

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЛУПСЬКА ЮЛІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 669-1:691.714.122:519.237


ДИСЕРТАЦІЯ
ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ
СТРУКТУРИ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ
НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Спеціальність 132 – Матеріалознавство

Галузь знань – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


Ю.С. Слупська

Науковий керівник Бекетов Олександр Вадимович,
доктор технічних наук, доцент

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Слупська Ю.С. Особливості моделювання процесів формування структури в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, 2021.

На теперішній час, серед поширених видів з'єднання будівельних металоконструкцій зварювання є одним із найбільш універсальних і дієвих методів отримання нероз'ємних з'єднань. При цьому, якість зварних з'єднань у більшості випадків можливо контролювати в готових виробах шляхом застосування руйнівних і не руйнівних методів контролю. З іншого боку, вирішення складних задач проектування багатоповерхових споруд та споруд, відповідного призначення потребує визначення властивостей зварного з'єднання вже на стадії розробки проектних документацій. Одним із можливих шляхів вирішення даної задачі, є імітаційне фізико-математичне моделювання процесів зварювання з урахуванням матеріалів, які для цього використовуються.

Метою дослідження є фізико-математичний аналіз процесів формування структурного стану в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі використано сучасні методи дослідження структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, а саме: лазерного зварювання, електронно-променевого зварювання, та автоматичного зварювання під шаром флюсу.

Під час проведення досліджень було використано такі методики, як: методика проведення зварювання, проведення металографічних досліджень та растрової мікроскопії, методика побудови математичних моделей. Побудова математичної моделі здійснювалась за допомогою модуля моделювання

структурними рівняннями (SEPATH) програми STATSOFT STATISTICA 10.0. Для вирішення завдань, поставлених в дисертаційній роботі, були використані наступні методи моделювання: факторний аналіз, регресійний аналіз, кореляційний аналіз, моделі структурних рівнянь, підтверджуючий факторний аналіз, аналіз за допомогою методу Монте-Карло.

Експериментальні зварювання здійснювали на обладнанні Інституту електрозварювання ім. Е.О.Патона НАН України. Лазером зварювали стикові з'єднання пластин розміром $290 \times 140 \times 18$ мм з застосуванням Nd:YAG-лазера моделі DY 044 (фірми «Rofin Sinar», Німеччина) потужністю до 4,4 кВт з фокусною відстанню $F = 300$ мм. Випромінювання від лазера до об'єктиву передавалося по оптичному волокну діаметром 600 мкм. У процесі зварювання переміщалося зварювальна голівка з системою захисту. Коренева частина зварного шва знаходиться в атмосфері ($\text{Ar} + \text{CO}_2$). Ванна розплаву і її хвостова частина була захищена за допомогою сопла зварювальної голівки. Швидкість зварювання становила 1.5 м/хв.

Електронно-променеве зварювання виконували в установці УЛ-144, оснащеної джерелом живлення ЕЛА-60/60, зварювальної гармати ЦФ-4 і приладом керування променем СУ-220. Зварювання проводили по параметрам: прискорює напруга – 60кВ; струм променя – 70 мА; діаметр кругової розгортки на поверхні на відстані 100 мм від зварюваного виробу складає 2 мм; швидкість зварювання 5,5 мм/с (20 м/год). У всіх випадках режими зварювання забезпечували виконання швів за один прохід без застосування присадного дроту і без оброблення крайок. Погонна енергія при електронно-променевому зварюванні становила 3,11 кДж/см.

Автоматичне дугове зварювання виконувалося під флюсом АНКС-28, проволокою Св-10Г1НМА1. Шов на режимах: 1 шов (вузький) – 600А-28В-19м/ч; 2 шов (широкий) – 750А-33В-19м/ч.

В ході виконання дослідження показано, що умовно структуру зварного шва можна розділити на чотири зони: I - зварний шов, II - границя зварний шов - зона термічного впливу, III - зона термічного впливу, IV - границя зона термічного

впливу - основний метал, при цьому, кожна з цих зон буде мати власний структурний стан. Встановлено, що саме границі між структурно різними ділянками зварного з'єднання будуть оказувати найбільший вплив не тільки на якість самого з'єднання, але і на механічні властивості готової конструкції.

З метою проведення аналізу взаємозв'язку між структурними складовими та режимами зварювання було використано декілька методик імітаційного фізико-математичного моделювання, а саме: факторний аналіз; регресійний аналіз; кореляційний аналіз; коваріаційний аналіз; моделі структурних рівнянь; підтверджуючий факторний аналіз; аналіз за допомогою методу Монте-Карло.

Проведений комплекс досліджень структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей показав, що після лазерного зварювання для всіх досліджувальних марок сталі, небезпечною ділянкою структури зварного з'єднання є зона термічного впливу. Встановлено, що на границі між швом та зоною термічного впливу спостерігається значне збільшення ступеню мікронапружень, порівняно з іншими зонами шва, це свідчить про те, що саме ця границя структурного стану буде потенційним місцем зародження руйнування.

Проведений металографічний аналіз показав присутність конгломерата структур в зварному з'єднанні, що містить складові, характерні не тільки для литого та рекристалізованого металу, але і характерні для охолодженого металу.

Проведений комплекс досліджень після електронно-променевого зварювання показав, що для всіх досліджувальних марок сталі формування структурного стану в зоні шва являє собою стовбчасті кристаліти, які зростають від поверхні розплавленого металу до центру шва.

Проведений комплекс металографічних досліджень дозволив встановити на границі між швом та зоною термічного впливу чітку лінію розділу, формування якої обумовлено процесами зернограничної міграції, яка відбувається під час охолодження зварного з'єднання.

Показано, що структурний стан зони термічного впливу формується в наслідок локального впливу теплоти джерела зварювання. Як наслідок, структура зон відповідає процесам структуроутворення, які відповідають режимам

вторинної термічної обробки основного металу при нагріванні до температур вище A_{c3} , та наступного охолодження з різними швидкостями.

Проведений комплекс досліджень після автоматичного зварювання під шаром флюсу показав, що в зоні зварного шва спостерігається дендритна структура, яка була отримана як наслідок неповної сегрегації домішок, що потрапляють до розплаву з флюсу.

Обґрунтовано, що для сталей 10ХСНД на границі між зварним швом та зоною термічного впливу, та у зоні термічного впливу в наслідок підвищеної швидкості охолодження спостерігається поява відменштетового фериту та дрібних колоній квазієвтектоїду. Для сталей 09Г2С та 10Г2ФБ в наслідок перерозподілу вуглецю спостерігається поява бейнітної складової. Встановлено, що на границі між зоною термічного впливу та основним металом спостерігається поява зерен фериту та дрібних колоній квазієвтектоїду, що є наслідком часткової рекристалізації вихідного зерна аустеніту.

За результати кількісного аналізу виявлено, що для сталей 09Г2С та 10Г2ФБ відсотковий вміст доєвтектоїдного фериту буде змінюватися зі збільшенням відстані від зони сплавлення, що як наслідок обумовлено появою бейнітної складової. Для сталі 10ХСНД підвищена швидкість охолодження в зоні з'єднання обумовлена появою відманштетового фериту. Слід зазначити, що в наслідок перерозподілу вуглецю в зонах зварного з'єднання також виявлено підвищений вміст колоній квазієвтектоїду, що пояснюється формуванням областей с концентрацією вуглецю $\sim 0,78\%C$.

Вперше досліджено та удосконалено застосування математичного апарату факторного аналізу з метою вирішення матеріалознавчих задач, та аналізу структурного стану сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання, в результаті чого було здійснено групування факторів, а також групування змінних у фактори, та як наслідок, були отримані відповідні якісні залежності. Для удосконалення подальшого дослідження було виконано скорочення кількості факторів використовуючи методи варімакс, кватрімакс, еквімакс.

У результаті проведеного комплексу досліджень за допомогою математичного апарату факторного аналізу було виявлено, що найбільш значущими змінними структурного стану зварних з'єднань є відсотковий розподіл феритної та перлітної структурної складової.

Здійснено дослідження процесу зварювання із застосуванням математичного моделювання підтверджуючого факторного аналізу, моделювання структурними рівняннями та методом Монте-Карло використовуючи програмний комплекс STATSOFT STATISTICA 10.0. У процесі дослідження була побудована модель діаграми шляхів у вигляді комп'ютерного мови *PATH1*, та діаграми шляхів, де в якості змінних використовувались відсотковий вміст структурних складових фериту та перліту, а також геометричні розміри ділянок зварного з'єднання для всіх досліджувальних марок сталі для різних режимів зварювання.

За допомогою математичного моделювання структурними рівняннями побудовано діаграми шляхів, та більш детально досліджено корелюючі залишки відсоткового співвідношення феритної та перлітної складової на границі між зварним швом та зоною термічного впливу. Побудовані імовірнісні графіки нормалізованих залишок підтвердили адекватність отриманих моделей.

Проведено дослідження за допомогою імітаційного моделювання за допомогою методу Монте-Карло, отримані відповідні результати, які знаходяться в допустимих межах, та підтверджують те, що отримані результати факторного аналізу, підтверджуючого факторного аналізу та за допомогою моделювання структурними рівняннями було зроблено вірно.

Ключові слова: факторний аналіз, факторні навантаження, регресійний аналіз, кореляційний аналіз, підтверджуючий факторний аналіз, метод Монте-Карло.

ABSTRACT

Yu. S. Slupska Features of modeling the processes of structure formation in welded joints of low-carbon low-alloy steels. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Theses for obtaining a scientific degree of the Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 - Mechanical engineering on a specialty 132 - Materials science. - State Higher Educational Institution Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, 2021.

At present, among the common types of joints of building metal structures, welding is one of the most versatile and effective methods of obtaining integral joints. Together with this, the quality of welded joints in most cases can be controlled in the finished product by using destructive and non-destructive methods of control. On the other hand, bringing solutions for complex problems of designing multi-storey buildings and special-purpose structures requires to determine the properties of the welded joint at the stage of document development. One of the possible ways to solve this problem is to simulate physical and mathematical modeling of welding processes, taking into account the materials used for this purpose.

The aim of the research is physical and mathematical analysis of the processes of structural state formation in welded joints of low-carbon low-alloy steels after different welding modes.

To achieve this goal, modern methods of studying the structural state of low-carbon low-alloy steels after different welding modes were used in the thesis. The methods are laser welding, electron beam welding, and automatic submerged arc welding.

During the research, the following methods were used: methods of welding, metallographic studies and scanning microscopy, methods of building mathematical models. The mathematical model was built using the structural equation modeling module (SEPATH) of the STATSOFT STATISTICA 10.0 program. To solve the problems posed in the thesis, the following modeling methods were used: factor analysis, regression analysis, correlation analysis, models of structural equations, confirmatory factor analysis, analysis using the Monte Carlo method.

Experimental welding was carried out on the equipment of the Institute of Electric Welding named after E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine. The butt joints of 290×140×18 mm plates were welded with a laser using a

Nd:YAG laser model DY 044 (Rofin Sinar, Germany) with a power of up to 4.4 kW and $F=300$ mm focal length. The radiation from the laser to the lens was transmitted via an optical fiber with a diameter of $600\mu\text{m}$. In the process of welding, the welding head with the protection system was moved. The root part of the weld is in the atmosphere ($\text{Ar}+\text{CO}_2$). The melt bath and its tail were protected by a welding head nozzle. The welding speed was 1.5 m/min

Electron beam welding was performed in the installation YJI-144 (UL-144), equipped with a power supply EJA-60/60 (ELA-60/60), welding gun ИФ-4 (CF-4) and beam control device CY-220 (SU-220). Welding was performed according to the following parameters: accelerating voltage - 60 kV; beam current - 70 mA; the diameter of the circular scan on the surface at a distance of 100 mm from the welded product is 2 mm; welding speed is 5.5mm/s (20m/h). In all cases, the welding modes provided for the formation of seams in one go without the use of filler wire and without processing the edges. The running energy in electron beam welding was 3.11 kJ/cm.

Automatic arc welding was performed under the flux AHKC-28 (ANKS-28), with wire CB-10Г1HMA1 (Sv-10G1NMA1). Seam on modes: 1st seam (narrow) - 600A-28V-19m/h; 2nd seam (wide) - 750A-33V-19m/h.

In the course of the study, it was shown that the structure of the weld can be divided into four zones: I - weld, II - boundary weld - zone of thermal impact, III - zone of thermal impact, IV - boundary zone of thermal impact - the base metal, while, each of these zones will have its own structural state. It is established that the boundaries between structurally different parts of the welded joint will have the greatest impact not only on the quality of the joint, but also on the mechanical properties of the finished structure.

In order to analyze the relationship between the structural components and welding modes, several methods of simulation physical and mathematical modeling were used, namely: factor analysis; regression analysis; correlation analysis; covariance analysis; models of structural equations; confirmatory factor analysis; analysis using the Monte Carlo method.

The complex of studies of the structural state of low-carbon low-alloy steels showed that after laser welding for all research grades of steel, the zone of thermal impact is a dangerous part of the welded joint structure. It was established that, at the boundary between the seam and the zone of thermal impact, there is a significant increase in the degree of microstresses compared to other zones of the seam, which indicates that this boundary of the structural state will be a potential site of destruction.

The metallographic analysis showed the presence of a conglomerate of structures in the welded joint, which contains components characteristic not only of cast and recrystallized metal, but also characteristic of cooled metal.

The complex of studies conducted after electron beam welding showed that for all research grades of steel the formation of the structural state in the weld zone is a columnar crystallite that grows from the surface of the molten metal to the center of the seam.

The complex of metallographic studies allowed to establish a clear dividing line at the boundary between the seam and the thermal zone, the formation of which is due to the processes of grain boundary migration, which occurs during cooling of the welded joint.

It was shown that the structural state of the thermal impact zone is formed as a result of the local heat influence coming from the welding source. As a result, the structure of the zones corresponds to structure formation processes, which are in line with the modes of secondary heat treatment of the parent metal when heated to temperatures above A_{c3} , and subsequent cooling at different speeds.

A set of studies after automatic welding under a layer of flux showed that, in the area of the weld, there is a dendritic structure, which was obtained as a result of incomplete segregation of impurities entering the melt from the flux.

It was substantiated that for steels 10KhND at the boundary between the weld and the zone of thermal influence, and in the zone of thermal influence due to the increased cooling rate, the appearance of Widmanstätten ferrite and small colonies of quasi-eutectoid is observed. For steels 09Г2С (09G2S) and 10Г2ФБ (10G2FB), as a result of carbon redistribution, the appearance of bainitic component is observed. It was

established that at the boundary between the zone of thermal influence and the base metal the appearance of ferrite grains and small colonies of quasi-eutectoid is observed, which is a consequence of partial recrystallization of the original austenite grain.

According to the results of quantitative analysis, it was found that for steels 09Г2С (09G2S) and 10Г2ФБ (10G2FB) the percentage of pre-eutectoid ferrite will change with increasing distance from the fusion zone, which is due to the appearance of the bainite component. For 10XCHД (10KhND) steel, the increased cooling rate in the joint area is due to the appearance of a cuff ferrite. It should be noted that as a result of redistribution of carbon in the areas of the welded joint, an increased content of quasi-eutectoid colonies was also detected, which is explained by the formation of areas with a carbon concentration of $\sim 0.78\%$ C.

For the first time, the application of mathematical apparatus of factor analysis for solving Material Science problems and analysis of structural condition of steels 09Г2С (09G2S), 10XCHД (10KhHSND), 10XCHД (10G2FB) after different welding modes was investigated and improved, as a result of which grouping of factors and grouping of variables into factors was carried out, the corresponding qualitative dependences were received. To improve further research, a reduction in the number of factors was performed using the methods of varimax, quartimax, equimax.

As a result of a set of studies conducted with the application of a mathematical apparatus of factor analysis, it was found that the most significant variables in the structural state of welded joints are the percentage distribution of ferrite and pearlitic structural components.

A study of the welding process was carried out using mathematical modeling of confirmatory factor analysis, modeling with structural equations and the Monte Carlo method using STATSOFT STATISTICA 10.0 software package. In the course of the research, a model of the path diagram in the form of computer language PATH1 was constructed, as well as in the form of the path diagram, where the variables used the percentage of structural components of ferrite and perlite, as well as the geometric dimensions of welded sections for all steel grades for different modes welding.

With the help of mathematical modeling, structural diagrams were constructed by path diagrams, and the correlated residuals of the percentage of ferrite and pearlitic component at the boundary between the weld and the zone of thermal influence were investigated in more detail. The constructed probability graphs of the normalized balances confirmed the adequacy of the obtained models.

A study was carried out using simulation modeling using the Monte Carlo method, the relevant results were received. The results are within acceptable limits, and confirm that the results of factor analysis, confirmatory factor analysis and modeling by structural equations were correct.

Key words: factor analysis, factor loads, regression analysis, correlation analysis, confirmatory factor analysis, Monte Carlo method.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. **Slupska Y.**, Laukhin D., Poznyakov V., Kostin V., Beketov O., Rott N., Dadiverina L., Liubymova-Zinchenko O. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. *Materials science. East-ern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, № 12 (111). P. 25-31.
2. **Slupska Y.**, Laukhin D., Beketov O., Babenko E., Rott N., Dytiuk V. 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. P. 88-98.
3. **Слупська Ю.С.**, Лаухін Д.В., Бекетов О.В., Тютєрев І.А., Ротт Н.О., Чашин Д.Ю., Торопченєв Г.О., Пико М.О. Металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після автоматичного зварювання під шаром флюсу. *Modern engineering and innovative technofogies*. April 2021. №16, Part 1. С. 105-113.
4. **Слупська Ю.С.**, Узлов О.В., Дрожєвська Г.В., Пучиков О.В., Шпак О.А. Підвищення ресурсу експлуатації дисків пилок горячого різання металу

шляхом термічної обробки. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 1 (88). С. 70-80.

