

© Ю.С. Слупська<sup>1</sup>, О.В. Бекетов<sup>2</sup>, Н.О. Ротт<sup>1</sup>, Д.В. Лаухін<sup>1</sup>,  
О.М. Твердохліб<sup>1</sup>, І.В. Вернер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

<sup>2</sup> Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ СТРУКТУРНИМ СТАНОМ ТА ГЕОМЕТРИЧНИМИ РОЗМІРАМИ ЗОН ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

© U. Slupska<sup>1</sup>, O. Beketov<sup>2</sup>, N. Rott<sup>1</sup>, D. Laukhin<sup>1</sup>, O. Tverdokhlib<sup>1</sup>, I. Verner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine

## SIMULATING THE STRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIP IN WELD ZONES

**Мета.** Проаналізувати залежність між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом, які формуються в низьковуглецевих низьколегованих сталей після електронно-променевого зварювання та відповідним структурним станом.

**Методика.** Конструювання імітаційної моделі і проведення імітаційних експериментів.

**Результати.** Шляхом застосування математичного апарату підтверджуючого факторного аналізу проаналізовано залежність між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після електронно-променевого зварювання та відповідним структурним станом. Підтверджуючий факторний аналіз виконано шляхом побудови діаграми шляхів. В якості змінних для отримання діаграми використовувались: відсотковий вміст структурних складових фериту та перліту; геометричні розміри ділянок зварного з'єднання. Для перевірки адекватності отриманої моделі застосовувались математичні методи коваріаційного та кореляційного аналізу. Отримані дані показують, що показники отриманих критеріїв відповідають достовірності.

**Наукова новизна.** Розроблено методики застосування математичного апарату підтверджуючого факторного аналізу для кількісного аналізу взаємозв'язку між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом. Проаналізовано залежність між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом, які формуються в низьковуглецевих низьколегованих сталей після електронно-променевого зварювання та відповідним структурним станом.

**Практична значимість.** Розроблено математичний апарат підтверджуючого факторного аналізу та проаналізовано залежність між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ.

**Ключові слова:** підтверджуючий факторний аналіз, діаграма шляхів, коваріаційний аналіз, кореляційний аналіз, метод максимуму правдоподібності, метод найменших квадратів.

**Вступ.** Математичне моделювання систем, які в свою чергу характеризуються багаторівнянністю і взаємодією між собою елементів, кожен з яких також є системою, викликає досить великі труднощі. В першу чергу, складністю

виявляється безпосередня формалізація і математичний опис загальносистемних ситуацій на базі умоглядного аналізу зв'язків і залежностей між елементами системи. Одним із можливих шляхів вирішення даної задачі є застосування моделей у вигляді алгоритмічних програм для електронно-обчислювальних машин, а саме імітаційного моделювання [1, 2].

Імітаційне моделювання – це дослідження складної системи на електронно-обчислювальній машині, спрямоване на отримання інформації про саму систему [2]. Імітаційне моделювання засноване на відтворенні за допомогою електронно-обчислювальної машини розгорнутого в часі процесу функціонування системи з урахуванням взаємодії із зовнішнім середовищем [3].

Основними завданнями імітаційного моделювання є [4]:

1. Розробка моделі досліджуваної системи на основі приватних імітаційних моделей (модулів) підсистем, об'єднаних своїми взаємодіями в єдине ціле;
2. Вибір інформативних (інтеграційних) характеристик об'єкта, способів їх отримання і аналізу;
3. Побудова моделі впливу зовнішнього середовища на систему у вигляді сукупності імітаційних моделей зовнішніх факторів;
4. Вибір способу дослідження імітаційної моделі відповідно до методами планування імітаційних експериментів.

З математичної точки зору, імітаційне моделювання може здійснюватися з застосуванням наступних методик: факторного аналізу, підтверджуючого факторного аналізу, методом структурних рівнянь, методом Монте-Карло тощо [2, 3].

Головною метою імітаційного моделювання є конструювання імітаційної моделі об'єкта і проведення імітаційних експериментів над нею для вивчення законів функціонування і поведінки з урахуванням заданих обмежень і цільових функцій в умовах взаємодії із зовнішнім середовищем [5].

