	5,0	0,88
10			225	40	4,2	641,0	5,0	1,04
11			225	40	5,0	549,5	5,0	0,86
12			225	40	5,8	619,5	5,0	0,97
13			225	80	4,2	599,0	5,0	0,94
14			225	80	5,0	613,5	5,0	0,96
15			225	80	5,8	604,5	5,0	0,95
16			225	120	4,2	657,5	4,5	1,03
17			225	120	5,0	649,5	5,0	1,02
18			225	120	5,8	675,5	5,0	1,07
19			240	40	4,2	580,0	5,0	0,91
20			240	40	5,0	575,0	4,5	0,91
21			240	40	5,8	599,5	5,0	0,94
22			240	80	4,2	641,0	3,5	1,02
23			240	80	5,0	622,5	3,0	0,98
24			240	80	5,8	644,0	3,0	1,02
25			240	120	4,2	649,0	1,0	1,02
26			240	120	5,0	636,0	1,5	0,99
27			240	120	5,8	656,0	2,0	1,03

Математичні моделі оцінюваних характеристик зварювання постулювались як ортогональні поліноми Чебишева. Структура моделі цього повного факторного експерименту має такий вигляд

$$(1 + x_1^{(1)} + x_1^{(2)})(1 + x_2^{(1)} + x_2^{(2)})(1 + x_3^{(1)} + x_3^{(2)}),$$

де $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}$ – лінійні ортогональні контрасти факторів X_1, X_2, X_3 ;

$x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}$ – квадратичні ортогональні контрасти факторів X_1, X_2, X_3 ;

Побудова статистичних моделей межі міцності на розтяг \hat{y}_1 , ступеню деструкції матеріалу зварного шва \hat{y}_2 , коефіцієнта зварювання \hat{y}_3 і всіх статистичних характеристик якості моделі було виконано з використанням програмного засобу ПРІАМ [2, с. 84–85].

Отримані математичні моделі мають такий вигляд:

$$\hat{y}_1 = 573,859 + 77,6444 x_2^{(1)} + 73,4694 x_1^{(1)} - 70,9958 x_1^{(1)} x_2^{(1)} - 49,4241 x_1^{(2)} + 48,8861 x_1^{(2)} x_2^{(1)} - 45,7018 x_1^{(2)} x_2^{(2)} + 37,5528 x_1^{(1)} x_2^{(2)} + 48,9694 x_1^{(1)} x_2^{(2)} x_3^{(2)} - 28,0852 x_2^{(2)} - 51,7574 x_1^{(2)} x_2^{(2)} x_3^{(2)} - 33,6208 x_1^{(1)} x_2^{(1)} x_3^{(2)} + 36,9694 x_1^{(2)} x_2^{(1)} x_3^{(2)} - 24,8074 x_2^{(2)} x_3^{(2)} + 15,2875 x_1^{(1)} x_3^{(1)} + 17,6361 x_1^{(1)} x_3^{(2)} + 15,7278 x_2^{(1)} x_3^{(2)} - 16,9796 x_1^{(2)} x_3^{(2)} - 3,40278 x_3^{(1)} + 4,91251 x_1^{(1)} x_2^{(2)} x_3^{(1)} - 3,56944 x_1^{(2)} x_3^{(1)} - 4,27083 x_1^{(2)} x_2^{(1)} x_3^{(1)};$$

$$\hat{y}_2 = 4,36481 - 0,925 x_1^{(1)} - 0,833333 x_1^{(1)} x_2^{(1)} - 0,583056 x_2^{(1)} - 0,57963 x_1^{(2)} - 0,500556 x_1^{(2)} x_2^{(1)} + 0,19125 x_1^{(1)} x_2^{(2)} x_3^{(1)} + 0,155278 x_2^{(2)} x_3^{(1)} + 0,124583 x_2^{(1)} x_3^{(1)} + 0,124375 x_1^{(1)} x_2^{(1)} x_3^{(1)};$$