5. Слупська Ю.С., Іванцов С.В., Тютєрев І.А., Сінчук Р.Р. Прогноз механічних властивостей виробів із металу. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 1 (92). С. 30-40.
6. Слупська Ю.С., Дадіверіна Л.М., Чашин Д.Ю., Торопченєв Г.О., Пико М.О. Вплив границь зерен на розвиток деформації в низьковуглецевих низьколегованих сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 2 (93). С. 55-63.
7. Слупська Ю.С., Лаухін Д. В., Бекетов О. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О. Застосування методів факторного аналізу у дослідженні структурного стану зварного з'єднання після лазерного зварювання. *Український журнал будівництва та архітектури. Науково-практичний журнал*. 2021. № 3 (003). С. 91-100.

Роботи апробаційного характеру:

8. Слупська Ю.С., Бекетов О.В., Лаухін Д.В., Ротт Н.О. Дослідження структурного стану зварних з'єднань низьковуглецевих мікролегованих сталей. *Досягнення і перспективи науки, освіти та виробництва* : матеріали І Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції (м. Київ, 23 грудня 2020 року). Київ, 2020. С. 245-246.
9. Слупська Ю.С., Бекетов О.В., Лаухін Д.В., Дадіверіна Л.М., Бабенко Є.О. Загальні характеристики руйнування низьковуглецевих мікролегованих сталей: *тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції з нагоди 90-річчя ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»*. «Інноваційні технології в будівництві, цивільній інженерії та архітектурі» (26 листопада 2020 року). Дніпро: ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2020. С. 48-50.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ КОНЦЕПЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ЗВАРНИХ	
МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА.....	
1.1. Теоретичний аналіз фізико-математичних моделей проектування та експлуатації зварних конструкцій.....	21
1.2. Технологія виробництва, структура та властивості матеріалів для будівельних металевих конструкцій	23
1.3. Аналіз технологічних схем виробництва та з'єднання будівельних металоконструкцій	28
1.4. Аналіз технологічних схем зварювання, які застосовуються при виробництві будівельних металоконструкцій.....	31
1.5. Постановка проблеми та висновки по розділу 1	37
1.6. Список використаних джерел в розділі 1	39
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	
2.1. Матеріал дослідження.....	40
2.2. Методика проведення зварювальних робіт	42
2.3. Методика проведення металографічних досліджень	44
2.4. Методика проведення растрової мікроскопи	45
2.5. Методика побудови математичних моделей.....	46
2.6. Висновки по розділу 2	49
2.7. Список використаних джерел в розділі 2	49
РОЗДІЛ 3. МЕТАЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЗОН	
КОНТАКТУ НИЗЬКОВУГЛИЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ	
ПІСЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ.....	
3.1. Загальні принципи металографічного аналізу зон зварного з'єднання.....	50
3.2. Дослідження структури з'єднання після лазерного зварювання	52
3.3. Дослідження структури з'єднання після електронно-променевого зварювання	58
3.4. Дослідження структури з'єднання після зварювання під шаром флюсу	60

3.5. Кількісний аналіз структурного стану, який формується після різних режимів зварювання низьковуглецевих низьколегованих сталей	64
3.6. Висновки по розділу 3	73
3.7. Список використаних джерел в розділі 3	75
РОЗДІЛ 4. КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА КРИТЕРІЯМИ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОГО СТАНУ З'ЄДНАННЯ	76
4.1. Кореляційний аналіз взаємозв'язку між параметрами процесу зварювання та відповідним структурним станом матеріалу	76
4.2. Застосування факторного аналізу для дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталі 09Г2С та різними режимами зварювання.....	81
4.3. Застосування факторного аналізу для дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталі 10ХСНД та різними режимами зварювання.....	93
4.4. Застосування факторного аналізу для дослідження взаємозв'язку у між структурним станом сталі 10Г2ФБ та різними режимами зварювання	101
4.5. Застосування методів регресійного аналізу для оцінки отриманих факторних залежностей	108
4.6. Висновки по розділу 4	127
4.7. Список використаних джерел в розділі 4	128
РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ...	129
5.1. Підтверджуючий факторний аналіз	129
5.2. Коваріаційний аналіз отриманих даних в результаті підтверджуючого факторного аналізу	133
5.3. Кореляційний аналіз отриманих даних в результаті підтверджуючого факторного аналізу	139
5.4. Моделювання структурними рівняннями.....	147
5.5. Аналіз результатів отриманої моделі діаграми шляхів структурними рівняннями	150
5.6. Аналіз результатів отриманої моделі діаграми шляхів	

коррелюючих залишків.....	157
5.7. Імітаційне моделювання методом Монте-Карло	165
5.8. Висновки по розділу 5	170
5.9. Список використаних джерел в розділі 5	171
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	172
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	178
ДОДАТОК А. Кореляційний аналіз	199
ДОДАТОК Б. Факторні навантаження	204
ДОДАТОК В. Регресійний аналіз.....	215
ДОДАТОК Г. Модель підтверджуючого факторного аналізу	227
ДОДАТОК Д. Модель структурного моделювання	246
ДОДАТОК Е. Модель методом Монте-Карло	260
ДОДАТОК Є. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	261
ДОДАТОК Ж. Список публікацій здобувача і відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.....	262

ВСТУП

Актуальність роботи. Потреба підвищення якості та довговічності металу і економії його в машинобудуванні безпосередньо пов'язана з підвищенням якості і конкурентоспроможності продукції, а також із створенням нових конструкцій матеріалів. Дуже важливим є підвищення властивостей, існуючих, відомих і широко використовуваних матеріалів. Зварювальна техніка й технологія займають одне із провідних місць у сучасному виробництві.

На стадії проектування обраний тип з'єднання зумовлює появу конструктивних концентраторів напружень, а призначення методу і прийомів зварювання – поява характерних технологічних дефектів, ймовірність виявлення і виправлення яких в процесі виготовлення буде визначатися рівнем культури виробництва. Природно, ці концентратори напружень, як конструктивного, так і технологічного характеру, в умовах експлуатації зварної конструкції стають потенційними джерелами руйнувань. Вимоги до процесів зварювання з кожним роком все більше специфічні і набувають особливого значення особливо з точки зору збільшення енергоефективності. Як наслідок, найважливішим моментом при забезпеченні надійності і міцності зварювання є зони, які утворюються під час формування шва. Їх технологічність та енергоефективність напряму від конфігурації, способу та режиму зварювання.

При цьому, якість зварних з'єднань у більшості випадків можливо контролювати в готових виробах шляхом застосування руйнівних і не руйнівних методів контролю. З іншого боку, вирішення складних задач проектування багатопверхових споруд та споруд, відповідного призначення потребує визначення властивостей зварного з'єднання вже на стадії розробки проектних документів. Одним із можливих шляхів вирішення даної задачі, є імітаційне фізико-математичне моделювання процесів зварювання з урахуванням матеріалів, які для цього використовуються.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі матеріалознавства і обробки матеріалів ДВНЗ ПДАБА за планами науково-дослідних робіт та

фундаментальних досліджень у рамках тем (де здобувач був виконавцем і відповідальним виконавцем): «Дослідження взаємозв'язку між механізмами формування структури та комплексом властивостей будівельних матеріалів» (№0116U004538, 2016 – 2020 рр.; керівник д.т.н., проф. Большаков В.І.); зараз працює над виконанням науково-дослідної роботи «Матеріалознавчі основи підвищення експлуатаційних властивостей конструкційних матеріалів» (№0121U109926, 2021 – 2023 рр. ; керівник д.т.н., проф. Большаков В.І.).

Мета і задачі дослідження. Фізико-математичний аналіз процесів формування структурного стану в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання.

Для досягнення поставленої мети було виконано **наступні задачі:**

1. Провести металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, а саме: лазерного зварювання, електронно-променевого зварювання, та автоматичного зварювання під шаром флюсу;
2. Провести кількісний аналіз елементів структури зварних з'єднань низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, та визначити геометричні розміри відповідних ділянок з'єднання та критерій оцінки структурного стану;
3. Провести кореляційний аналіз між критеріями оцінки структурного стану та технологічними параметрами процесу зварювання.
4. З застосуванням математичного апарату факторного аналізу оцінити взаємозв'язок між технологічними параметрами зварювання та критеріями оцінки структурного стану;
5. З використанням математичного апарату імітаційного моделювання методом підтверджуючого факторного аналізу та методом структурних рівнянь проаналізувати отриманий взаємозв'язок між технологічними параметрами зварювання та критеріями оцінки структурного стану;

6.3 застосуванням методу статичних виборок (метод Монте-Карло) промоделювати та оцінити взаємозв'язок між технологічними параметрами зварювання та критеріями оцінки структурного стану.

Об'єкт дослідження. Процеси структуроутворення, які відбуваються в низьковуглецевих низьколегованих сталях після зварювання за різними режимами.

Предмет досліджень. Кількісний аналіз взаємозв'язку між технологічними параметрами зварювання та відповідним структурним станом низьковуглецевих низьколегованих сталей.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано сучасні методи дослідження структурного стану зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей, а саме: методика металографічних досліджень з застосуванням оптичного та скануючого мікроскопа; проведення растрової електронної мікроскопії; кількісний металографічний аналіз за допомогою методу січних; побудову математичних моделей було виконано з застосуванням наступних методів: математичний апарат факторного аналізу, регресійний аналіз, кореляційний аналіз, методи моделювання структурних рівнянь, метод підтверджуючого факторного аналізу, метод Монте-Карло.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Виявлено особливості морфологічної будови структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання – набуло подальшого розвитку. Розроблена концепція базується на кількісному аналізі параметру структурного стану в окремих зонах зварного з'єднання, а також на границях між зонами.
2. Встановлено взаємозв'язок між критеріями оцінки структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей та технологічними параметрами режимів зварювання – набуло подальшого розвитку. Дана розробка відрізняється застосуванням для кількісного аналізу математичного апарату коваріаційного, кореляційного, регресійного та факторного аналізу.

3. Виявлено та проаналізовано залежність між технологічними параметрами зварювання та структурним станом низьковуглецевих низьколегованих сталей – зроблено вперше. Дана розробка відрізняється застосуванням математичного апарату підтверджуючого факторного аналізу, а саме: групуванням факторів та їх кількісною оцінкою та отриманням загальних і більш впливових факторів.
4. Отримано та проаналізовано математичні моделі між технологічними параметрами зварювання та критеріями оцінки структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей – зроблено вперше. Отримані результати відбувалися з застосуванням математичного імітаційного моделювання, а саме, моделювання структурними рівняннями та методом Монте-Карло.

Практичне значення отриманих результатів.

1. На підставі аналізу процесів формування структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей запропоновано критерій оцінки якості зварного з'єднання після різних режимів зварювання. Дана концепція базується на сумісному аналізу геометричних розмірів ділянок зварного з'єднання та відповідного структурного стану.
2. В ході виконання роботи запропоновано алгоритм використання математичного апарату факторного аналізу для вирішення прикладних задач матеріалознавства, а саме: аналізу впливу технологічних параметрів зварювання на структурний стан з'єднання, і як наслідок, його якість.
3. В роботі запропоновано методику застосування математичного апарату імітаційного моделювання (розроблено відповідні програми на мові *RATH1* в середовищі *STATSOFT STATISTICA 10.0*). Для кількісного аналізу процесів формування структури, які відбуваються під час зварювання за різними режимами низьковуглецевих низьколегованих сталей.
4. В результаті, які отримано в роботі впроваджено навчальний процес кафедри Матеріалознавства та обробки матеріалів та кафедри Фундаментальних і природничих дисциплін.

Особистий внесок здобувача. В роботах, виконаних у співавторстві, здобувачу належить наступне: планування та розробка методик досліджень [25, 28]; проведення досліджень структурних складових, аналіз отриманих результатів та формування висновків [20, 154]; аналіз та узагальнення літературних даних [160]; проведення та аналіз мікроструктурних досліджень, інтерпретація отриманих результатів [122, 155, 157]; дослідження аналізу взаємозв'язку між параметрами процесу зварювання та структурним станом матеріалу з застосуванням математичного апарату факторного аналізу та узагальнення експериментальних результатів [161].

У дисертаційній роботі не використовувалися результати досліджень, наукові положення та висновки кандидатської дисертації здобувача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації оприлюднено у виступах I Міжнародної науково-практичної Інтернет – конференції (м. Київ, 23.12.2020), XVIII Міжнародної науково-практичної конференції з нагоди 90-річчя ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». «Інноваційні технології в будівництві, цивільній інженерії та архітектурі» (м. Дніпро, 26.11.2020).

Публікації. За основними результатами дисертаційної роботи опубліковано 9 статей у провідних фахових виданнях в Україні та за кордоном. Результати дослідження також представлено в 2 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференції.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 169 найменувань на 21 сторінці та 8 додатків. Основний текст дисертації викладено на 132 друкованих сторінках, що містить 56 рисунків, 45 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 263 сторінки.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ КОНЦЕПЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ЗВАРНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА

1.1. Теоретичний аналіз фізико-математичних моделей проектування та експлуатації зварних конструкцій

На теперішній час існує безліч методів, які застосовуються для здійснення математичного моделювання [1, 2]. Серед програмних комплексів, які використовуються для подібного дослідження найбільш поширеними є NASTRAN та ANSYS, а також програми, які застосовуються для вирішення технологічних завдань, а саме – SYSWELD та MARC [3].

Умовно, всі методи, які використовуються при моделюванні процесів зварювання можливо розділити на дві групи [3, 4]:

1. Фізико-математичне моделювання термодинамічних процесів, які відбуваються під час зварювання;

2. Фізико-математичне моделювання умов експлуатації зварного з'єднання, тобто аналіз відповідного напружено-деформованого стану.

До основних фізичних процесів при зварюванні відносяться – теплові, деформаційні, дифузійні, електричні та газодинамічні явища, більшість з яких описується в межах апарату математичної фізики диференціальними рівняннями, параболічного, гіперболічного та еліптичного типу [3].

Так, наприклад в роботі [3] було запропоновано розглядати процес зварювання в три стадії (рисунок 1.1). На першій стадії (А) відбувається розвиток фізичного контакту, здійснюються зближення з'єднання речовин на відстані, які необхідні для міжатомної взаємодії, а також відбувається підготовка поверхонь до її взаємодії. Друга стадія, це стадія (Б), яка ще має назву стадії хімічної взаємодії, її сутність полягає у закінченні процесу утворення міцного з'єднання, яке відбувається на мікроучастку. Підсумкова третя стадія зумовлена появою дифузії.

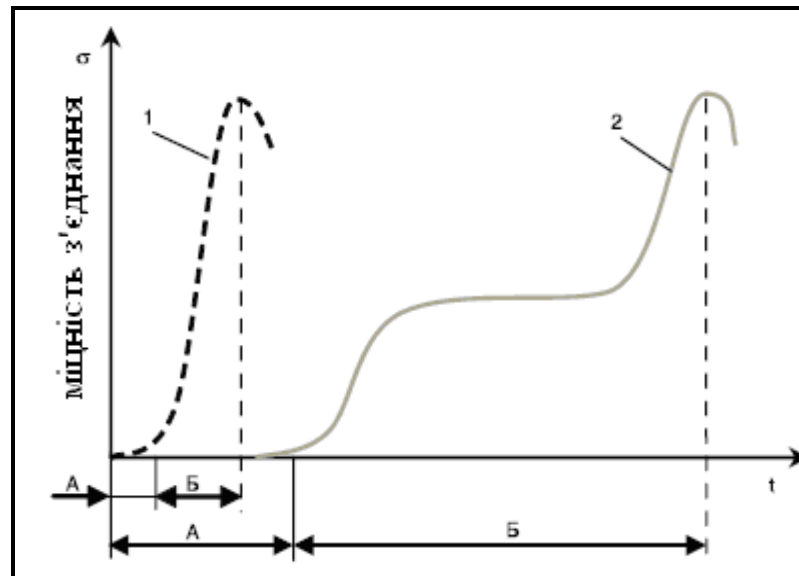


Рисунок 1.1 – Кінетика зміни міцності з'єднання σ при швидкому (1) і повільному (2) розвитку фізичного контакту (А) і хімічного впливу (Б) в залежності від тривалості зварювання t [3]

Для прогнозування напружено-деформованого стану зварних конструкцій найбільшу увагу приділено інженерним методам розрахунку, які засновані на застосуванні методів теорії пружності, наприклад методу кінцевих елементів [5,6]. Основною апроксимацією, в цьому випадку, є розглядання плоского напружено-деформованого стану [6]. Це призводить до значного спрощення моделі, що в свою чергу дає змогу знизити вимоги обчислювальних можливостей системи, та значно скорочує час на розрахунок [7, 2].