За рахунок ідентичності будови і поведінки можливих поєднань і стрибків стану системи при імітаційному моделюванні має місце певна схожість процесу, відтвореного електронно-обчислювальною машиною, і реального процесу функціонування системи. Конструюючи загальносистемні ситуації, електронно-обчислювальна машина як би імітує явища і події процесу, що моделюється [6, 7].

В даній роботі імітаційне моделювання було здійснено за рахунок використання математичних методів підтверджуючого факторного аналізу. Даний підхід дозволяє змоделювати «поводження» деякої досліджувальної системи з урахуванням можливостей розвитку подій за різними сценаріями та за результатами обробки отриманих даних, зробити обґрунтований висновок про доцільність здійснення аналізованого заходу, або про необхідність внесення певних коригуючих впливів.

Таким чином, актуальність даної роботи полягає в розробці методики застосування математичного апарату підтверджуючого факторного аналізу для кількісного аналізу взаємозв'язку між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом.

Проаналізувати залежність між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом, які формуються в

низьковуглецевих низьколегованих сталей після електронно-променевого зварювання та відповідним структурним станом.

**Основна частина.** В якості матеріалу для дослідження було обрано низьковуглецеві низьколеговані сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після електронно-променевого зварювання.

Дослідження відповідного структурного стану було виконано в рамках роботи [5]. Отримані в даній роботі результати щодо експериментальної оцінки структурного стану в залежності від геометричних розмірів зон зварного з'єднання було використано в якості вихідних параметрів для подальшого застосування підтверджуючого факторного аналізу [5, 7].

Підтверджуючий факторний аналіз було виконано шляхом використанням модуля моделювання структурними рівняннями (*SEPATH*) програми *STATSOFT STATISTICA 10.0* [2].

У якості вихідних даних, які використовувалися при побудові математичних моделей підтверджуючого факторного аналізу використовувалися дані щодо групування та отримання факторів. Відповідну методику формування вихідних даних було запропоновано в роботі [8]. В цій роботі розглядалось групування факторів при аналізі взаємозв'язку між геометричними розмірами зон зварного з'єднання після лазерного зварювання та відповідним структурним станом на прикладі сталі 10ХСНД. Запропоновану методику (див. роботу [8]), було використано для сталей 09Г2С, 10Г2ФБ.

Методика побудови підтверджуючого факторного аналізу складалась з наступних етапів [6, 7]:

1. Побудовано відповідні діаграми шляхів підтверджуючого факторного аналізу (графічна інтерпретація);
2. Коваріаційний аналіз отриманих даних;
3. Кореляційний аналіз отриманих даних.

Вихідні дані для побудови математичної моделі підтверджуючого факторного аналізу наведено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для побудови математичної моделі

СТАЛЬ	ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ								
	<i>PERLITE2</i>	<i>PERLITE3</i>	<i>PERLITE4</i>	<i>FERRITE2</i>	<i>FERRITE3</i>	<i>FERRITE4</i>	<i>ZONAI</i>	<i>ZONAIИ</i>	<i>GRZON</i>
09Г2С	5,8	8,3	6,7	10,8	8,3	10	0,25	0,8	0,4
10ХСНД*	10,8	10	10	7,5	6,7	5,8	0,15	0,4	0,3
10Г2ФБ	8,2	9,2	9,2	7,5	7,5	7,5	0,08	0,9	0,1

\*частково використано дані отримані в роботі [9]

На підставі аналізу таблиці 1 побудовано графічну інтерпретацію моделі, яку наведено на рисунку 1 (використано модуль моделювання структурними рівняннями *Seopath* програми *STATSOFT STATISTICA 10.0*) [2, 10].