$$\hat{y}_3 = 0,902037 + 0,119167 x_2^{(1)} + 0,117778 x_1^{(1)} - 0,112083 x_1^{(1)} x_2^{(1)} - 0,0807407 x_1^{(2)} + 0,0775 x_1^{(2)} x_2^{(1)} - 0,0768518 x_1^{(2)} x_2^{(2)} + 0,0569444 x_1^{(1)} x_2^{(2)} - 0,0457407 x_2^{(2)} - 0,0840741 x_1^{(2)} x_2^{(2)} x_3^{(2)} + 0,0727778 x_1^{(1)} x_2^{(2)} x_3^{(2)} + 0,0633333 x_1^{(2)} x_2^{(1)} x_3^{(2)} - 0,0483333 x_1^{(1)} x_2^{(1)} x_3^{(2)} - 0,037963 x_2^{(2)} x_3^{(2)} + 0,02625 x_1^{(1)} x_3^{(1)} + 0,0286111 x_1^{(1)} x_3^{(2)} - 0,0146296 x_1^{(2)} x_3^{(2)} + 0,0125 x_2^{(1)} x_3^{(2)} - 0,00694444 x_3^{(1)} - 0,0116667 x_1^{(2)} x_2^{(1)} x_3^{(1)},$$

де

$$x_1^{(1)} = x_1 = 0,666667(X_1 - 225);$$

$$x_3^{(1)} = x_3 = 1,25(X_3 - 5);$$

$$x_1^{(2)} = 3(x_1^2 - 0,6666667);$$

$$x_3^{(2)} = 3(x_3^2 - 0,6666667).$$

$$x_2^{(1)} = x_2 = 0,025(X_2 - 80);$$

$$x_2^{(2)} = 3(x_2^2 - 0,6666667);$$

У формулах ортогональних контрастів до моделей $\hat{y}_1 \dots \hat{y}_3$ ортогональні контрасти не нормовані. При використанні програмного засобу ПРІАМ коефіцієнти нормування ортогональних контрастів вводяться у відповідні коефіцієнти математичної моделі й автоматично враховуються під час проведення обчислювального експерименту [2, с. 56].

Характеристики статистичного аналізу побудованих моделей із відповідними висновками наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати статистичного аналізу математичних моделей

Параметри статистичного аналізу показників		Умовні позначення	Значення для моделі		
			\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3
1	2	3	4	5	6
Перевірка гіпотези про відтворюваність результатів експерименту	Дисперсія відтворюваності	$s_{\text{відт}}^2$	49,0437	0,009878	0,0003611
	Середньоквадратичне відхилення	$s_{\text{відт}}$	7,00312	0,099387	0,019003
	Число степенів свободи для дисперсії відтворюваності	$f_{\text{відт1}}$	27	27	27
		$f_{\text{відт2}}$	1	1	1
	Експериментальне значення G -критерію	$G_{\text{експ}}$	0,186093	0,362955	0,184616
	Критичне значення G -критерію	$G_{\text{крит}}$	0,315952	0,315952	0,315952
Рівень значущості		α	0,05		
Значення критерію Стюдента ($\alpha=0,05; f_{\text{відт}} = 27$)		$t_{\text{крит}}$	2,05	2,05	2,05

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6
Перевірка гіпотези про адекватність моделі	Дисперсія адекватності	$S_{ад}^2$	17,3394	0,004947	0,0001275
	Експериментальне значення F -критерію	$F^{експ}$	2,82915	1,99661	2,83115
	Критичне значення F -критерію	$F^{крит}$	4,50974	2,16659	3,39131
	Число степенів свободи для адекватності	$f_{ад1}$	21	9	19
		$f_{ад2}$	5	17	7
	Рівень значущості	α	0,05		
Адекватність моделі		Адекватна			
Аналіз отриманої моделі на інформативність	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,999893	0,998877	0,999556
	Число степенів свободи для коефіцієнтів моделі	$f_{k'}$	21	9	19
	Число степенів свободи для залишкової суми квадратів	$f_{оалR}$	32	44	34
	Експериментальне значення F -критерію	$F^{експ}$	1113,23	839,772	414,738
	Критичне значення F -критерію	$F^{крит}$	1,89571	2,10087	1,90151
	Рівень значущості	α	0,05		
	Критерій Бокса і Веца	γ	15	17	10
	Інформативність моделі		Дуже висока		
Число обумовленості		$cond(X^T X)$	1	1	1
Середнє абсолютних величин відносних похибок апроксимації		$ \bar{e}_{відн} , \%$	0,317663	0,953073	0,684601
Середнє абсолютних величин абсолютних похибок апроксимації		$ \bar{e}_u $	1,53069	0,0388271	0,0048731
Частка розсіяння, яка пояснюється моделлю		$Q_{\hat{y}}$	0,999786	0,997756	0,999112