Наприклад, в роботі [7] були проведенні дослідження при зварюванні зразків стрингерних панелей сплаву ВТ20, та були показані етапи моделювання напружено-деформованого стану для різних варіантів зварювання цих зразків з розмірами $400 \times 100 \times 2,5$ мм і $400 \times 200 \times 2,5$ мм з одним ребром жорсткості, а також другий зразок з розмірами $1100 \times 550 \times 2,5$ мм з чотирма ребрами жорсткості. В роботі [7] представлено математичну модель, яка в подальшому служить не тільки для вивчення основних видів деформацій, таких як наприклад, поперечна та повздовжня усадка, та кутові деформації, але і дає змогу на вивчення крутильних деформацій, які можуть бути викликані у наслідок виконання зварних з'єднань [3, 6-13].

1.2. Технологія виробництва, структура та властивості матеріалів для будівельних металевих конструкцій

До будівельних сталей підвищеної та високої міцності пред'являються наступні вимоги [14, 15]:

1. Високий рівень межі плинності;
2. Низька температура переходу в крихкий стан;
3. Висока ударна в'язкість;
4. Мінімальна анізотропія в'язкості і пластичності;
5. Хороша зварюваність;
6. Добре формування;
7. Мінімальна вартість.

Низьковуглецеві сталі, які використовуються для металевих конструкцій, класифікують за структурною ознакою або за рівнем основних механічних властивостей [16, 17].

Згідно класифікації за структурною розрізняють наступні класи сталей: ферито-перлітного, ферито-бейнітного, бейнітного і мартенситного. Кожному з цих класів притаманний певний рівень властивостей, який обумовлено технологічною схемою їх виготовлення.

Основним критерієм класифікації сталей за рівнем основних механічних властивостей, є границя плинності або ударна в'язкість [18-20].

Обидві класифікації узагальнено та приведено в таблиці 1.1.

Згідно ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій, стандартизовано по міцності 10 класів сталі [15, 21]:

- сталі звичайною міцності - С235, С245, С255, С275, С285;
- сталі підвищеної міцності - С345, С375, С440, С590;
- сталі високої міцності - С390;

Найбільшого поширення серед технологічних схем виробництва високоміцного прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей набула гаряча прокатка, технологічна схема якої наведена на рисунку 1.2 [22].

При гарячій прокатці метал нагрівається до 1300°C , тобто вище температури рекристалізації. Заготовкою, що служить для застосування гарячої прокатки є сляб, довжина якого становить 1300-5000 мм, та шириною, що на 30-50 мм є більшою ніж ширина готового листа. В якості нагрівання слябів застосовують методичні печі та нагрівальні колодці.

Таблиця 1.1 – Класифікація будівельних сталей за структурною ознакою

Клас сталі	$\sigma_T, \text{Н/мм}^2$, не менше	$KCU, \text{Дж/см}^2$, не менше при температурі, $^{\circ}\text{C}$			Типові сталі	Клас міцності по ДСТУ
		-20	-40	-70		
Ферито-перлітний	265	29	—	—	СтЗсп, СтЗГпс	С255
	345	—	39	34(1)	09Г2С, 17Г1С	С345
	390	—	39	34(1)	10ХСНД	С390
	390	—	—	29(1)	14Г2АФ	С390
	440	—	—	29(1)	16Г2АФ	С440
Ферито-бейнітний	440			29(1)	18Г2АФпс, 16Г2АФ	С440
	440	—	—	29(1)	18Г2АФ	С440
Бейнітний Мартенситний	590		49(2)		14ГСМФР	С590
	590	—	—	29(2)	12ГН2МФАЮ	
	590	—	—	29(3)	12ХЗГНМФ	С590

Примітка. σ_T і KCU наведені для листового прокату товщиною 10-20 мм: після нормалізації або поліпшення (1), поліпшення (2) і високотемпературного відпуски (3).

Нагрів металу, який відбувається перед гарячою прокаткою є важливою операцією процесу прокатки, що забезпечує рівномірний розподіл температури по металу, та здійснюється в якості отримання зменшення опору деформації та для підвищення пластичності металу. Від того, як саме буде передаватися тепло, визначається спосіб нагріву. На теперішній час розрізняють два способи нагріву,

це прямий та непрямий спосіб. Прямий спосіб нагріву отримуємо при умові, якщо тепло буде знаходитися в самому металі, та при цьому температура навколишнього середовища буде нижчою ніж температура металу. У випадку, коли тепло металу безпосередньо передається при зіткненні його з газоподібним, твердим або будь-яким середовищем, яке має більш високу температуру, такий спосіб називається непрямим. При даному способі, передача тепла відбувається за рахунок випромінювання в нагрівальних печах, та досягає 80% всього тепла [16, 23, 24, 25].

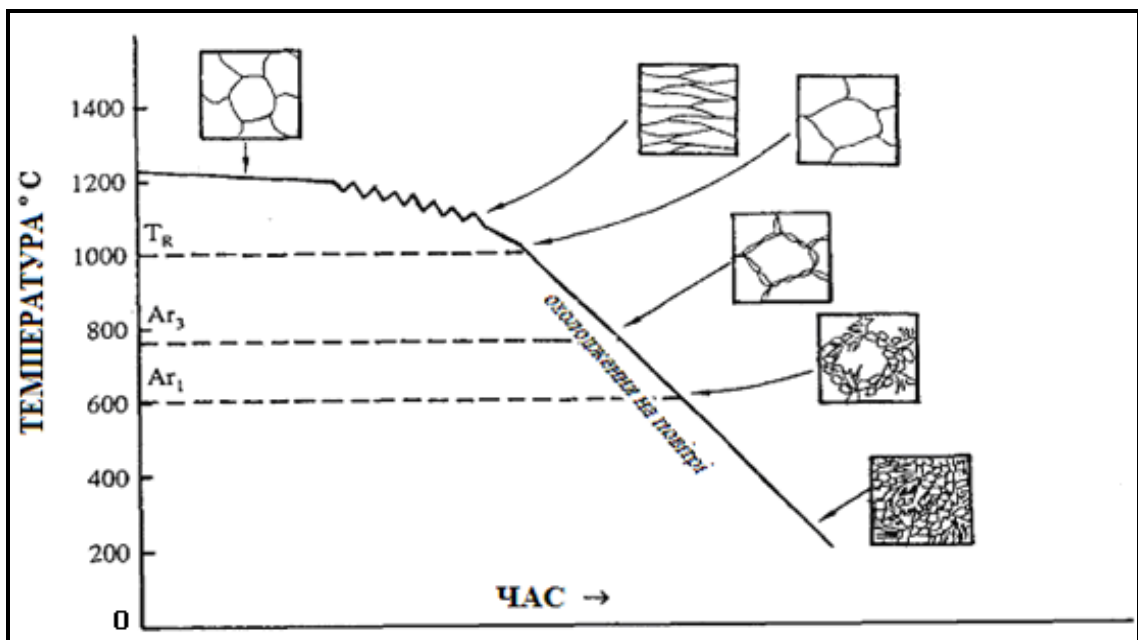


Рисунок 1.2 – Технологічна схема гарячої прокатки [22]

На процес прокатки сприятливо впливає підвищення температури металу за рахунок його нагріву, але нагрів сталі вище певної температури приведе до росту зерна, що в свою чергу буде негативно вплине на механічні властивості сталі, та призведе до утворенню тріщин в металі. Для поліпшення сталі її можуть піддавати термічній обробці. Для призначення режимів нагріву металу, використовують наступні параметри, такі як: температура, швидкість нагріву, та час витримки при постійній температурі. Тому, у процесі прокатки, з метою зниження зусилля деформації та зниження витрати енергії, метал нагрівають до

високих температур, але, у цьому випадку буде відбуватися перегрів або перепал металу. Якщо при прокатці металу буде спостерігатися температура, яка буде вище температури рекристалізації, то зниження пластичності в даному випадку не спостерігається, і опір металу деформації буде залишатися на вихідному рівні. Тоді, слід зазначити, що чим вище буде температура нагріву металу під час прокатки, тим вища буде пластичність, та менше спостерігатиметься деформуюче зусилля. Також встановлено, що для сталей різного хімічного складу, температура нагріву також буде різна, але, надмірно підвищувати температуру нагрівання не рекомендується, чим нижче температура нагріву сталі, тим більший в ній вміст вуглецю. Але, вважається, що найбільш висока температура прокату $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ допускається при низьковуглецевій низьколегованій сталі зі вмістом вуглецю $<0,1\text{ \% C}$ [26, 27, 28].

За допомогою контрольованої прокатки отримуємо більш підвищену міцність, пластичність, а також в'язкість та холодостійкість. Це поєднання властивостей обумовлено такими факторами [29]:

- створенням розвиненої субструктури в умовах регламентованої деформації в міжфазній аустенітно-феритній області;
- формуванням вельми дисперсних карбонітридів зміцнюючих сталь і стабілізуючих субструктуру;
- подрібненням зерна, а також створенням текстури прокатки [29].

Технологічна схема традиційної контрольованої прокатки наведена на рис 1.3. [30].

Різновидом термомеханічної обробки є контрольована прокатка, яка складається з гарячої деформації аустеніту. При гарячій прокатці в аустеніті утворюється висока щільність зародження центрів феритної фази, які забезпечують подрібнення зерна фериту після $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. Такі центри можуть утворюватися на межах аустенітних зерен або у середині зерна на межах двійників, які утворюються в наслідок гарячої деформації [29, 31-33].

Технологічна схема контрольованої прокатки включає в себе контроль температури початку та завершення деформації, обтиснення та швидкості охолодження на різних стадіях обробки [34, 35].

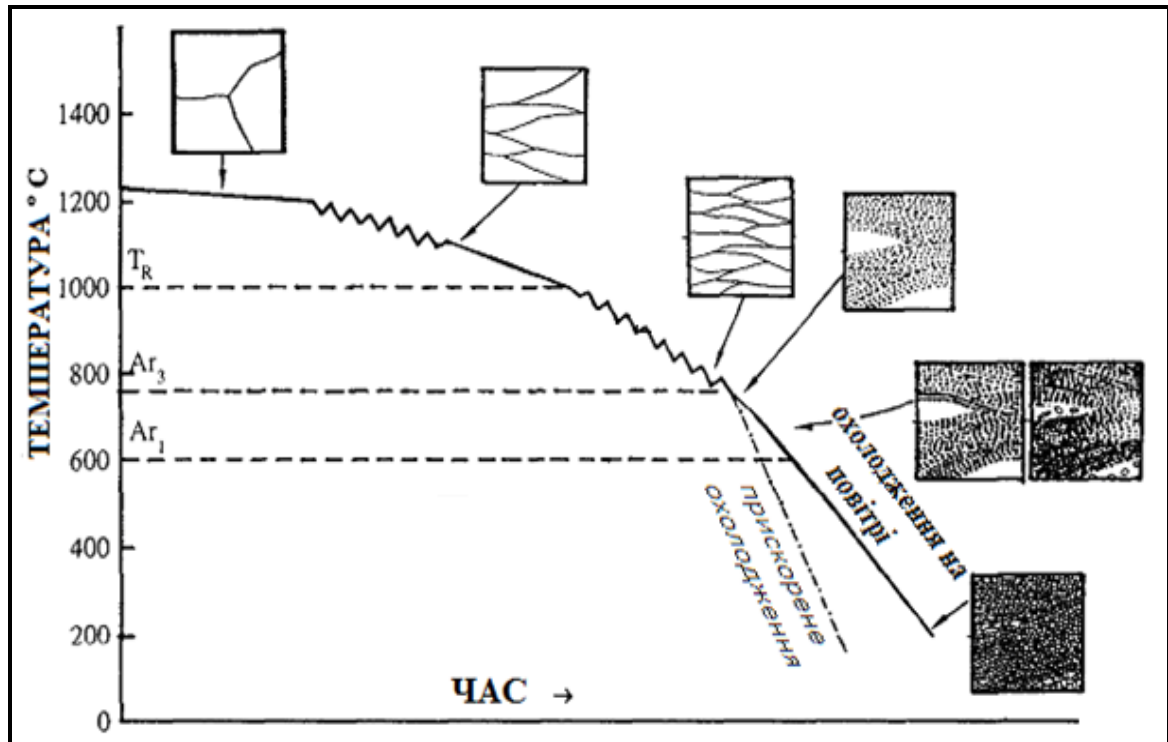


Рисунок 1.3 – Технологічна схема контрольованої прокатки [30]

Метою контрольованої прокатки є формування структури за допомогою подрібнення зерна фериту, тому, однією із особливостей її є прокатка металу в чистовій клітці при температурі фазових перетворень (міжкритичному інтервалі температур). Таким чином, дрібнозернистість фериту є наслідком отримання дуже плоских витягнутих зерен аустеніту, на границях яких відбувається зародження фериту [36, 37].

Технологічна схема контрольованої прокатки полягає в наступному: після чергової прокатки метал передається на байпас, де відбувається охолодження металу до температури 750-775 °С. На наступному етапі метал передається до чистової клітці, де його прокатують до потрібної товщини за 5...7 проходів [34, 38-40].

1.3. Аналіз технологічних схем виробництва та з'єднання будівельних металоконструкцій

Для вибору типу з'єднання враховуються такі фактори [41]:

- вид напруженого стану з'єднуваних елементів;
- величина і характер діючого навантаження;
- форми сполучуваних елементів;
- умови роботи з'єднання та ін.

На теперішній час, для з'єднання будівельних металоконструкцій застосовують найбільш поширені види з'єднання, до яких відносяться: зварні, заклепувальні та болтові [42].

Заклепувальні з'єднання,

Заклепувальні з'єднання широко використовуються при монтажі будівельних металевих конструкцій, зокрема при мостобудуванні [43].

Заклепка представляє собою сріжень з головками на кінцях, який має форму круглого поперечного перерізу. Загальний вид заклепки представлено на рисунку 1.4 [43, 44].

Перевагою заклепувальних з'єднань порівняно з іншими типами з'єднань є те, що вони економічно вигідні порівняно із з'єднаннями на високоміцних болтах; а у порівнянні із зварними з'єднаннями вони є більш стабільними [42, 43].

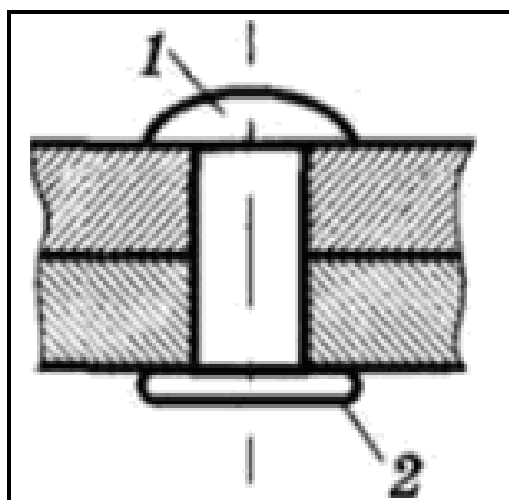


Рисунок 1.4 – Загальний вид заклепки: 1 – заставна головка;
2 – замикаюча головка [43, 44]

На рисунку 1.5. наведено основні типи технологічних схем заклепувального з'єднання [44].

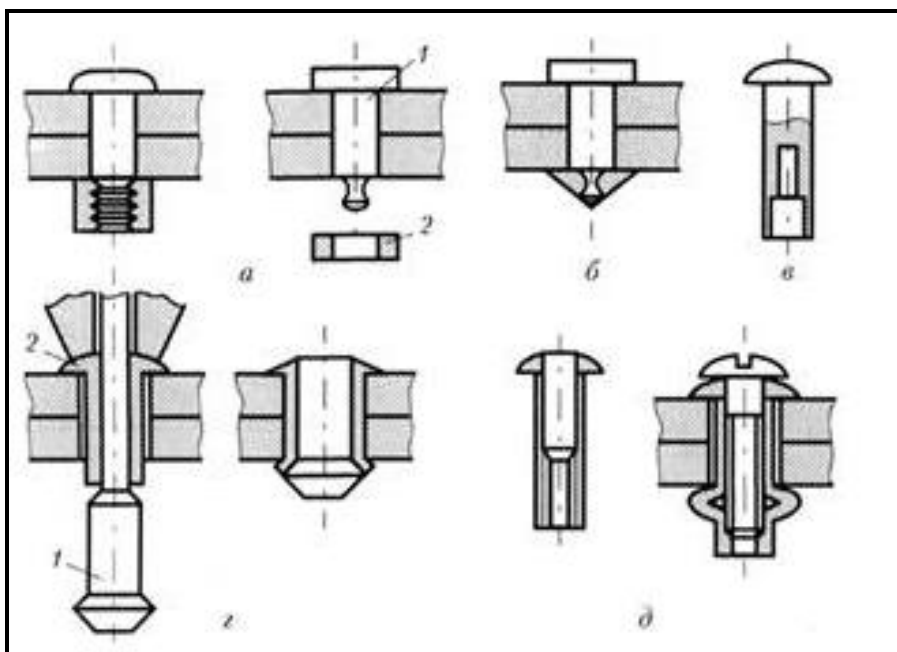


Рисунок 1.5 – Технологічні схеми заклепувальних з'єднань
а – болт заклепковий; *б* – заклепки з високим опором зрізу;
в – заклепки вибухові; *г* – заклепки з сердечником; *д* – гайки-пістони [44]

Для силових з'єднань, де велике значення відіграють зусилля та міцність заклепок, застосовуються заклепки з високим опором зрізу (рисунку 1.2, б) [44].

Заставні заклепки, такі як: заклепки вибухові (рисунку 1.2, в), заклепки з сердечником (рисунку 1.2, г), а також гайки-пістони (рисунку 1.2, д) застосовуються при односторонньому доступі [44].