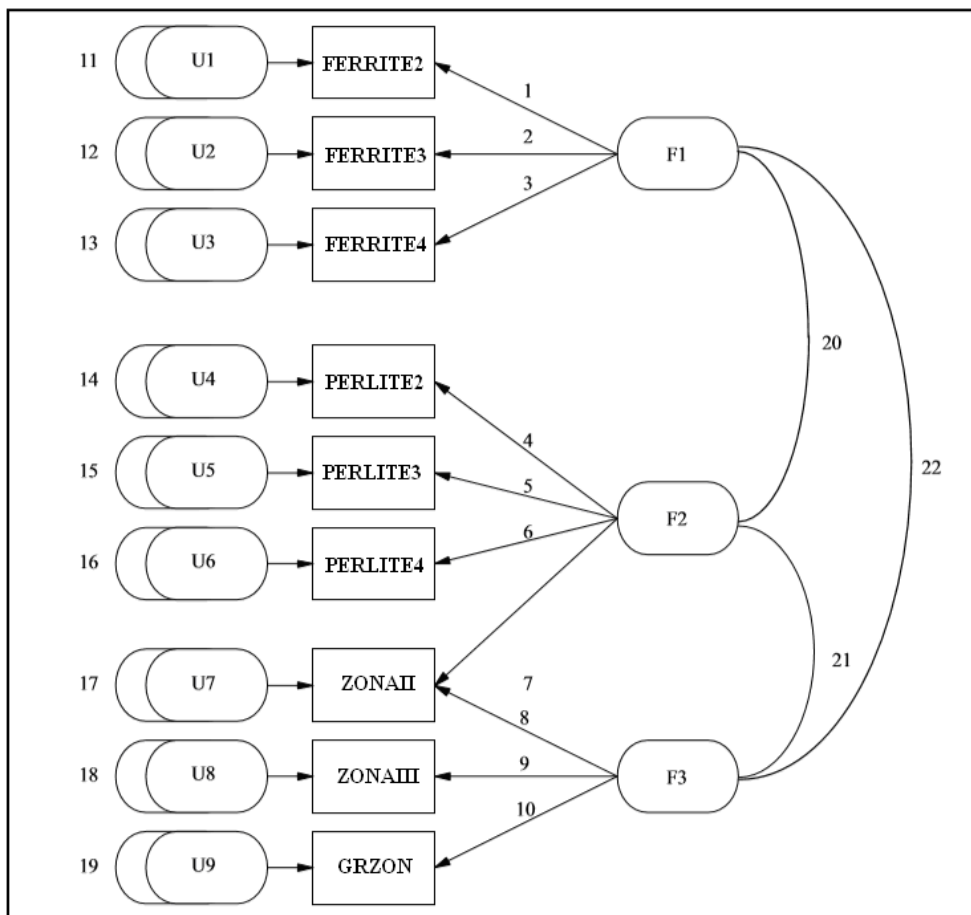


Рис. 1. Діаграма шляхів підтверджуючого факторного аналізу

В таблиці 1 та на рисунку 1 в якості змінних використовувалися:

Перший фактор ( $F1$ ) – відсоткове співвідношення структурних складових фериту на границі зварного шву та зони термічного впливу ( $FERRITE2$ ); у зоні термічного впливу ( $FERRITE3$ ); на границі між зоною термічного впливу та основним металом ( $FERRITE4$ );

Другий фактор ( $F2$ ) – відсоткове співвідношення структурних складових перліту на: границі зварного шву та зони термічного впливу ( $PERLITE2$ ); у зоні термічного впливу ( $PERLITE3$ ); на границі між зоною термічного впливу та основним металом ( $PERLITE4$ );

Третій фактор ( $F3$ ) – геометричні розміри між границею зварного шву та зоною термічного впливу ( $ZONAII$ ); зони термічного впливу ( $ZONAIII$ ); ( $GRZON$ ) – між границею зони термічного впливу та основним металом.

Цифрами від 1 до 10 – представлені навантаження, які надходять від кожного фактору.

Перший фактор навантажує змінні –  $FERRITE2$ ,  $FERRITE3$ ,  $FERRITE4$ .

Другий фактор навантажує змінні – PERLITE2, PERLITE3, PERLITE4.

Третій фактор навантажує змінні – ZONAII, ZONA III, GRZON, де досліджуються такі ділянки зварного з'єднання як: границя зварний шов – зона термічного впливу, зона термічного впливу та границя зона термічного впливу – основний метал.

U1 – U9 – показані похибки вимірювання, тобто, це латентні екзогенні змінні [2], які надходять до явних ендогенних змінних, які навантажуються кожен своїм фактором.

Дугою 11-19 – відображено дисперсії [2], які надходять до похибок вимірювання (U1 – U9).