Розглянуті моделі адекватні, інформативні, структурно й обчислювально стійкі: коефіцієнт множинної кореляції дуже близький до 1 і статистично значущий. Моделі пояснюють більш ніж 99 % розсіяння результатів дослідів. Для всіх моделей середня похибка апроксимації менше 1 %. Неоднорідність дисперсій \hat{y}_2 викликана тим, що розподіл похибка в таких умовах відрізняється від нормального.

Аналіз поведінки функції \hat{y}_1 можна виконати за графіком поверхні відгуку (рис.).

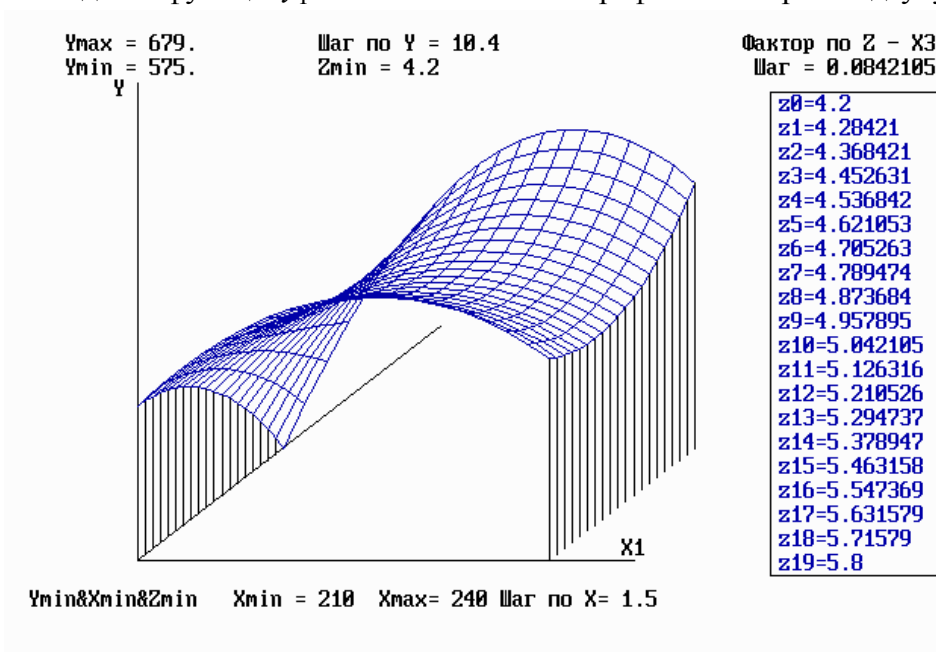


Рис. Маргінальна поверхня відгуку \hat{y}_1 для факторів X_1 і X_3 при $X_2 = 120$

Моделі залежності характеристик процесу зварювання – межі міцності на розтяг зварного шва, ступеня деструкції матеріалу зварного шва, коефіцієнта зварювання – від технологічних умов зварювання – температури нагрівача, часу оплавлення зварюваних торців, питомого тиску осаджування труб – відображають фізичну суть процесу зварювання в інтервалах варіювання досліджуваних факторів.

З урахуванням побудованих статистичних моделей проведений аналіз впливу умов зварювання на якість зварюваного шва й отримана інформація використана для визначення оптимальних умов проведення технологічного процесу.

З розробленими методами моделювання й отриманими результатами можна ознайомитись у [13].

Висновки відповідно до статті.

1. Методологія регресійного аналізу дозволяє отримувати багатфакторні статистичні моделі з найкращими можливими статистичними характеристиками. Побудова моделей вимагає системної організації експерименту у вигляді плану експерименту, структури моделі, елементів структури моделі.

2. Для отримання найкращих статистичних характеристик властивостей моделі необхідно забезпечити ортогональність структури моделі, структурних елементів моделі, використовувати ортогональні контрасти й нормування ефектів.