З'єднання на високоміцних болтах.

Принципову схему високоміцних болтових з'єднань наведено на рисунку 1.5 [42].

Використання високоміцних болтових з'єднань, у більшості випадків спрямоване на компенсацію сил тертя. Як слідує з рисунку 1.6, зусилля з одного елемента на інший за рахунок сили тертя передається при їх зсуві силами Q , які виникають на поверхні деталей, які з'єднуються за допомогою натягу болтів силами P [42, 45, 46].

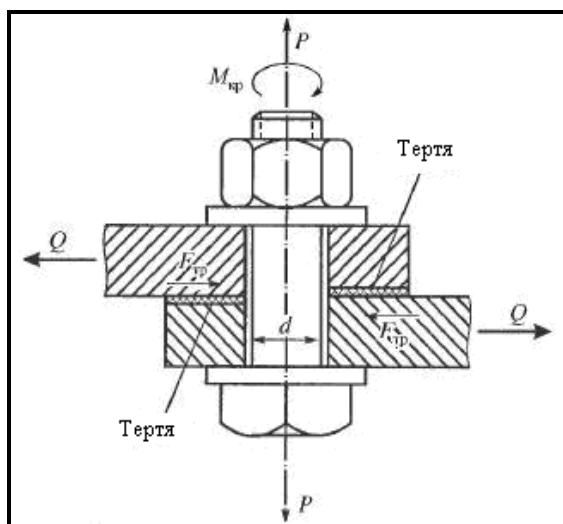


Рисунок 1.6 – Принципова схема на високоміцних болтах з'єднаннях [42]

Високоміцні болтові з'єднання порівняно із заклепувальними з'єднаннями, мають значні переваги, до яких в першу чергу відноситься зменшення кількості технологічних операцій, а також більшою міцністю одного скріплення, що в свою чергу призведе до значного скорочення їх кількості [42, 47 - 50].

Зварні з'єднання

Сутність процесу зварювання полягає у розплавленні та кристалізації металу, яке відбувається за допомогою тепловиладання з зовнішнього джерела і наступного прискореного охолодження [51- 54]. В залежності від розміщення елементів деталей, які підлягають з'єднанню, застосовують типи зварних швів які наведено на рисунку 1.7.

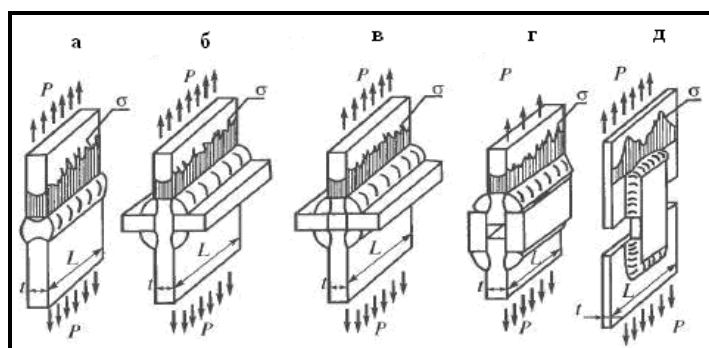


Рисунок 1.7 – Основні види зварних з'єднань: *а* – стикові; *б* – таврові; *в* – хрестоподібні; *г* – напусткове з лобовими швами; *д* – напусткове з обваркою по контуру [42]

Основні види зварних з'єднань: стикові з'єднання, хрестоподібні, таврові а також напусткові з'єднання [42, 55 - 59].

1.4. Аналіз технологічних схем зварювання, які застосовуються при виробництві будівельних металоконструкцій

На теперішній час, зварювання є одним із основних технологічних процесів, який використовується при виробництві та монтажі будівельних металевих конструкцій [60].

Розглянемо більш детально деякі типи зварювання.

Лазерне зварювання

На теперішній час, традиційні методи зварювання істотно знижують механічні властивості вже готових виробів, на сам перед, це відбувається через те, що в зоні зварювання формується градієнтна структура, що виникає при надмірно швидкому нагріванні та охолодженні металу, що в свою чергу обумовлено збільшеним рівнем залишкових напруг. Вирішити дану проблему можна наприклад шляхом застосування лазерного зварювання. Даний тип зварювання у порівнянні з іншими методами зварювання характеризується значно низьким ступенем залишкових напружень в зоні зварювання, що дає змогу здійснювати процес зварювання навіть у вузькій зоні [61 - 65].

Нагрівання та плавлення металу при лазерному зварюванні здійснюється за допомогою енергії світлового променя, отриманого від оптичного квантового генератора – лазера.

Довжина хвилі лазерного променя в залежності від природи робочого тіла лазера становить 0,1-10 мкм [66 - 70].

Для лазерного зварювання використовують наступні типи лазерів [71]:

- твердотільні
- газові - з поздовжньою або поперечною прокачуванням газу,
- газодинамічні.

Схему процесу лазерного зварювання представлено на рисунку 1.8 [71]

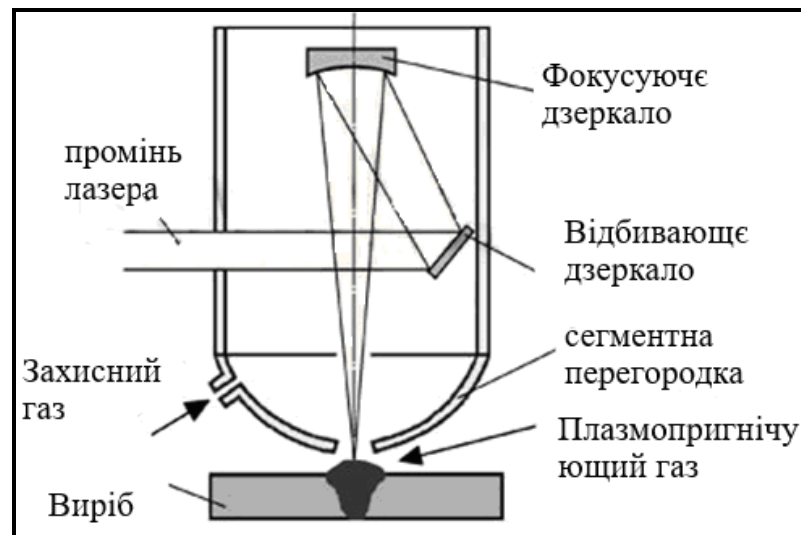


Рисунок 1.8 – Схема процесу лазерного зварювання [71]

В якості захисного використовують гази, в основному, аргон [71 - 81].

До значних переваг лазерного зварювання слід віднести [68, 71]:

- високу якість зварних з'єднань;
- висока швидкість зварювання;
- можливість отримати при значно малій ширині шва, велику глибину проплавлення, що дає змогу зменшити геометричний розмір зони термічного впливу;
- можливість зварювати матеріали різного спектру сталей та сплавів, наприклад, високолегованих та високовуглецевих сталей;
- значно малі зварювальні деформації.

Недоліками цього зварювання є [71]:

- значно висока вартість та складність обладнання;
- низький ККД лазерів.

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ)

Електронно-променеве зварювання набуло широкого застосування при виробництві будівельних металоконструкцій, це на сам перед обумовлено значно малою величиною погонної енергії при даному типі зварювання. Як наслідок, це призводить до значно малих деформацій при формуванні вузьких зон

розплавлення та формуванні зони термічного впливу, порівняно з традиційними методами зварювання [82 - 84].

Процес електронно-променевого зварювання заснований на нагріванні металу пучком електронів, які прискорюються за рахунок електричного поля [85 - 88]. При зіткненні електронного пучка з виробом здійснюється гальмування електронів. Внаслідок цього, більше ніж 90% кінетичної енергії перетворюється на теплову, що призводить до розплавлення металу. Температура зіткнення становить близько 5000-6000 °С [89 - 94]. Схему електронно-променевого зварювання представлено на рисунку 1.9 [95].

Електрони, які виникають з катоду 1 електронної гармати, за допомогою фокусувального електрода 2 формуються в пучок. Надані електрони прискорюються за рахунок різниці потенціалів між катодом та анодом 3, що становить від 20 до 150 кВ, та фокусуються на виріб 6 у вигляді променя за допомогою магнітної системи. За рахунок фокусування досягається значна питома потужність променя. Струм електронного променя незначний, і складає всього від декількох міліампер до одиниць ампер [89].

За допомогою даного способу зварювання можливо виготовляти деталі з хімічно активних та тугоплавких металів та сплавів, а також деталі з високолегованих сталей та титанових сплавів. Ці матеріали можна зварювати зі значною різницею температури плавлення та діапазоном товщини листа: від 0,02 мм - до 100 мм [89, 95 - 97].

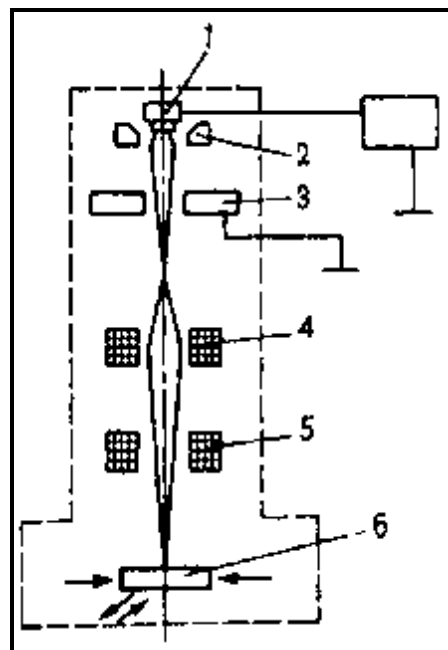
Електронно-променеве зварювання має наступні переваги [95, 98 - 100]:

- висока якість зварного шва – отримуємо значно вузький шов з глибоким проплавленням, за допомогою вакуумізації метал не може реагувати з навколишнім повітрям;
- можливість зварювання виробів товщиною 0,1 – 200 мм;
- має низьку ступінь тепловиділення в місцях зварного шва, за рахунок чого знижує можливість викривлення деталей;
- високий коефіцієнт корисної дії, що дає змогу витратити значно менше енергії, приблизно в 10-15 разів;

- можливість надійного з'єднання тугоплавких металів – тантал та вольфрам, також хімічно-активних металів та сплавів, таких як цирконій, молібден, титан та ніобій, та навіть кераміку.

До недоліків даного способу зварювання слід віднести [99, 100]:

- зварювання неможливо здійснювати без вакууму, створення вакууму має високу вартість, та значно знижує продуктивність процесу та ускладнює завантаження та розвантаження виробів з неї;
- можливе утворення порожнини та не проварів у корені шва;
- можливість виникнення рентгенівського випромінювання при генерації електронів, що потребує в додатковому захисті робочого персоналу при зварюванні.



Рисунку 1.9 – Схема електронно-променевого зварювання: 1 – катод електронної гармати; 2 – фокусуючий електрод; 3 – анод; 4, 5 – відхиляюча магнітна система; 6 – вироб [95]

Виходячи з цього, слід зауважити, що електронно-променеве зварювання при виробництві конструкцій з хімічно-активних та тугоплавких матеріалів обумовлено забезпеченням якісного зварного з'єднання та комплексом

механічних властивостей, які відповідають властивостям основного металу. Зазначено, що геометрія та якість шва при даному типі зварювання взаємопов'язані набагато сильніше у порівнянні з іншими методами зварювання [101 - 106].

Зварювання під шаром флюсу

Для підвищення продуктивності та якості зварних з'єднань при електродуговому зварюванні, а також в якості зниження трудомісткості, широкого застосування в будівництві набуло автоматичне зварювання під шаром флюсу. Основною умовою отримання якісних швів при зварюванні даного типу є забезпечення кореневого провару та здатність добре відділити шлак при виконанні корневих проходів [107, 108].

Завдяки деякому тиску флюсу на поверхню рідкої ванни в процесі зварювання усувається розбризування рідкого металу, що дозволяє підвищити продуктивність зварювання в п'ять-вісім разів, у результаті це сприяє отриманню хорошого формування шва навіть при дуже великих струмах, що досягають 1000-2000 А. За рахунок великої сили струму, продуктивність зростає в десятки разів в порівнянні з ручним дуговим зварюванням. У процесі зварюванні, дуга, що горить під гранульованим порошком, знаходиться між оброблюваним матеріалом, та дротом, в результаті чого, гранули та електрод, при значно високій температурі починають плавитися. За рахунок цього, біля зварної ванни утворюється плівка, яка не дає змоги проникнути повітрю, та як наслідок, захищає вже розплавлений метал та дугу від несприятливого впливу повітря [109 - 111].

Технологічну схему даного типу зварювання представлено на рисунку 1.10 [112].

Флюс 2 подається в зону дуги, за рахунок чого покриває метал зварювального виробу та твердне, утворюючи шлакову кірку на поверхні шва, який є захистом зварного з'єднання. Товщина флюсу повинна становити близько 30-60 мм. Між зварним виробом та дротом відбувається збудження дуги 1, яка горить під шаром розплавленого флюсу, що знаходиться в замкнутому просторі 4, який в свою чергу, утворюється за рахунок пару та газу, що виділилися в стовпі

дуги. Метал дроту розплавляється за допомогою дуги, та переноситься в зварювальну ванну, де відбувається змішування розплавленого основного металу та металу зварювального дроту.

Надлишковий тиск, який виникає в наслідок термічного розширення газів, відтісняє рідкий метал 5 в протилежному напрямку зварювання, що призводить до глибокого провару основного металу. За рахунок незначного залишкового тиску, що знаходиться в газовому просторі 4, а також шлаку, який утворився на поверхні шва, забезпечується надійний захист металу від шкідливих впливів навколишнього середовища.

Електронний дріт (3), за допомогою роликів спеціального механізму (ведучого (10), та притискного (9), зі швидкістю яка дорівнює швидкості плавлення, подається в зону зварювання, забезпечуючи підтримку горіння дуги. Через мундштук 8 зварювальної головки, від джерела струму підводиться зварювальний струм до електродного дроту, при цьому зварювальна головка мундштука знаходиться на відстані близько 40-60 мм від кінця дроту [113 - 115].

Шар флюсу, товщина якого становить до 60 мм, у процесі зварювання може розплавитися лише на 30 %. Внаслідок цього флюс повністю закриває дугу, що забезпечує надійний захист металу від повітря, за рахунок чого стабілізує процес зварювання [116, 117].

Зварювання під шаром флюсу має ряд значних переваг, серед яких [112]:

- значно висока якість формування зварного шва, за рахунок захисту шаром флюсу від навколишнього повітря;
- висока швидкість зварювання та порівняно велика глибина проплавлення;
- незначний рівень деформацій;
- можливість зварювання не залежно від товщини металопродукату, а також зварювання нержавіючих та слабо легированих сталей;
- висока швидкість та продуктивність зварювання за рахунок застосування зварювального струму, великої потужності;

Однак, даний вид зварювання має і ряд недоліків [112]:

- зварювання можна здійснювати тільки в нижньому положенні під нахилом 15°C , що призводить до труднощів при зварюванні коротких швів [118];
- під шаром флюсу не видно місця зварювання, за рахунок чого потрібна значно велика точність підготовки деталей;
- обмежена товщина зварювання листів - не допустиме зварювання листів товщиною менше ніж 1,8 мм; також не допустиме стикове зварювання деталей товщиною більше ніж 16 мм [112, 119, 120].

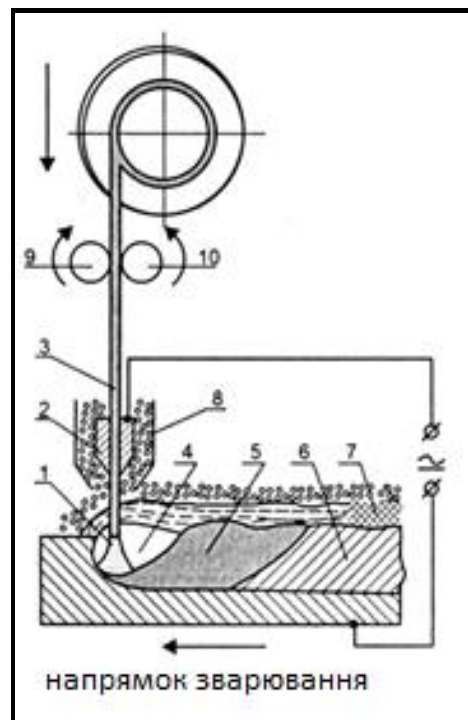


Рисунок 1.10 – Схема зварювання під шаром флюсу: 1 – дуга; 2 – флюс; 3 – електричний дріт; 4 – газовий простір; 5 – рідкий метал; 6 – основний метал; 7 – поверхневий шар; 8 – мундштук; 9 – ведучий механізм; 10 – притискний механізм

[112]

1.5. Постановка задачі і висновки по розділу 1

Проведений аналіз літературних джерел показав, що на теперішній час, серед поширених видів з'єднання будівельних металоконструкцій зварювання є одним із найбільш універсальних і дієвих методів отримання нероз'ємних з'єднань. При цьому, якість зварних з'єднань у більшості випадків можливо

контролювати в готових виробках шляхом застосування руйнівних і не руйнівних методів контролю. З іншого боку, вирішення складних задач проектування багатопверхових споруд та споруд, відповідного призначення потребує визначення властивостей зварного з'єднання вже на стадії розробки проектних документацій. Одним із можливих шляхів вирішення даної задачі, є імітаційне фізико-математичне моделювання процесів зварювання з урахуванням матеріалів, які для цього використовуються.