Дугою 20 – відображено дисперсію між першим та другим фактором.

Дугою 21 – відображено дисперсію між другим та третім фактором.

Дугою 22 – відображено дисперсію між першим та третім фактором.

На підставі групування факторів, та кількісного аналізу, який наведено у таблиці 1 та рисунку 1 з застосуванням математичного апарату підтверджуючого факторного аналізу, було отримано матрицю взаємозв'язку згрупованих факторів.

Приклад такої матриці приведено у вигляді таблиці 2.

Таблиця 2

Приклад матриці взаємозв'язку згрупованих факторів сталі 10Г2ФБ після електронно-променевого зварювання у програмному середовищі STATSOFT STATISTICA 10.0.

	PERLITE2	PERLITE3	PERLITE4	FERRITE2	FERRITE3	FERRITE4	ZONAII	ZONAIII	GRZON
PERLITE2	1,0000	0,7319	-0,0287	0,7762	0,8602	0,3992	-0,3866	0,6076	-0,2969
PERLITE3	0,7319	1,0000	0,207	0,6228	0,6759	0,6323	0,2268	0,3915	-0,0911
PERLITE4	-0,028	0,207	1,0000	0,5037	0,3442	0,8624	0,6658	-0,669	-0,6242
FERRITE2	0,7762	0,6228	0,5037	1,0000	0,9668	0,7749	0,0318	0,0752	-0,6683
FERRITE3	0,8602	0,6759	0,3442	0,9669	1,0000	0,6517	-0,0312	0,1658	-0,6663
FERRITE4	0,3992	0,6324	0,8625	0,7749	0,6517	1,0000	0,5088	-0,2438	-0,5148
ZONAII	-0,386	0,2268	0,6658	0,0318	-0,0312	0,5088	1,0000	-0,7167	-0,2507
ZONAIII	0,6076	0,3915	-0,669	0,0753	0,1658	-0,2438	-0,7167	1,0000	0,5420
GRZON	-0,297	-0,0911	-0,6242	-0,6683	-0,6663	-0,5148	-0,2507	0,5420	1,0000
N спостер.	48,000								
Matrix	1,0000								

Згідно схеми, яку наведено на рисунку 1 досліджувалося три фактора, де кожен з факторів навантажує по три явних змінних.

Розглянуті фактори, для подальшого їх дослідження, та написання моделі умовно було умовно розподілено наступним чином:

До структури 1 (STRUCTURE1) відносяться змінні які навантажують перший фактор: FERRITE2, FERRITE3, FERRITE4;

Змінні, які навантажують другий фактор, тобто PERLITE2, PERLITE3, PERLITE4 відносяться до структури 2 (STRUCTURE2).

Змінні, які навантажують третій фактор: ZONAII, ZONA III, GRZON – до геометричних розмірів (GEOMETRY).

На підставі даних матриці взаємозв'язку згрупованих факторів (див. таблицю 2) було проведено коваріаційний аналіз методиками, запропонованими в роботах [11].

Результати коваріаційного аналізу представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Оцінка адекватності отриманої моделі

<b>09Г2С</b>				
Аналіз шляхів (рисунок 1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	1,05	0,21	4,93	0,00
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,72	0,24	3,04	0,00
(GEOMETRY) -8->[ZONAII]	-0,71	0,15	-4,65	0,00
<b>10ХСНД</b>				
Аналіз шляхів (рисунок 1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	0,97	0,11	9,08	0,00
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	1,00	0,10	9,70	0,00
(GEOMETRY) -8->[ZONAII]	-0,57	0,12	-4,70	0,00
<b>10Г2ФБ</b>				
Аналіз шляхів (рисунок 1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	0,67	0,12	5,51	0,00
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,83	0,11	7,46	0,00
(GEOMETRY) -8->[ZONAII]	0,96	0,10	9,60	0,00

Аналіз таблиці 3 показує, що кожна строка отриманих результатів оцінки моделі аналізує кожен здійснений етап аналізу діаграми шляхів (див. рис. 1).

В якості методу оцінки моделі був використаний узагальнений метод найменших квадратів, а потім метод максимум правдоподібності (УМНК→МП). Тобто, виконується 5 ітераційних процесів за допомогою узагальненого методу

найменших квадратів (УМНК), а потім використовується метод максимуму правдоподібності (МП) [1].