3. Використання результатів повного факторного експерименту під час проведення досліджень дозволило побудувати адекватні, інформативні та стійкі моделі межі міцності на розтяг зварного шва \hat{y}_2 і коефіцієнта зварювання \hat{y}_3 залежно від факторів впливу: температури нагрівача, часу оплавлення зварюваних торців, питомого тиску осаджування.

4. Результати використання концепції регресійного аналізу в процесі моделювання складного технологічного процесу контактного зварювання полівінілхлоридних труб підтвердило її працездатність і ефективність. Використовуючи побудовані статистичні моделі проведений аналіз впливу факторів на характеристики якості зварного шва і проведена оптимізація технологічного процесу.

Список використаних джерел

1. *Оптимизация* технологических условий сварки полиэтиленовых труб / С. Г. Радченко, Ю. С. Бурбело, Э. В. Котенко, С. Н. Лапач, Ю. А. Сидоренко, В. С. Лищинский // Пластические массы. – 1988. – № 9. – С. 29–31.
2. *Радченко С. Г.* Методология регрессионного анализа / С. Г. Радченко. – К. : Корнійчук, 2011. – 376 с.
3. *Радченко С. Г.* Анализ методов моделирования сложных систем / С. Г. Радченко // Математичні машини і системи. – 2015. – № 4. – С. 123–127.
4. *Дрейпер Н.* Прикладной регрессионный анализ : пер. с англ. / Норман Р. Дрейпер, Гарри Смит. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2007. – 912 с.
5. *Лапач С. М.* Проблеми побудови регресійних моделей процесів різання металів / С. М. Лапач // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». – 2014. – № 3(72). – С. 40–47.
6. *Радченко С. Г.* Формализованные и эвристические решения в регрессионном анализе / Радченко С. Г. – К. : Корнійчук, 2015. – 236 с.
7. *Радченко С. Г.* Корректное статистическое моделирование в условиях неполной исходной информации / Радченко С. Г. // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2017. – № 4. – С. 49–56.
8. *Бродский В. З.* Введение в факторное планирование эксперимента / В. З. Бродский. – М. : Наука, 1976. – 224 с.
9. *Лапач С. Н.* Робастные планы эксперимента // Математичні машини і системи. – 2016. – № 4. – С. 111–121.
10. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
11. *Modeling of salad plants growth and physiological status in vitamin space greenhouse during lighting regime optimization* / [Konovalova I., Berkovich Yu. A., Erokhin A., ets.] // 41th COSPAR Scientific Assembly; Istanbul, Turkey, 2016. – P. 278.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

12. *Оптимизация* светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи / [Коновалова И. О., Беркович Ю. А., Ерохин А. Н. и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 17–22.

13. *Лаборатория* экспериментально-статистических методов исследований (ЛЭСМИ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.n-t.org/sp/lesmi>.

References

1. Radchenko, S. G., Burbelo, Iu. S., Kotenko, E. B., Lapach, S. N., ets. (1988). Optimizatsiia tekhnologicheskikh uslovii svarki polietilenovykh trub [Optimization of technological conditions for welding polyethylene pipes]. *Plasticheskie massy – Plastic masses*, 9, 29–31 [in Russian].

2. Radchenko, S.G. (2011). *Metodologiya regressiionnogo analiza [Methodology of regression analysis]*. Kyiv: Korniiichuk [in Russian].

3. Radchenko, S. G. (2015). Analiz metodov modelirovaniia slozhnykh sistem [Analysis of methods of the model of complex systems]. *Matematychni mashyny i systemy – Mathematical Machines and Systems*, 4, 123–127 [in Russian].

4. Drejper, N. R. and Smit, H. (2007). *Prikladnoi regressiionnyi analiz [Applied regression analysis]* (3rd ed.). Moscow: Wiliams [in Russian].

5. Lapach, S. N. (2014). Problemy pobudovy regresiynykh modeley protsesiv rizannya metaliv [Problems of constructing regression models of metal cutting processes]. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*. Seriya «Mashynobuduvannia» – *Bulletin of the National Technical University of Ukraine Kiev Polytechnic Institute. Series «Mechanical Engineering»*, 3 (72), 40–47 [in Ukrainian].