Таким чином, основною метою даної є фізико-математичний аналіз процесів формування структурного стану в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені наступні задачі:

1. Провести металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, а саме: лазерного, електронно-променевого зварювання, та автоматичного зварювання під шаром флюсу;
2. Провести кількісний аналіз елементів структури зварних з'єднань низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, та визначити геометричні розміри відповідних ділянок з'єднання та критерій оцінки структурного стану;
3. Провести кореляційний аналіз між критеріями оцінки структурного стану та технологічними параметрами процесу зварювання;
4. З застосуванням математичного апарату факторного аналізу оцінити взаємозв'язок між технологічними параметрами зварювання та критеріями оцінки структурного стану;
5. З використанням математичного апарату імітаційного моделювання методом підтверджуючого факторного аналізу та методом структурних рівнянь проаналізувати отриманий взаємозв'язок між технологічними параметрами зварювання та критеріями оцінки структурного стану;

6. З застосуванням методу статичних виборок (метод Монте-Карло) промодельовати та оцінити взаємозв'язок між технологічними параметрами зварювання та критеріями оцінки структурного стану.

1.6. Список використаних джерел в розділі 1

У розділі 1 використані джерела [1-120]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Матеріал дослідження

В якості матеріалу для даного дослідження були обрані низьковуглецеві мікролеговані сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ. Хімічний склад яких представлено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталей 9Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ

Сталь	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	Fe
09Г2С	до 0,12	0,5- 0,8	1,3- 1,7	до 0,3	до 0,035	до 0,03	до 0,3	до 0,12	до 0,008	до 0,3	залишок
10ХСНД	до 0.12	0.8 - 1.1	0.5 - 0.8	0.5 - 0.8	до 0.04	до 0.035	0.6 - 0.9	-	до 0.008	0.4 - 0.6	-
10Г2ФБ	0,08- 0,13	0,15- 0,35	1,6- 1,8	до 0,3	до 0,035	до 0,03	до 0,3	0,05- 0,12	-	-	-

Механічні властивості досліджувальних сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після безперервної контрольованої прокатки представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості сталей 9Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ

Марка сталі	Вирізка зразків	Механічні властивості				
		$\delta_5, \%$	$\Psi, \%$	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\sigma_T,$ Мпа	$\sigma_B,$ Мпа
9Г2С	Вздовж	25,0	78,0	-	455	556
10ХСНД	прокатки	24,2	71,5	505	-	680
10Г2ФБ		22	68	620	-	710

Марки сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ піддавалися термомеханічній обробці за технологічною схемою безперервної контрольованої прокатки [121]. Згідно технологічної схеми, метал було нагріто до температури 980°C, витримано при

даній температурі з розрахунку 1 хв на 1 мм площі поперечного перерізу, та виконано прокатку з безперервною п'ятиступеневою деформацією до температури 705...715°C, після чого метал піддавали спочатку прискореному охолодженню до температури 705...715°C; а потім повільному охолодженню на повітрі.

Схематично даний режим термомеханічної обробки наведено на рис. 2.1.

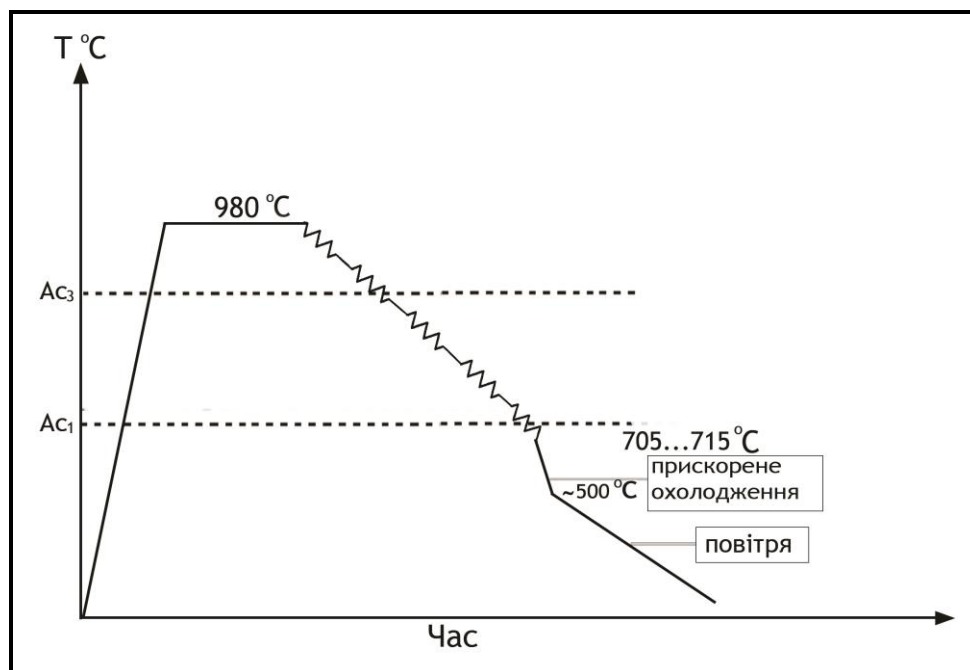


Рисунок 2.1 – Схема режиму експериментальної термомеханічної обробки [121]

На рисунку 2.2 представлена мікроструктура сталі після безперервної контрольованої прокатки [122].

Як бачимо із рисунку 2.2, в структурі всіх досліджувальних марок сталі спостерігається ферито-перлитний конгломерат. При цьому, візуальна оцінка показує значне подріблення феритної складової, яке відбулося в процесі термічної обробки. Слід зазначити, що перлітна складова має значно тонку будову. Дане явище має назву квазіевтектоїду, формування якого обумовлено дифузійним перерозподілом, що в свою чергу призводить до формування колоній перлиту, при умові, коли концентрація вуглецю буде становити менш ніж на 0,8% [123-129].

Мікроструктура сталі після експериментальної термомеханічної обробки

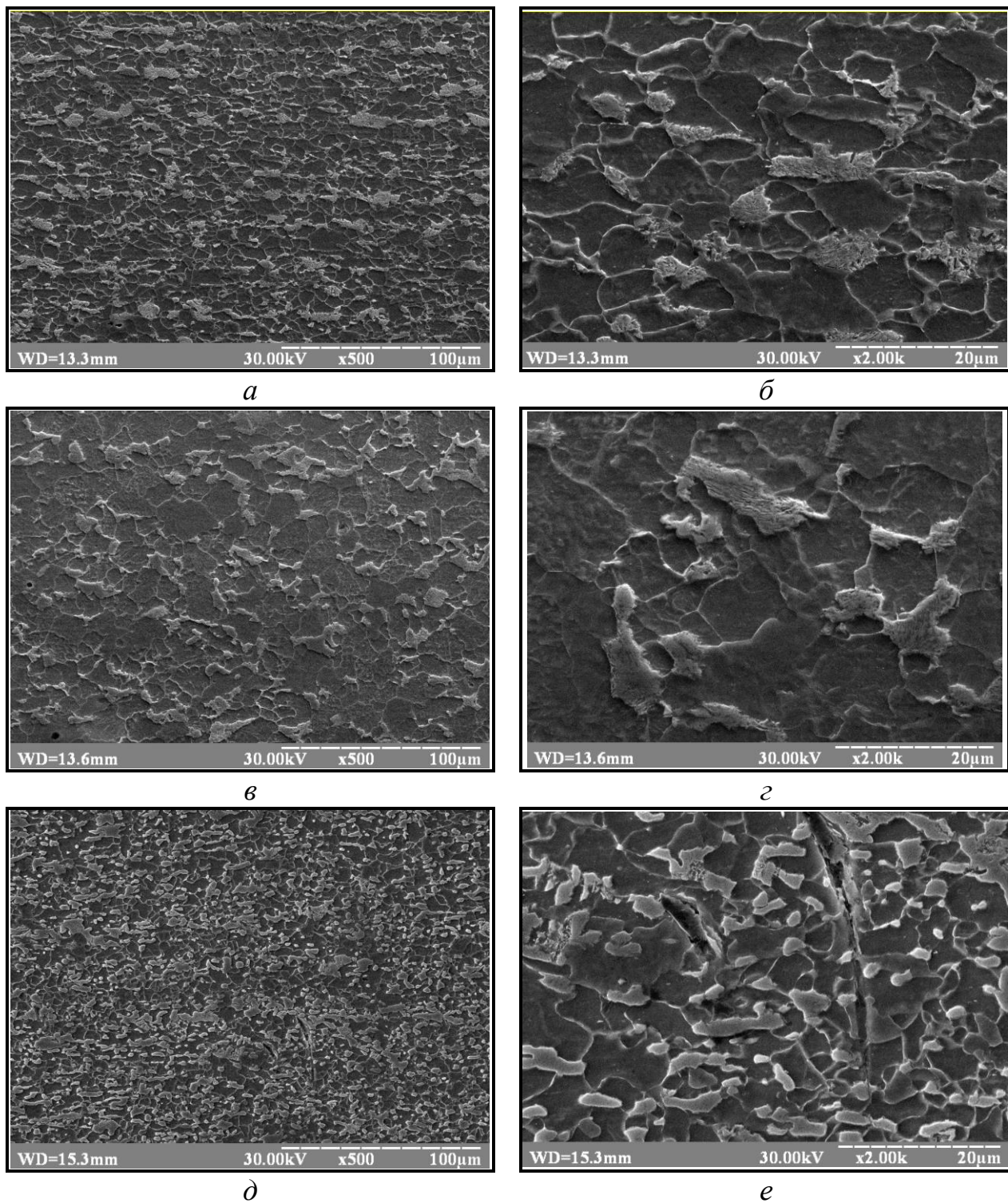


Рисунок 2.2 – Мікроструктура сталі після експериментальної термомеханічної обробки: *a, б* – 09Г2С; *в, з* – 10ХСНД; *д, е* – 10Г2ФБ

2.2.Методика проведення зварювальних робіт

Експериментальні зварювання здійснювали на обладнанні Інституту електрозварювання ім. Е.О.Патона НАН України.

Лазером зварювали стикові з'єднання пластин розміром 290×140×18 мм з застосуванням Nd:YAG-лазера моделі DY 044 (фірми «Rofin Sinar», Німеччина) потужністю до 4,4 кВт з фокусною відстанню $F = 300$ мм. Випромінювання від лазера до об'єктиву передавалося по оптичному волокну діаметром 600 мкм. У процесі зварювання переміщалася зварювальна голівка з системою захисту. Коренева частина зварного шва знаходиться в атмосфері ($Ar + CO_2$). Ванна розплаву і її хвостова частина була захищена за допомогою сопла зварювальної голівки. Швидкість зварювання становила 1.5 м/хв.

Електронно-променеве зварювання виконували в установці УЛ-144, оснащеної джерелом живлення ЕЛА-60/60, зварювальної гармати ЦФ-4 і приладом керування променем СУ-220.

Зварювання проводили по параметрам: прискорює напруга – 60кВ; струм променя – 70 мА; діаметр кругової розгортки на поверхні на відстані 100 мм від зварюваного виробу складає 2 мм; швидкість зварювання 5,5 мм/с (20 м/год). У всіх випадках режими зварювання забезпечували виконання швів за один прохід без застосування присадного дроту і без оброблення крайок. Погонна енергія при електронно-променевому зварюванні становила 3,11 кДж/см.

Автоматичне дугове зварювання виконувалося:

- під флюсом АНКС-28;
- проволокою Св-10Г1НМА1;

Шов на режимах:

- 1 шов (вузький) – 600А-28В-19м/ч;
- 2 шов (широкий) – 750А-33В-19м/ч.

Підготовка кромки полягає у рівному різанні та обробці кромки за визначеною формою в залежності від товщини металу. Основні типи, конструктивні елементи і розміри швів зварних з'єднань, виконуваних автоматичним і механізованим зварюванням під флюсом, регламентовані ДСТУ 8713-79 [130].

На рисунку 2.3 показано оброблення кромки для зварювання листів різної товщини [130].

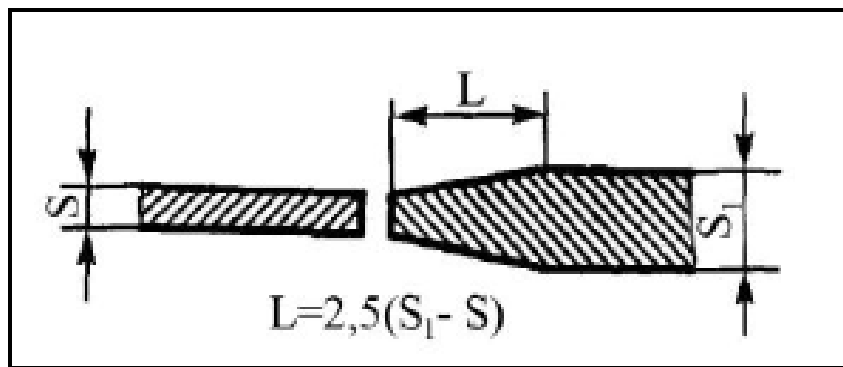


Рисунок 2.3 – Оброблення кромки для зварювання листів різної товщини:
двосторонній скіс [130]

2.3. Методика проведення металографічних досліджень

Підготовку шліфів для оптичного та скануючого мікроскопа однакова, та проводиться за наступною методикою [131, 132].

1. Відбір зразків – зразки відбиралися перпендикулярно напрямку прокатки;
2. Механічне потоншення з використанням абразивних матеріалів різної дисперсності;
3. Механічне полірування з використанням алмазних паст різної дисперсності;
4. Остаточне полірування на колі, обтягнутому фетром;
5. Електролітичне полірування;
6. Хімічне травлення.

Після кожної з зазначених операцій зразки промивалися у спирті. Після механічного полірування алмазними пастами зразки промивалися у високооктановому бензині, а потім у дистильованій воді. Зразок після механічного шліфування й електролітичного полірування мав гладку дзеркальну поверхню вільну від подряпин [132]. Кількісний металографічний аналіз виконувався за допомогою методу січних.

Сутність методу січних полягає у тому, що структура, яка зображена на фотографії перетинається не менше ніж п'яти випадковими лініями, та в ній присутні декілька фаз. Межі зерен окремих фаз перетинають ці лінії на окремі відрізки. Якщо підсумувати довжини цих відрізків і розділити суми на загальну довжину січних, то отримані значення відповідатимуть долям площі шліфа або

об'єму сплаву, які ці фази займають. Точність результатів підвищуватиметься зі зростанням довжини січних ліній [133].

2.4. Методика проведення растрової мікроскопії

В растровій електронній мікроскопії зображення об'єкта формується послідовно по точках і є результатом взаємодії електронного пучка з поверхнею зразка. При взаємодії електронів зонда з речовиною виникають відповідні сигнали різної фізичної природи (відображені і вторинні електрони, Оже електрони, рентгенівське випромінювання, катодна люмінесценція та ін.), які використовуються для синхронного побудови зображення на екрані монітора. На рисунку 2.4 представлена схема утворення вторинних сигналів під впливом електронного зонда. Для формування зображення не використовується електронно-оптична система. зміна масштабів зображення здійснюється радіотехнічними засобами [134].

Залежно від механізму реєстрації сигналу розрізняють декілька режимів роботи скануючого електронного мікроскопа: режим відбитих електронів, режим вторинних електронів. Зазвичай, для отримання інформації про структуру поверхні (зображення) використовуються вторинні електрони. Відбиті (обернено-розсіяні) електрони крім інформації про морфологію поверхні можуть нести додаткову інформацію і про склад зразка, тому вони використовуються для аналізу кристалографічної будови (дифракція відбитих електронів, EBSD-аналіз).

Методи скануючої електронної мікроскопії використовуються для вивчення топографії поверхні. Цей тип контрасту виникає за рахунок впливу рельєфу поверхні на відбиті або вторинні електрони і має велику схожість з зображенням, яке формується в оптичному мікроскопі, і тому інтерпретація їх багато в чому аналогічна методикам аналізу зображень, які застосовується в оптичній мікроскопії. Однак якість зображень, одержуваних за допомогою скануючої електронної мікроскопії, завжди вище, ніж на оптичних фотографіях, за рахунок значно вищої глибини різкості [135].

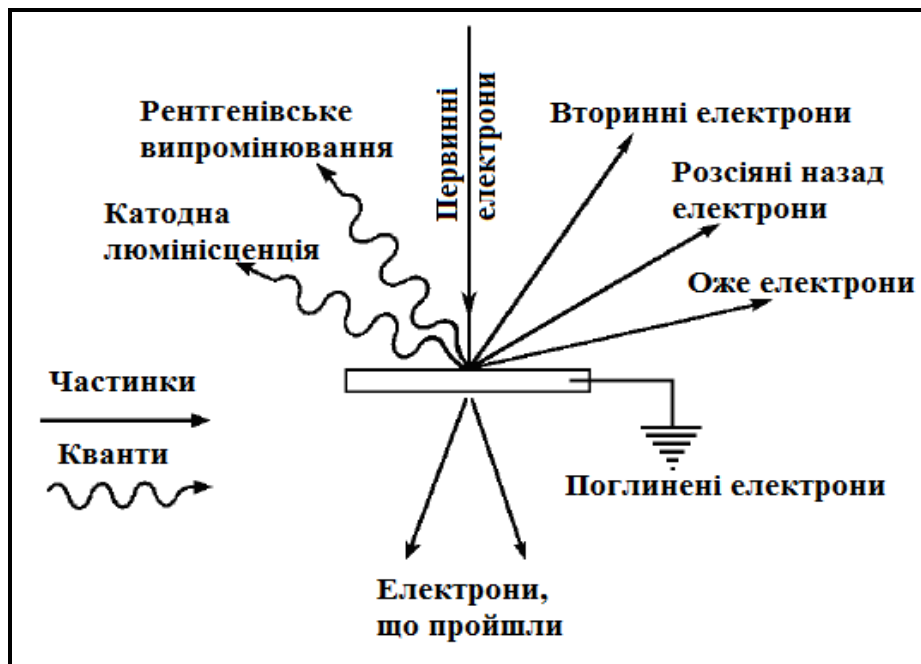


Рисунок 2.4 – Випромінювання, яке виникає в наслідок взаємодії пучка електронів зі зразком [134]

Для визначення геометричних розмірів структурних складових визначали за формулою (2.1.):

$$l = \frac{l_o}{M} \quad (2.1.)$$

де: l_o – вимірний лінійний розмір структурної складової (мм, округлюється до цілого);

M – збільшення електронного мікроскопічного зображення;

l – дійсний розмір структурної складової (мм, округляється до десятих).