Були отримані дані оцінки для кожного відповідного параметра, отримані стандартні похибки факторних навантажень, які показують стандартні відхилення для кожного з написаних шляхів. Як бачимо, стандартні похибки в даному випадку були отримані незначні, в допустимих межах [12].

Отримані результати  $T$  – статистики (критерій Ст'юдента) показують межу відхилення кожного параметра від його номінальної величини, що відображає кількість стандартних помилок.

Імовірнісний рівень повинен приймати значення ближче до 1 [2].

Бачимо, що всі коефіцієнти коваріації між факторами та вихідними змінними значимі при рівні значущості  $p = 0$ .

Для перевірки адекватності моделі підтверджуючого факторного аналізу сумісно з коваріаційним аналізом було застосовано кореляційний аналіз, результати якого наведено на рисунках 2, 3.

Важливою ознакою адекватності моделі є її відповідність нормальному закону розподілу залишків, яку можна проаналізувати на нормальному ймовірнісному графіку. Чим щільніше розміщені точки на прямій графіку, тим більше закон розподілу залишків відповідає нормальному закону.

Аналіз даних, які наведено на рисунках 2, 3 показує, точки досить щільно розміщені на прямій, що свідчить про адекватність отриманої моделі [12].

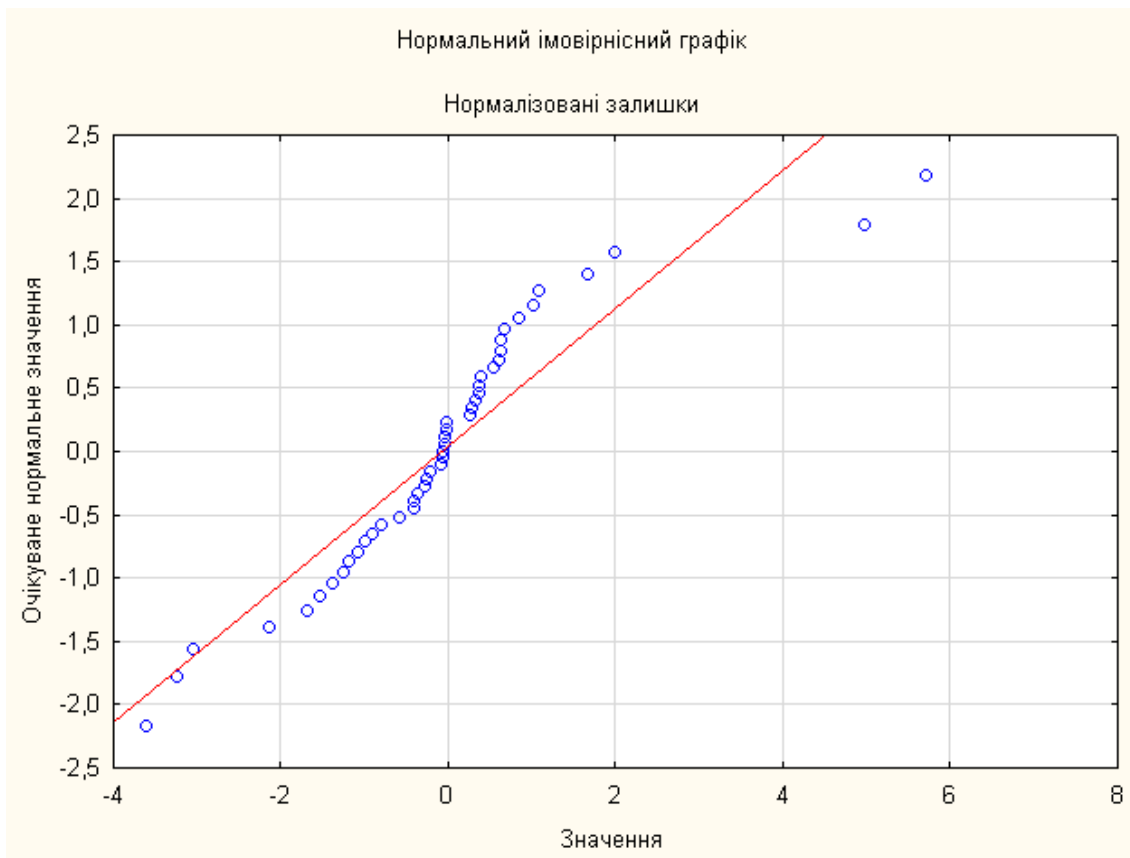
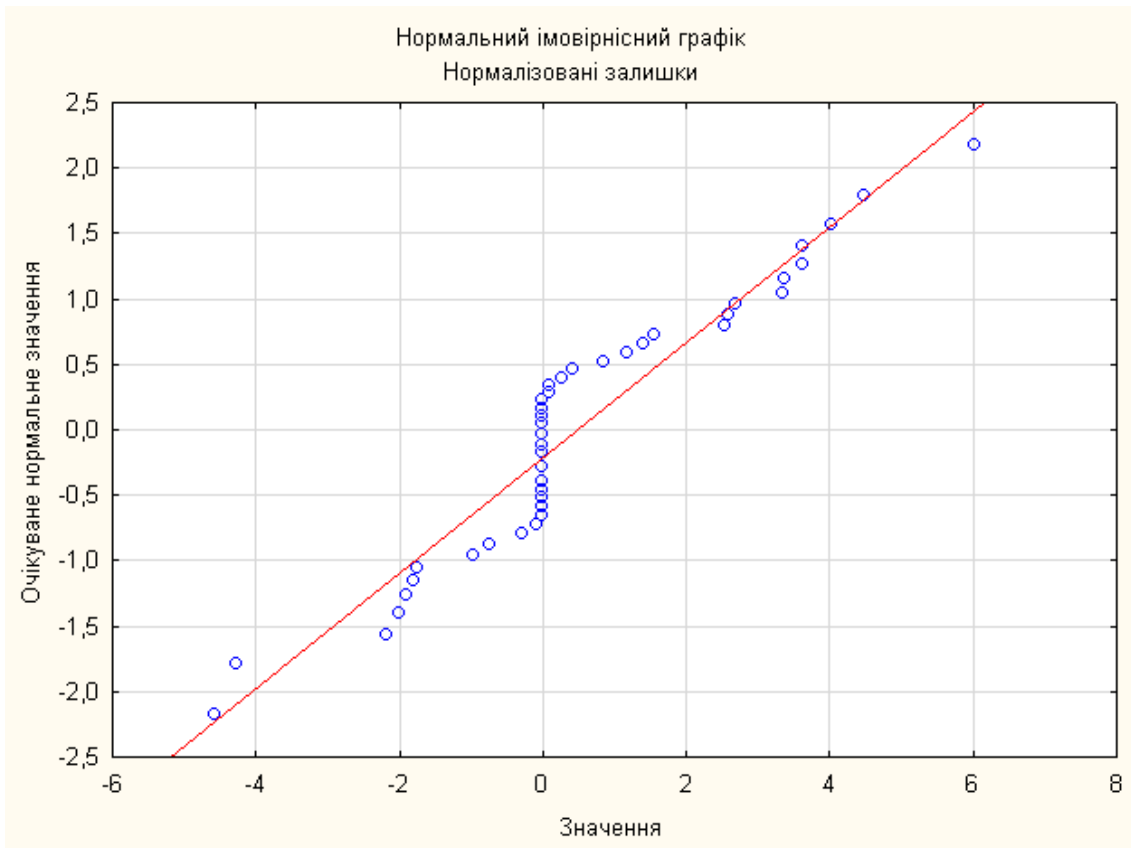
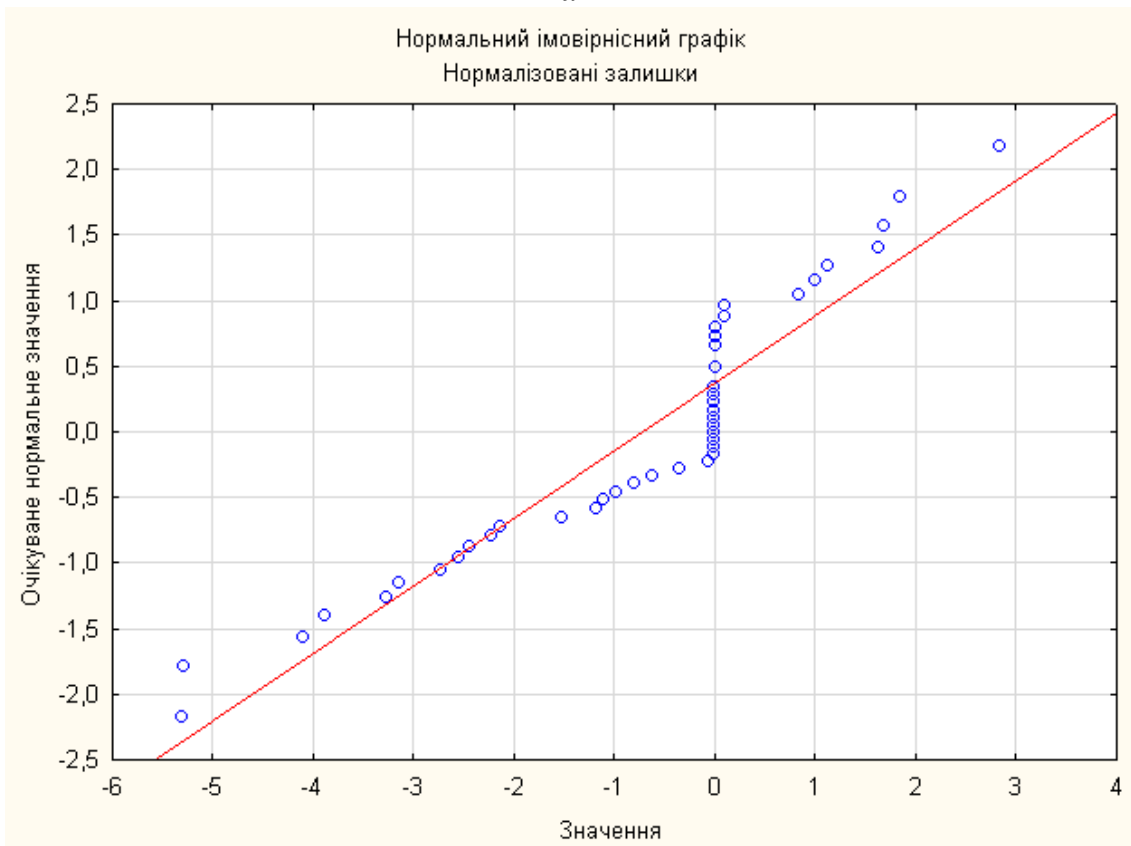