6. Radchenko, S. G. (2015). *Formalizovannye i evristicheskie resheniya v regressiionnom analize [Formalized and heuristic solutions in regression analysis]*. Kyiv: Korniiichuk [in Russian].

7. Radchenko, S.G. (2017). Korrektное statisticheskoe modelirovanie v usloviakh nepolnoi iskhodnoi informatsii [Correct statistical modeling in conditions of incomplete source information]. *Radioelektronika, informatika, upravlenie – Radio electronics, computer science, management*, 4, 49–56 [in Russian].

8. Brodsky, V.Z. (1976). *Vvedenie v faktornoe planirovanie eksperimeta [Introduction to the factor design of the experiment]*. Moscow: Nauka [in Russian].

9. Lapach, S N. (2016). Robastnye plany eksperimeta [Robust experiment plans]. *Matematychni mashyny i systemy – Mathematical Machines and Systems*, 4, 111–121 [in Russian].

10. Kobzar, A. I. (2006). *Prikladnaia matematicheskaia statistika. Dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]*. Moscow: FIZMATLIT [in Russian].

11. Konovalova I., Berkovich Iu. A., Erokhin A., ets. (2016). Modeling of salad plants growth and physiological status in vitamin space greenhouse during lighting regime optimization // 41th COSPAR Scientific Assembly; Istanbul, Turkey.

12. Konovalova, I. O., Berkovich, Iu. A., Erokhin, A. N., ets. (2016). Optimizatsiia svetodiodnoi systemy osveshcheniia vitaminnoi kosmicheskoi oranzherei [Optimization of the LED lighting system vitamins space greenhouse]. *Aviakosmicheskaiia i ekologicheskaiia meditsina – Aerospace and Environmental Medicine*, 50 (3), 17–22 [in Russian].

13. Laboratoriya eksperimentalno-statisticheskikh metodov issledovaniy (LESMI) [Laboratory of experimental-statistical methods of research]. Retrieved from <http://www.n-t.org/sp/lesmi>.

UDC 519.233.5

Stanislav Radchenko, Serhei Lapach

RESEARCH AND MODELING OF TECHNOLOGY CONTACT WELDING OF PIPES

Urgency of the research. Due to high strength characteristics and resistance to aggressive media, polyvinyl chloride pipes are widely used in industrial construction. When creating pipelines, a number of technical problems arise in determining the optimum welding conditions for pipes.

Target setting. The use of statistical modeling makes it possible to establish causal, structural and quantitative relationships between a group of controlled factors and the simulated criteria of the processes being studied and to substantially increase the efficiency of the choice of technological regimes for contact welding of pipes.

Actual scientific researches and issues analysis. When investigating and improving complex systems and processes, it is advisable to use the construction of multifactorial regression models.

Uninvestigated parts of general matters defining. A systematic approach to obtaining regression models is necessary: the process should include the construction of an experiment plan, a formalized choice of the structure of the model, a stable estimation of the coefficients of the model.

The research objective. The purpose of this work is to use the regression analysis technique to study and build high-precision statistical models of the characteristics of the process of welding PVC pipes.

The statement of basic materials. The study was carried out according to the plan of the full factorial experiment $3^3/27$, which made it possible to obtain estimates of the regression coefficients independent (in the statistical sense) from each other. Using the results of the research, it was possible to construct adequate, informative, stable models of the tensile strength of the welded joint, the degree of destruction of the welded material, and the welding coefficient, depending on the influencing factors.

Conclusions. Taking into account the constructed statistical models, the influence of welding conditions on the weld quality characteristics is analyzed. The results of the experiment confirmed the expediency of the proposed approach and the modeling methods used.

Keywords: regression analysis; statistical modeling; experimental design; model structure; contact welding.

Table: 2. Fig.:1. References: 13.

Радченко Станіслав Григорович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технології машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Radchenko Stanislav – Doctor of Technical Science, Assistant Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering, I. Sikorsky National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute» (37 Pobeda Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: teor292@gmail.com

Лапач Сергій Миколайович – старший викладач кафедри технології машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Lapach Serhei – Senior Lecturer of the chair of technology of mechanical engineering, I. Sikorsky National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute» (37 Pobeda Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: lapach@ukr.net