2.5. Методика побудови математичних моделей

Побудова математичної моделі здійснювалась за допомогою модуля моделювання структурними рівняннями (SEPATH) програми STATSOFT STATISTICA 10.0 [136 - 138].

Для вирішення завдань, поставлених в дисертаційній роботі, були використані наступні методи моделювання:

1. Факторний аналіз;
2. Регресійний аналіз;

3. Кореляційний аналіз;
4. Моделі структурних рівнянь;
5. Підтверджуючий факторний аналіз;
6. Аналіз за допомогою методу Монте-Карло.

Факторний аналіз

Факторний аналіз являє собою лінійну статичну модель, за допомогою якої велика кількість змінних максимально скорочується згрупувавшись в декілька факторів. Фактор являє собою латентну (скриту) зміну, яка описує кореляційну залежність та взаємозв'язок між загальною кількістю початкових змінних [136, 139].

Регресійний аналіз

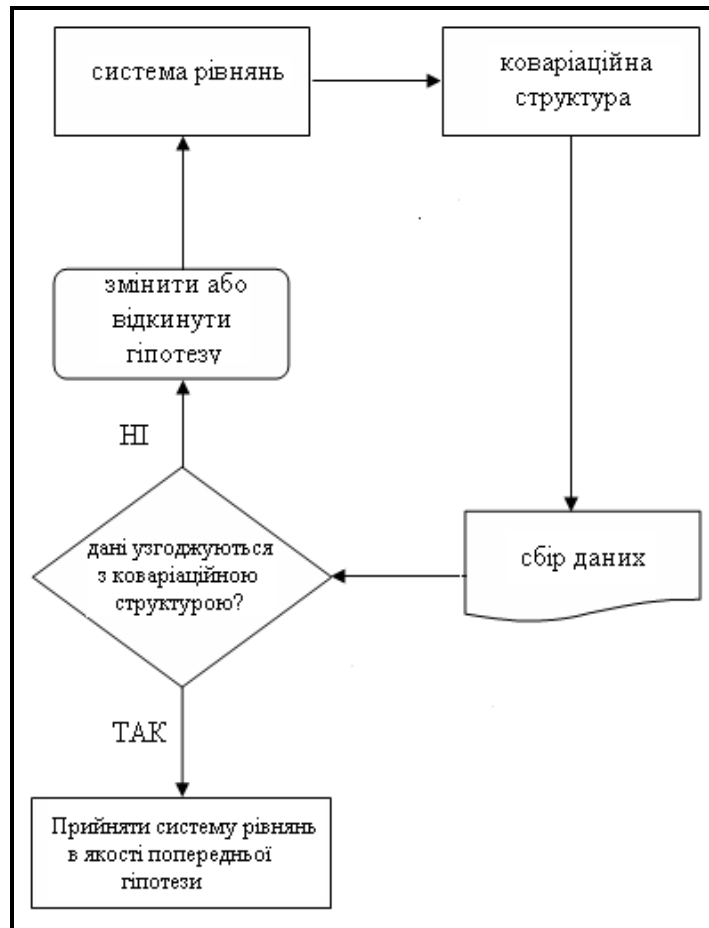
Регресійний аналіз є одним із методів статистичного моделювання, що дає змогу визначити взаємозв'язок залежної змінної між однією або декількома незалежними змінними, та представити його у вигляді математичної моделі, тобто у вигляді рівняння регресії. Головною метою регресійного аналізу перш за все є отримання кількісних залежностей між змінними, та прогнозування середнього значення залежної змінної. Даний аналіз також знайшов широке застосування при оцінці параметрів та перевірці значимості рівняння регресії; при побудованні інтервальних та точкових прогнозів залежної змінної, та побудові інтервальних оцінок отриманих змінних [140, 141].

Кореляційний аналіз

Кореляційний аналіз разом з регресійним аналізом мають багато спільного. Даний аналіз також є статистичним методом дослідження, його сутність полягає у виявленні взаємозв'язку між декількома випадковими величинами. Головною метою кореляційного аналізу є отримання розрахованих кореляційних залежностей, які можуть мати як позитивні, так і негативні значення [142, 143].

Моделі структурних рівнянь

Структурні моделі були зроблені на підставі наступної діаграми процесу структурного моделювання (рисунку 2.5) [136 – 138, 144, 145].



Рисунку 2.5 – Діаграма процесу структурного моделювання [136]

Підтверджуючий факторний аналіз

Підтверджуючий факторний аналіз є розвитком стандартної процедури факторного аналізу, та використовується при перевірці гіпотез структури факторних навантажень, а також кореляцій між факторами. Підтверджуючий факторний аналіз був виконаний з метою визначення структури взаємозв'язків між змінними та з метою зменшення їх кількості [136 – 138, 146].

Аналіз за допомогою методу Монте-Карло

Метод Монте-Карло заснований на використанні датчиків випадкових чисел, що дає змогу здійснювати моделювання випадкових вибірок при дослідженні певних структурних моделей та для вирішення різних математичних задач. Емпірична оцінка вибіркового розподілу на кожній виборці у процесі дослідження отримана за допомогою використання генерацій великої кількості вибірок. При моделюванні за допомогою даного методу, велике значення має саме

обсяг вибірки, у випадку, якщо заданої кількості вибірки буде недостатньо, це приведе до отримання недостовірних результатів, тому що ітеративна процедура буде схилена до мінімуму [136 – 138, 147, 149].

2.6. Висновки по розділу 2

1. В роботі використано сучасні методи дослідження структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, а саме: лазерного зварювання, електронно-променевого зварювання, та автоматичного зварювання під шаром флюсу;
2. З метою аналізу залежностей між параметрами структурного стану та режимами зварювання було використано сучасні методи фізико-математичного моделювання, а саме: факторний аналіз; регресійний аналіз; кореляційний аналіз; моделі структурних рівнянь; підтверджуючий факторний аналіз; аналіз за допомогою методу Монте-Карло.

2.7. Список використаних джерел в розділі 2

У розділі 2 використані джерела [121-149]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 3

МЕТАЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЗОН КОНТАКТУ НИЗЬКОВУГЛИЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ

3.1. Загальні принципи металографічного аналізу зон зварного з'єднання

Аналіз літературних джерел (дивись наприклад [73, 77, 149, 150]) показав, що структуру зварних швів можна представити у вигляді схеми, наданої на рисунку 3.1. Відповідно за ступенем впливу високих температур на метал в зоні термічного впливу можливо виділити наступні ділянки: ділянка неповного розплавлення, ділянка перегріву, ділянка нормалізації, ділянка неповної кристалізації, ділянка рекристалізації. Розглянемо більш детально деякі з цих ділянок.

Ділянка 1 є перехідною від наплавленого металу до основного. Вона являє собою область основного металу, нагрітого до температури плавлення. При наступному охолодженні в цій зоні відбувається кристалізація металу. Зі структурної точки зору, ця ділянка характеризується наявністю як ліварних так і рекристалізованих структурних складових [149, 150].

Ділянка 2 – область сильно нагрітого металу з рекристалізованою структурою аустеніту [149, 150].

Ділянка 3 – область металу нагрітого до температури фазової перекристалізації. При подальшому охолодженні відбувається $\gamma - \alpha$ фазові перетворення з формуванням різнозернистої структури [149, 150].

Ділянка 4 – також характеризується різнозернистістю. Навколо великих зерен фериту знаходяться дрібні зерна фериту і колонії перліту, що утворилися в процесі рекристалізації [149, 150].

Ділянка 5 – основний метал, нагрітий до температури A_{c1} [149, 150].

При цьому, в роботах [123, 124, 149, 150], показано, що границі розділу між областями шва, які характеризуються різним структурним станом, є

потенційними місцями зародження руйнування. Як наслідок, важливим моментом є забезпечення металографічної якості зазначених зон.

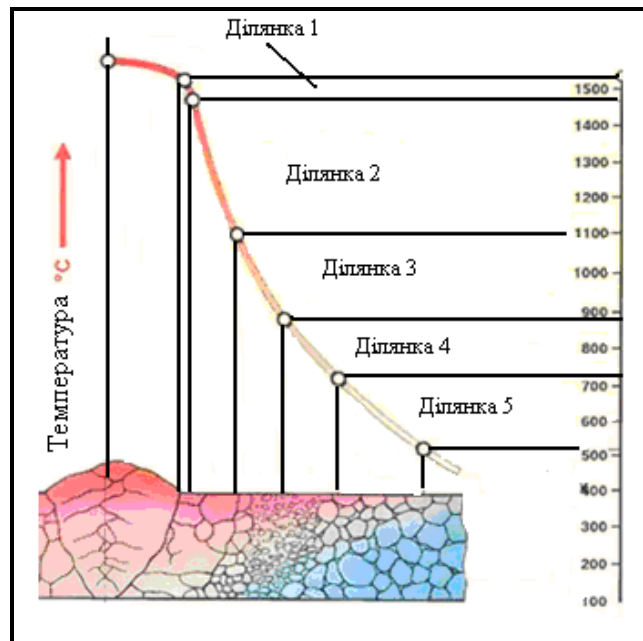


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення зварного з'єднання низьколегованих та мікролегованих сталей [150]

Таким чином, з точки зору морфологічних особливостей будови званого з'єднання, та на підставі робіт [123, 124, 151, 152], зона зварного з'єднання була розділена на зони з різним структурним станом. Схематично дані зони наведені на рисунку 3.2.

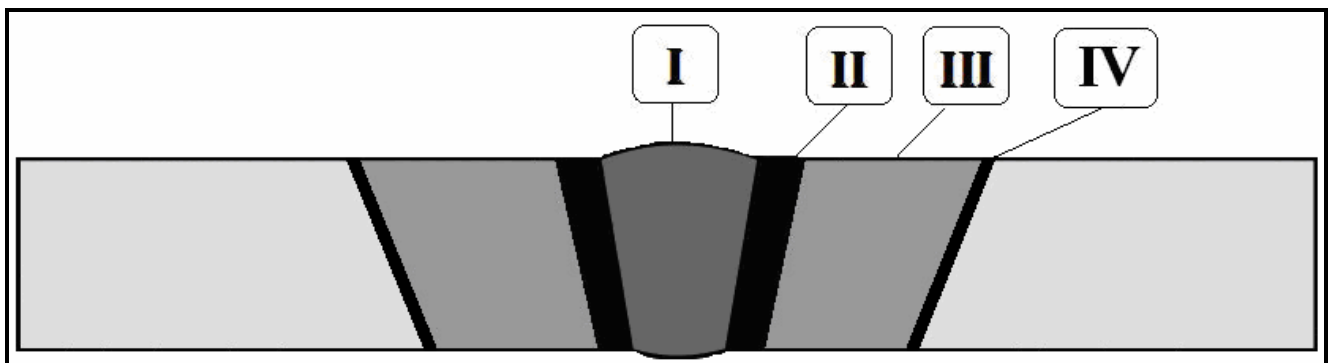


Рисунок 3.2 – Зони зварного з'єднання

Зона I - основний метал, який на цій ділянці в процесі зварювання частково розплавляється і являє собою суміш твердої і рідкої фаз. Наплавлений метал, має стовпчасту грубозернисту будову, характерну для литої сталі.

Зона II – переохолодження на цій ділянці забезпечує формування структури матеріалу с характерною крупнозернистою будовою. В цій зоні присутні структурні складові з яскраво вираженою рейковою морфологією: бейніт, мартенсит, відменштетов ферит [153].

У зоні III відбувається неповна перекристалізація сталі, нагрітої до температури, що лежить між критичними точками. На цій ділянці після охолодження поряд з великими зернами фериту утворюються дрібні зерна фериту і сфероїдезованого перліту.

У зоні IV структурних змін сталі не відбувається. В іншому випадку на цій ділянці спостерігається рекристалізація.

Мікроструктурні дослідження виконані в роботі спирались на дану схему, тобто досліджувались I, II, III зони (дивись рисунок 3.2).

3.2. Дослідження структури з'єднання після лазерного зварювання

Результати дослідження мікроструктури зварного шва після лазерного зварювання наведено на рисунку 3.3, 3.4.

Аналіз отриманих даних показує, що на ділянці I відбувається кристалізація рідкого металу. При цьому, процес кристалізації відбувається з зупинками, викликаними виділенням на фронті кристалізації скритої теплоти плавлення, і тим самим зменшенням ступеню охолодження. Через деякий час, в наслідок тепловіддачі в основний метал та навколишнє середовище, на фронті кристалізації встановлюється необхідна величина ступеню переохолодження, розпочинається процес кристалізації, і фронт переміщується на відповідну градієнту температур відстань. Такий механізм призводить до формування структури литого металу у зварному шві, яка частково спадковується на ділянці неповного розплавлення (дивись рисунок 3.3 а, в, д).

Ділянка 2 формується в наслідок дії термічного навантаження. Після процесу кристалізації метал зони має структуру аустеніту. При зниженні температур до температури фазового перетворення починається вторинна рекристалізація. Як наслідок, утворюються зерна фериту, а аустеніт збагачується вуглецем, і відбувається евтектоїдне перетворення. Таким чином, метал ділянки має структуру з дрібними зернами фериту і колоніями перліту (дивись рисунок 3.3 б, г, е). При цьому, для сталі 10ХСНД спостерігаються рекристалізовані зерна фериту (рисунок 3.3 г). Для сталі 10Г2ФБ спостерігається поява структур відманштетового типу (рисунок 3.3 е).

Ділянка 3 характеризується наявністю в структурі рекристалізованих зерен фериту та колоній перліту (дивись рисунок 3.4 а, б, д). Для сталі 09Г2С та 10Г2ФБ в структурі ділянки спостерігається поява структури відманштетового типу (рисунок 3.4 а, та рисунок 3.4 д відповідно). Формування даного структурного стану обумовлено високою швидкістю охолодження та подальшою нормалізацією структури. Процес нормалізації відбувається в наслідок додаткового нагріву при тепловідводі від зварного шва, як наслідок, відбувається зменшення концентрації механічних напружень і перерозподіл дефектів кристалічної будови.

Структурний стан ділянки 4 формується в наслідок нагріву до температур міжкритичного інтервалу. Такий нагрів призведе до утворення аустеніту с феритом, та зросту зерен фериту, з якими не відбувається перекристалізації (дивись рисунок 3.4 б, г, е). Після охолодження на цій ділянці присутні зерна фериту, що не пройшли перекристалізацію, і також дрібні зерна фериту, і колонії перліту, що утворилися з аустеніту під час фазової перекристалізації. При цьому, для сталі 09Г2С, 10Г2ФБ присутні структури відманштетового типу, але їх відсотковий вміст менше ніж на ділянці 3 (в середньому на 10%) [122, 154].

Сумісний аналіз даних, приведених на рисунку 3.3 та 3.4 показав, що значних відмінностей в структурному стані між ділянками 3 та ділянками 4 не виявлено. З іншого боку, структурний стан границі між ділянками 1 та 2 характеризується наявністю складових, різних за своєю морфологією (доевтектоїдний ферит, перліт, відманштетов ферит).