Рис. 2. Графічна інтерпретація кореляційного аналізу після електронно-променевого зварювання: сталь 09Г2С



*a*



*б*

Рис. 3. Графічна інтерпретація кореляційного аналізу після електронно-променевого зварювання: *a* – сталь 10ХСНД; *б* – сталь 10Г2ФБ



**Висновки.** Застосовуючи математичний апарат підтверджуючого факторного аналізу було проаналізовано залежність між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після електронно-променевого зварювання та відповідним структурним станом.

1. Підтверджуючий факторний аналіз виконано шляхом побудови діаграми шляхів. В якості змінних для отримання діаграми використовувались: відсотковий вміст структурних складових фериту та перліту; геометричні розміри ділянок зварного з'єднання.
2. Для перевірки адекватності отриманої моделі застосовувались математичні методи коваріаційного та кореляційного аналізу. Отримані дані показують, що показники отриманих критеріїв відповідають достовірності, а саме, отримані критерії УУПММ та УИМ приближені до нуля; імовірнісний рівень близький до 1; коефіцієнти між коваріаціями та кореляції та вихідні дані значимі на рівні  $p=0$ .
3. В роботі запропоновано методику застосування математичного апарату підтверджуючого факторного аналізу для кількісного аналізу взаємозв'язку між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідним структурним станом. Дану методику розроблено для застосування в модулі моделювання структурними рівняннями (Sepath) програмного комплексу Statsoft Statistica 10.0.