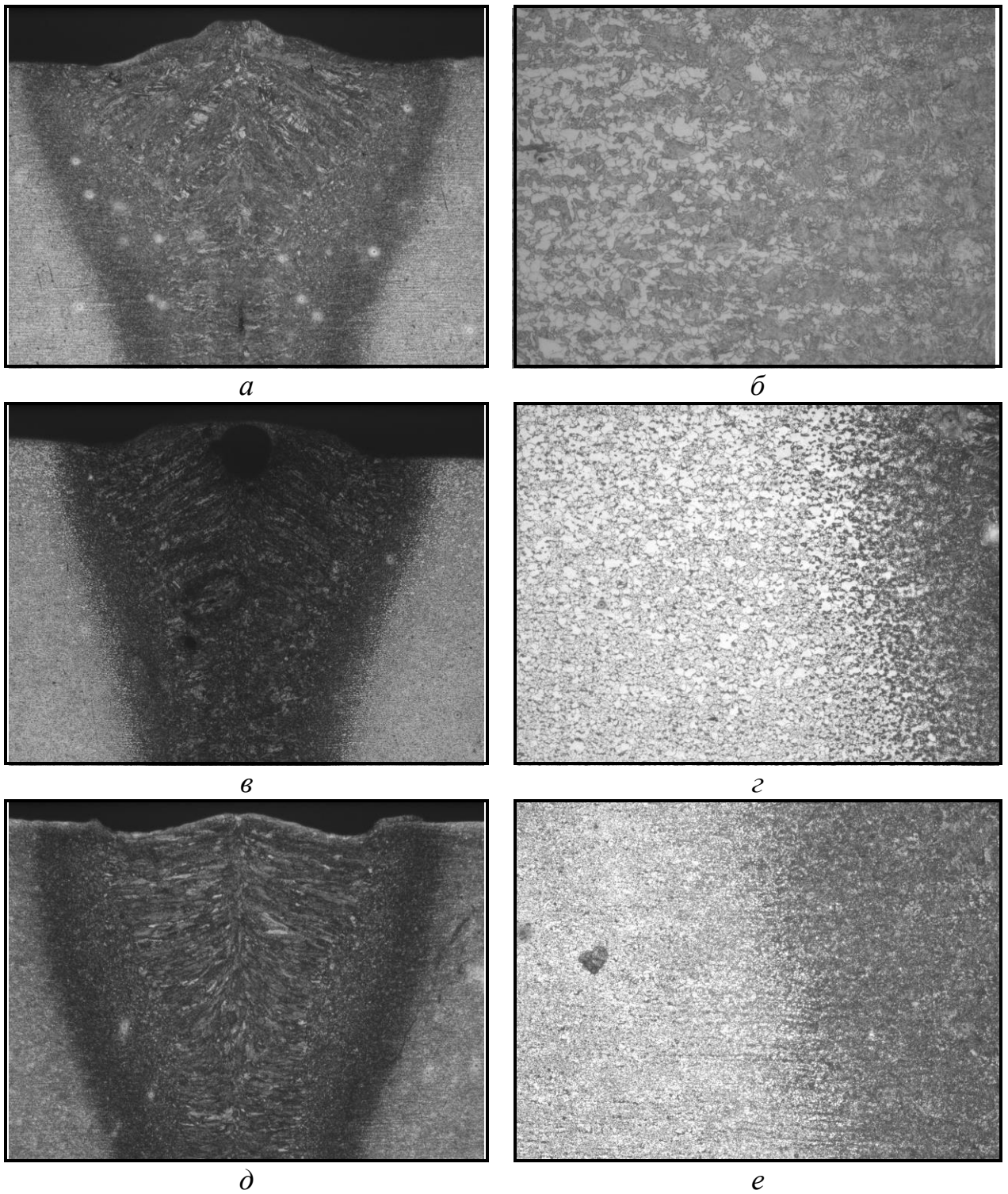


Рисунок 3.3 – Мікроструктура зварного шва після лазерного зварювання: *а, б* – сталь 09Г2С; *в, г* – сталь 10ХСНД; *д, е* – сталь 10Г2ФБ; *а, в, д* – ділянка 1; *б, г, е* – ділянка 2.

Це означає, що ступінь мікронапружень на границі між цими ділянками буде значно більшою, порівняно з іншими ділянками зварного з'єднання. Таким

чином, з енергетичної точки зору, ця ділянка буде характеризуватися підвищеним рівнем вільної енергії. Як наслідок, накопичення дефектів буде відбуватися саме на границі між ділянками 1 та 2 [155].

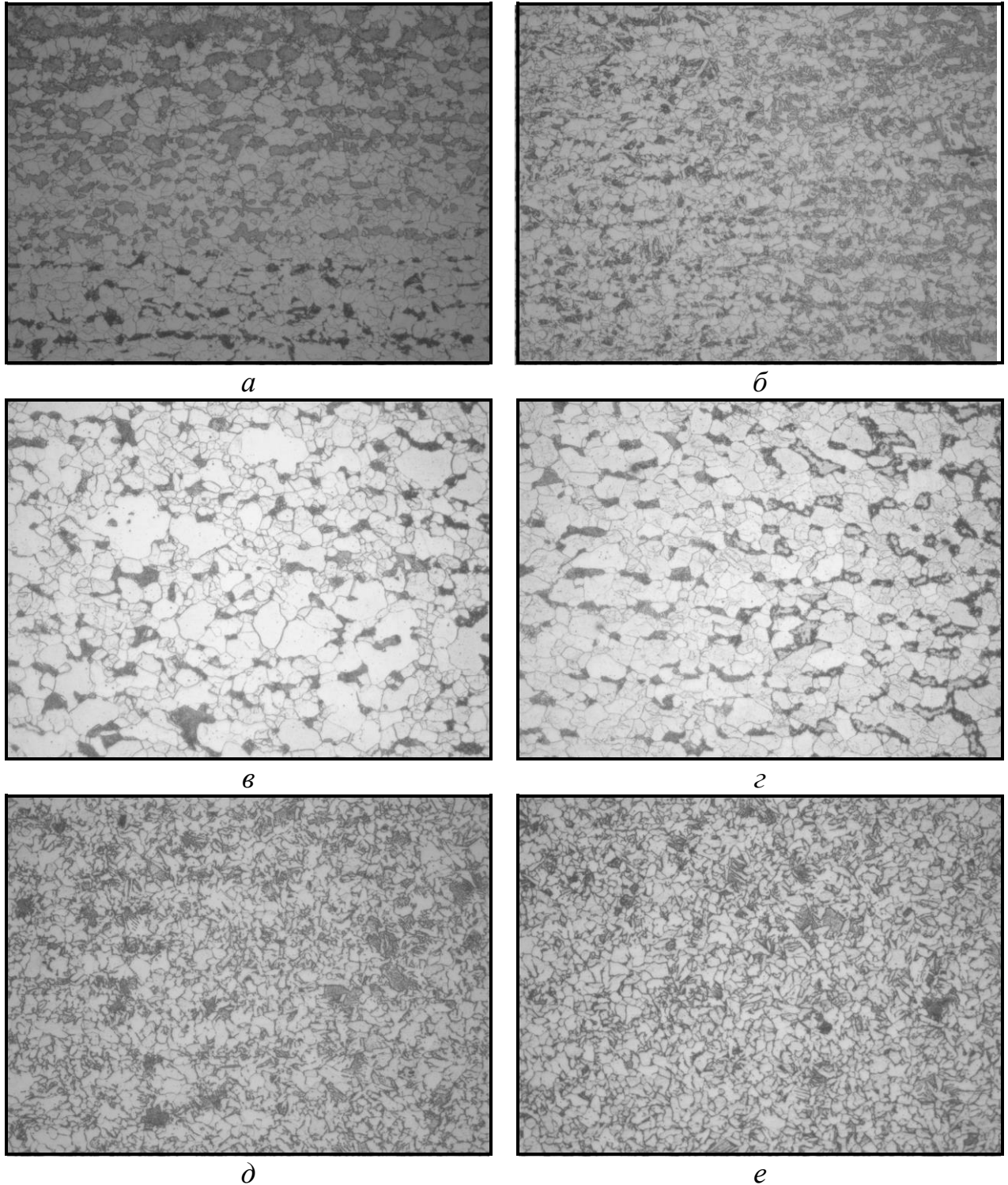


Рисунок 3.4 – Мікроструктура зварного шва після лазерного зварювання: *а, б* – сталь 09Г2С; *в, г* – сталь 10ХСНД; *д, е* – сталь 10Г2ФБ; *а, в, д* – ділянка 3; *б, г, е* – ділянка 4.

З метою узагальнення отриманих даних мікроструктур цих досліджень було побудовано загальні картини (монтажі) зварного з'єднання після лазерного зварювання для всіх досліджуваних марок сталей, які представлено на рисунку 3.5...3.7.

Аналіз приведених даних показує, що під час зварювання лазерний промінь переміщується вздовж зварювальних кромek і утворює локальну зону розплавлення металу. В передній частині цієї зони відбувається плавлення основного металу, а в хвостовій – швидка кристалізація металу. У міру просування проміння і супутньої зони розплавлення здійснюється безперервне формування зварного з'єднання.

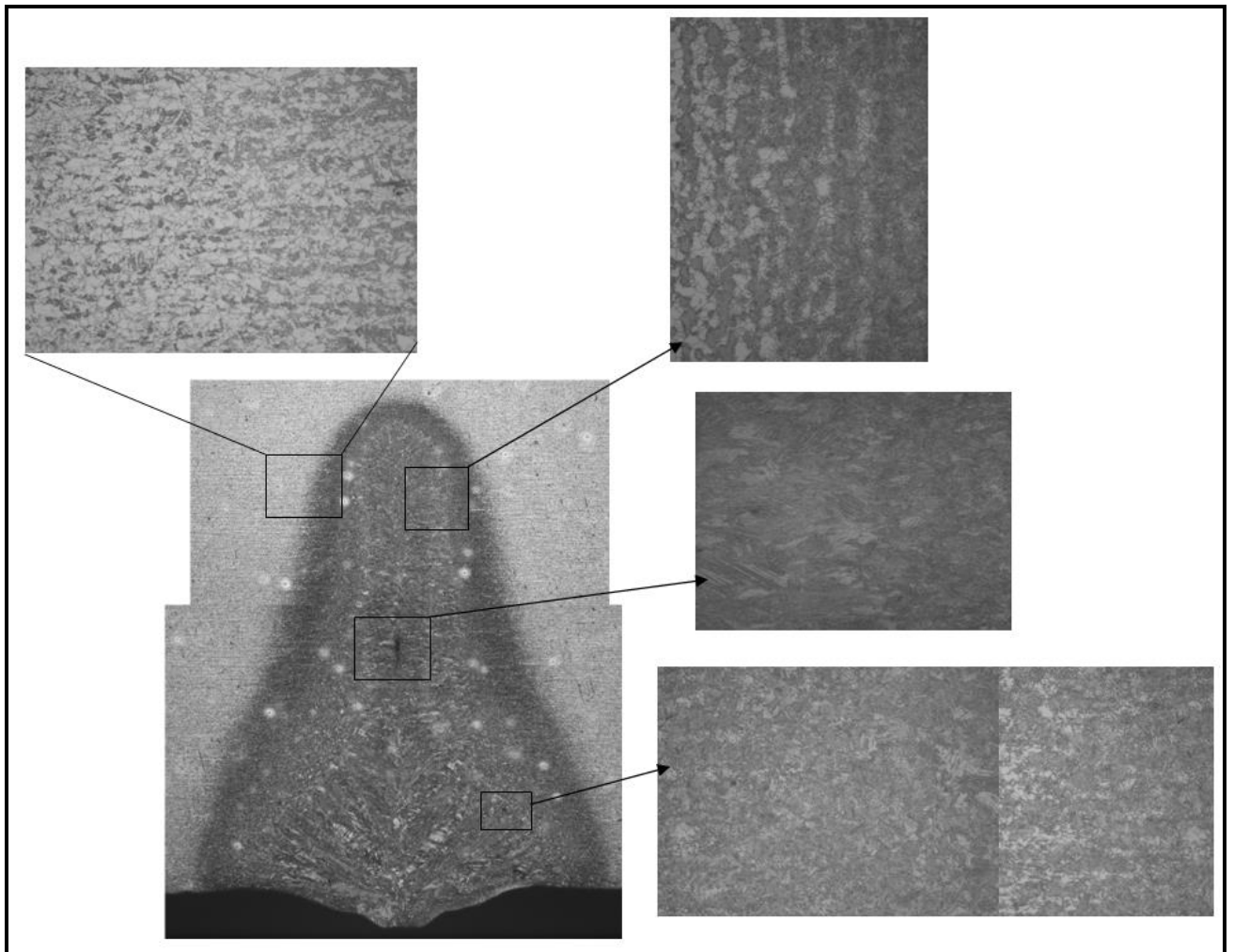


Рисунок 3.5 – Загальний вид та будова структури зварного з'єднання: сталь 09Г2С

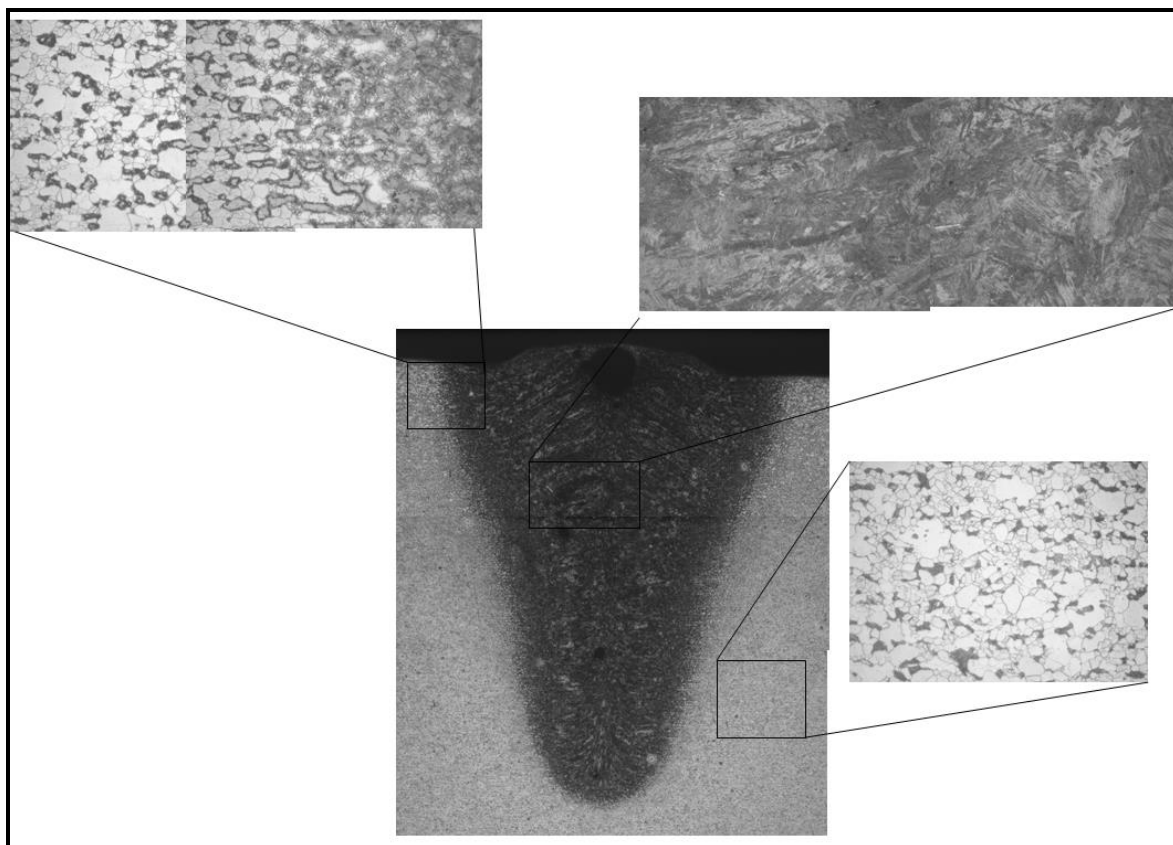


Рисунок 3.6 – Загальний вид та будова структури зварного з'єднання: сталь 10ХСНД

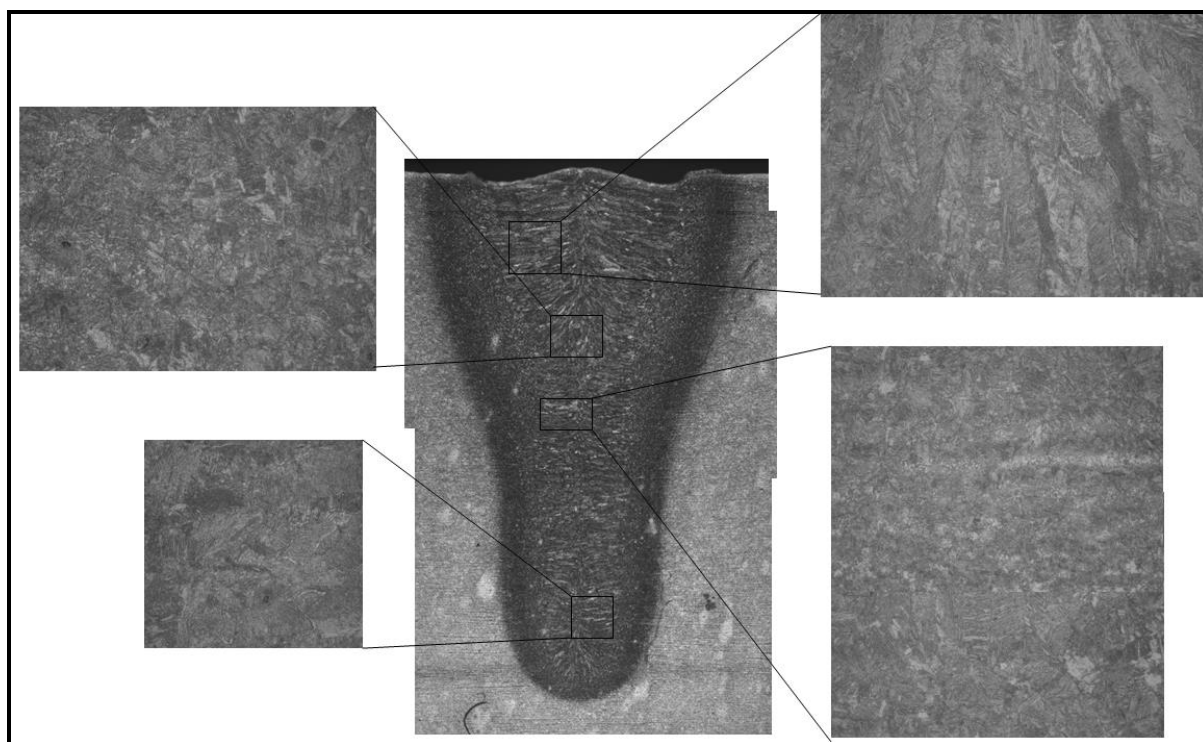


Рис. 3.7. Загальний вид та будова структури зварного з'єднання: сталь 10Г2ФБ

3.3. Дослідження структури з'єднання після електронно-променевого зварювання

Результати металографічних досліджень зварного з'єднання після електронно-променевого зварювання узагальнено та наведено на рисунку 3.8.