#### Перелік посилань

1. Слупська Ю.С. (2021). *Особливості моделювання процесів формування структури в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей*: дис. Доктора філософії: 132 / Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Дніпро.
2. Лаухін, Д. В., Бекетов, О. В., Тютєрев, І., Слупська, Ю. С., Ротт, Н. О. (2021). Застосування методів факторного аналізу у дослідженні структурного стану зварного з'єднання після лазерного зварювання. *Український журнал будівництва та архітектури*, (3), 91–100.
3. Братушка С.М., Нехай В.В. (2009). Імітаційне моделювання як інструмент дослідження складних економічних систем. *Вісник Української академії банківської справи*, 2, 113–118.
4. Томашевський, В. М. (2015). Засоби імітаційного моделювання для навчання, які ґрунтуються на мові GPSS. *Технічні науки та технології*, (2), 101–105.
5. Slupska, Y.S., Laukhin, D.V., Beketov, O.V., Babenko, E.O., Rott, N.O., & Dytiuk, V.E. (2021). Metallographic analysis of potential areas of destruction initiation of the zone of thermal impact of low-carbon steels after laser welding. *Materials Science and Industrial Mechine-Building*. (65), 88–98.
6. Опря, А. Т. (2012). *Статистика (модульний варіант з програмованою формою контролю знань): навчальний посібник*. Київ «Центр учбової літератури».
7. Diez, D., Cetinkaya-Rundel, M., & Barr, Ch. (2019). *OpenIntro Statistics. 4-th ed.* <https://lib.sumdu.edu.ua/library/DocumentView?docid=USH.4690507&field=0>
8. Слупська, Ю.С., Лаухін, Д. В., Бекетов, О. В., Тютєрев, І. А., & Ротт, Н. О. (2021). Застосування методів факторного аналізу у дослідженні структурного стану зварного з'єднання після лазерного зварювання. *Український журнал будівництва та архітектури. Науково-практичний журнал*, 3, 91–100.
9. Геєць, В. М., Клебанова, Т. С., & Черняк, О. І. (2005). *Моделі та методи соціально-економічного прогнозування*. ВД «ІНЖЕК».

10. Фетісов, В. С. (2018). *Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA*. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя.
11. Грибок, М. І. (2009). Імітаційне моделювання похибок вимірювання параметрів високоомних трикомпонентних комплексних опорів методом зміщення системи координат за струмом. *Вісн. Нац. Ун-ту «Львів. Політехніка»*, (639), 224–234
12. Бекетов, О. В., Лаухін, Д., Слупська, Ю. С., Ракаєв, О. М., & Прихно, К. Є. (2023). Застосування методу статистичних випробувань для імітаційного моделювання складних систем. *Український журнал будівництва та архітектури*, (5), 36–43.

#### ABSTRACT

**Purpose.** This study investigates the relationship between the geometrical parameters of welded zones and the corresponding structural state formed in low-carbon low-alloy steels after electron beam welding.

**Methods.** A simulation model was developed and simulation experiments were conducted.

**Results.** The relationship between the geometrical parameters of welded zones and the corresponding structural state of low-carbon low-alloy steels 09G2S, 10KhSND, and 10G2FB after electron beam welding was analyzed using confirmatory factor analysis. Confirmatory factor analysis was performed by constructing a path diagram. The following variables were used to obtain the diagram: the percentage content of the structural components of ferrite and pearlite; geometric dimensions of the welded joint sections. Mathematical methods of covariance and correlation analysis were used to check the adequacy of the obtained model. The obtained data show that the indicators of the obtained criteria correspond to reliability.

**Scientific novelty.** The methodology of applying confirmatory factor analysis for the quantitative analysis of the relationship between the geometrical parameters of welded zones and the corresponding structural state was developed. The relationship between the geometric dimensions of the welded joint zones and the corresponding structural state formed in low-carbon, low-alloy steels after electron beam welding and the corresponding structural state was analyzed.

**Practical significance.** The confirmatory factor analysis was used to analyze the relationship between the geometrical parameters of welded zones and the corresponding structural state of low-carbon low-alloy steels 09Г2С, 10ХСНД, and 0Г2ФБ.

**Keywords:** *confirmatory factor analysis, path diagram, covariance analysis, correlation analysis, maximum likelihood method, least squares method.*