Аналіз отриманих даних показує, що формування структурного стану в зоні I має направлений характер, який обумовлено наявністю градієнта температур. Як наслідок, структура являє собою стовбчасті кристаліти, які зростають від поверхні розплавленого металу до центру шва (дивись рисунок 3 а, в, д). Для сталей 10ХСНД та 10Г2ФБ в центрі шва наявні рівноосні кристаліти (рисунок 3 в, д).

Поява рівновісної структури обумовлена наступними факторами:

- наявністю в сталях потужних карбідів, нітридів утворюючих елементів;
- локалізацією градієнта температур, який відповідає умовам режимів електронно-променевого зварювання.

На рисунку 3 б, г, е можна спостерігати чітко вираженні границі розділу між зоною I та зоною II. Даний елемент структури зварного з'єднання, згідно літературних джерел (дивись наприклад [156]), має назву лінія або границя сплавлення. Формування лінії сплавлення обумовлено процесами міграції границь зерен, які відбуваються під час охолодження після зварювання. Границі формуються при структурних перетвореннях безпосередньо при зростанні первинних кристалітів збоку шва та збоку основного металу. Кристалічні решітки зростаючих фаз мають довільну орієнтацію та їх сполучення супроводжується значною деформацією решіток, що обумовлює появу підвищеного рівня внутрішніх мікронапружень. Ці процеси безпосередньо залежать від тепловкладення, яке відбувається при зварюванні, тобто, чим локальніше джерело зварювання, тим менша різнозернистість і, як наслідок, менша ступінь внутрішніх мікро напружень.

При формуванні структурного стану зони II відбуваються фазові структурні перетворення, які є наслідком локального впливу теплоти джерела зварювання. Як наслідок, метал зони II, а також зони III має відмінну від основного металу мікроструктуру, яка відповідає режимам вторинної термічної обробки основного

металу при нагріванні до температур вище A_{c3} та охолодження з різними швидкостями.

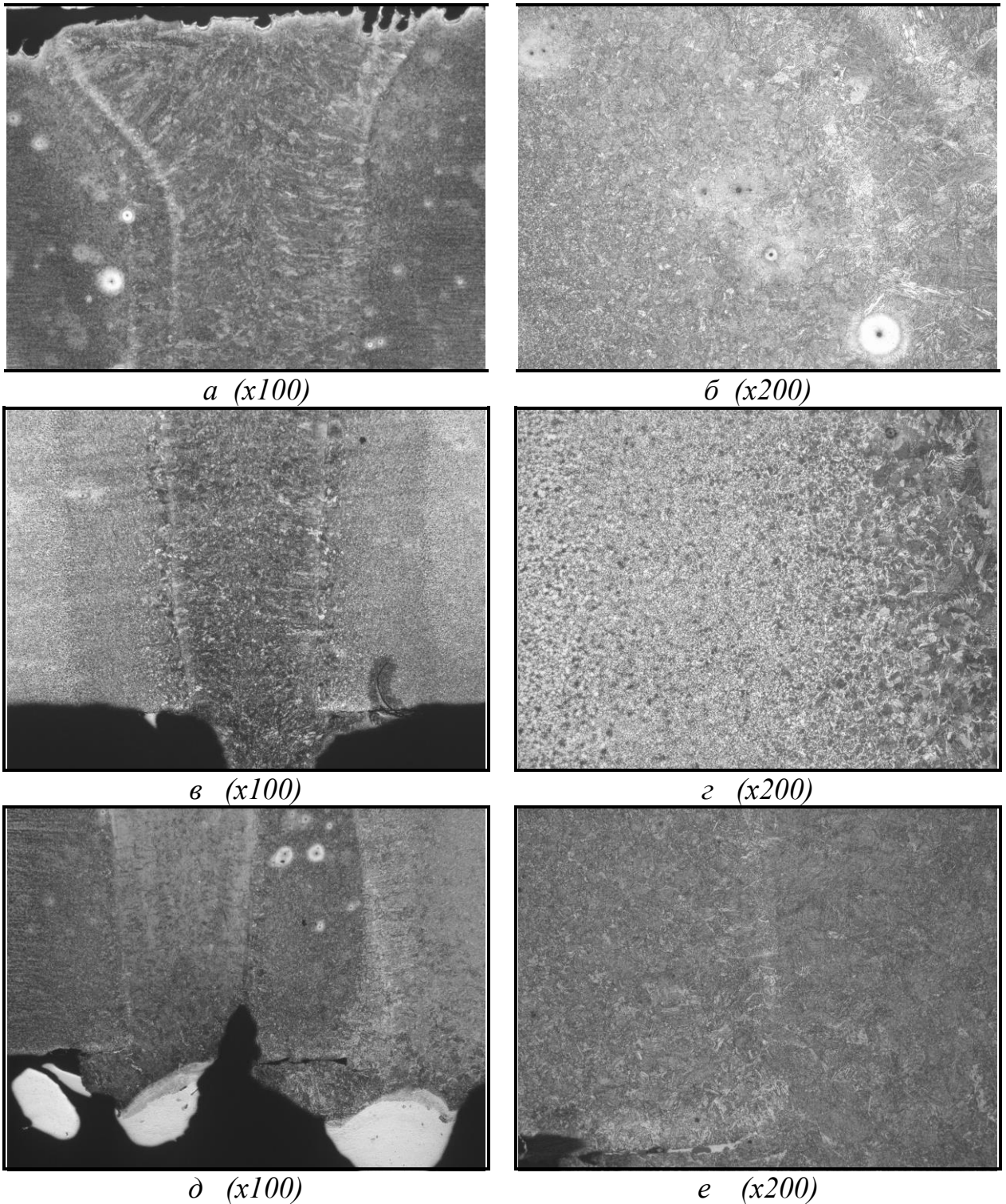


Рисунок 3.8 – Мікроструктура зварного шва електронно - променевого зварювання: *a, б* – 09Г2С; *в, z* – 10ХСНД; *д, e* – 10Г2ФБ.

При наближенні до зони I температури повторного нагріву наближуються до температур плавлення, витримка при таких температурах забезпечує формування дрібнозернистого аустеніту, який надалі перетворюється за бейнітним механізмом. При віддалені від зони I температури нагріву металу значно нижче, але вище ніж A_{c3} , тому розмір аустенітного зерна буде нижчим, ніж біля шва. Таким чином, при охолодженні формується ще більш дисперсна ферито-бейнітна структура, ніж в зоні II [157].

З метою узагальнення отриманих даних мікроструктурних досліджень було побудовано загальні монтажні зварного з'єднання, які наведено на рисунку 3.9...3.11.

Аналіз наведених монтажів показує, що під час електронно-променевого зварювання одночасно відбуваються процеси, які характерні як для кристалізації металу з рідкої фази, так і для фазових перетворень в твердому стані. За рахунок локального тепловкладення, в верхній частині ванни відбувається розплавлення основного металу, а в нижній вже йде кристалізація шва та структурні перетворення в твердому стані. При цьому, формування структурного стану зони III обумовлено в першу чергу прагненням системи до зменшення рівня вільної енергії (дивись рисунок 3.9...3.11). Відповідно, відбуваються змінення в розташуванні границь зерен, яке призводить до зниження сумарної довжини границь, і, як наслідок, до зниження рівня поверхневої енергії. Таким чином, структурний стан зони II та зони III формується за рахунок утворення вторинної зернограничної структури та її вирівнювання з точки зору зниження загального рівня вільної енергії.

3.4. Дослідження структури з'єднання після зварювання під шаром флюсу

Результати металографічних досліджень зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу узагальнено та наведено на рисунку 3.12. Аналіз наведених даних показує, що зростання кристалітів в звареному шві відбувається нормально до фронту кристалізації, тобто до ізотермічної поверхні кристалізації.

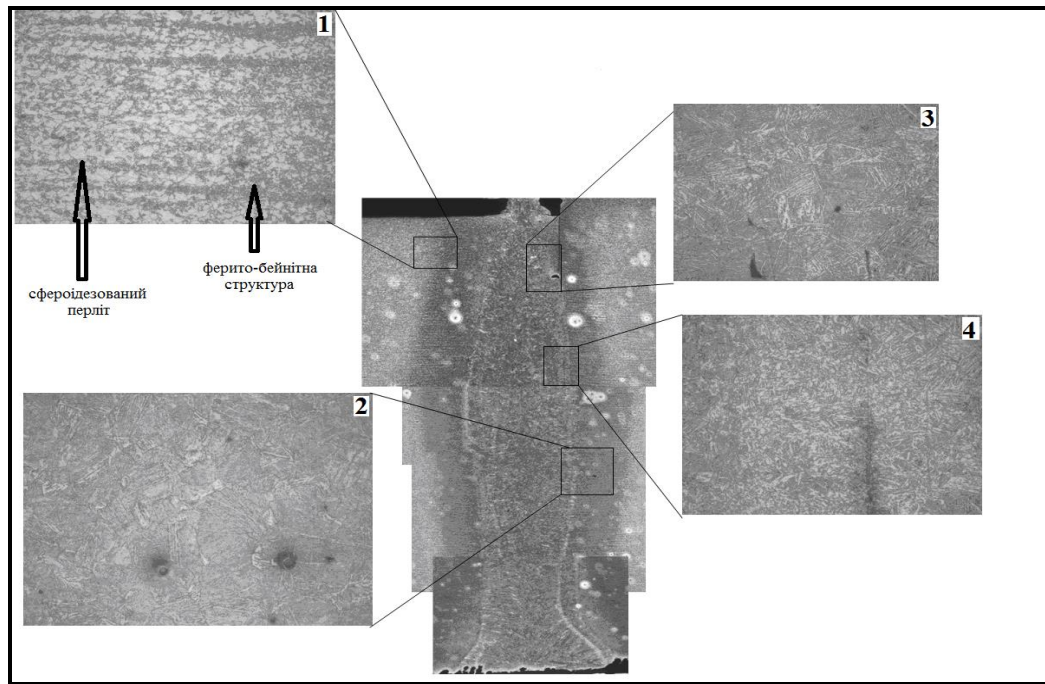


Рисунок 3.9 – Загальний вид та будова структури зварного з'єднання: сталь 09Г2С: 1 – границя між зонами III та IV; 2 – навколо шовна зона (близько до зони I); 3 – структура шва; 4 – границя між зонами 1-2

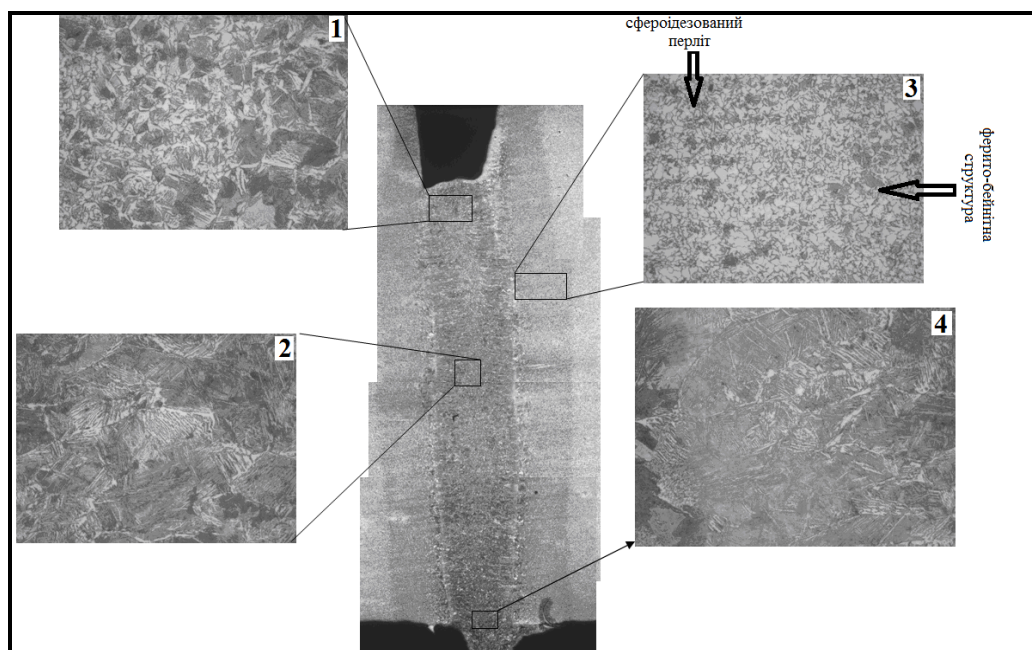


Рисунок 3.10 – Загальний вид та будова структури зварного з'єднання: сталь 10ХСНД: 1 – зона I (рівно вісні кристали); 2 – зона I, наявність литої структури; 3 – границя між зонами III та IV (наявність перехідного шару між ферито-бейнітною структурою та областю, де утворюється сфероїдезований ферит); 4 – структура кореню зварного шва.

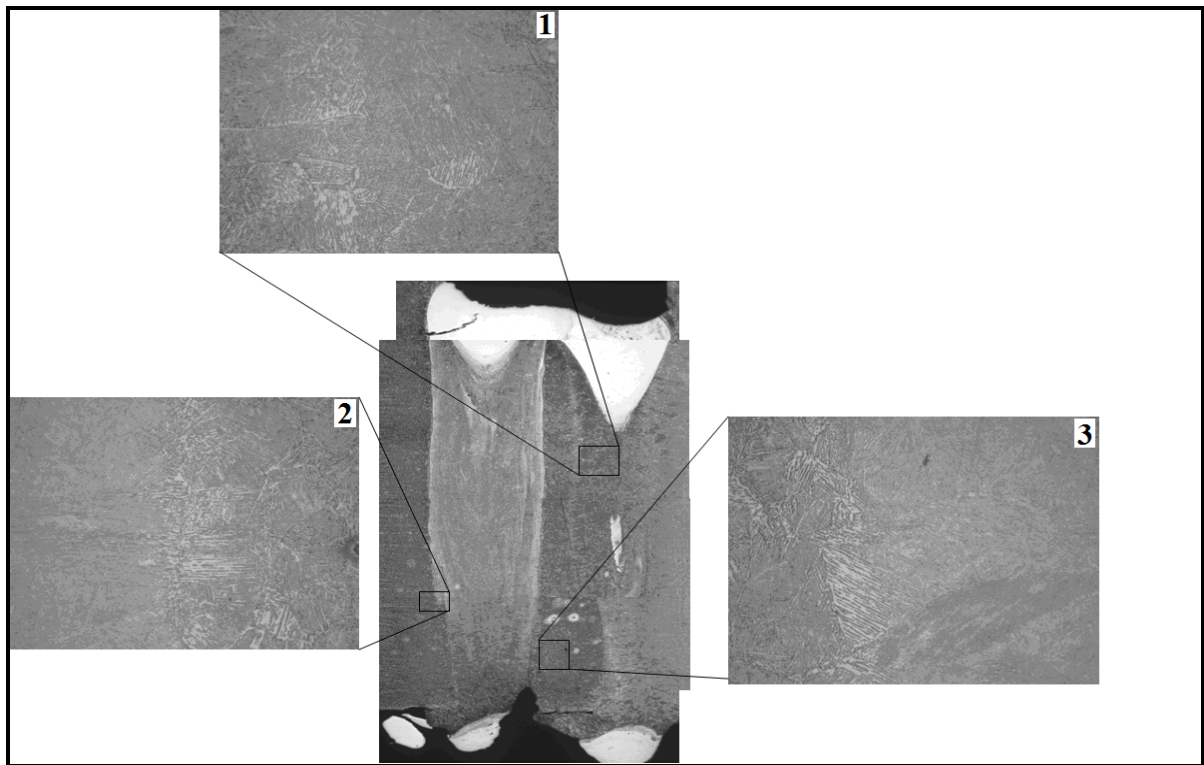


Рисунок 3.11 – Загальний вид та будова структури зварного з'єднання: сталь 10Г2ФБ: 1– структура зони III (область повторного нагріву до температури $A_{c3} + 50$, структура фериту та бейніту); 2 – границя зони I та II (зона плавлення); 3 – зона сплавлення у кореневого шва.

Оскільки при зварюванні ванна переміщується, то напрямком зростаючих кристалітів є ортогональною траєкторією до поверхні кристалізації, зміщених по осі шва. При цьому, якщо апроксимувати поперечний переріз зварювальної ванни колом, то форма всіх кристалітів буде аналогічною формі кристалітів на поверхні ванни. Як наслідок, вершини всіх кристалітів виходять на поздовжину вісь поверхні шва.

У процесі кристалізації зварювальної ванни розчинність азоту, водню і кисню знижується стрибкоподібно і виникають передумови для зворотного виділення. Це може з'явитися одним з факторів, що сприяють або обумовлюють появу і розвиток пір в металі шва.

З метою узагальнення отриманих даних мікроструктурних досліджень було побудовано загальні монтажні зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу, які наведено на рисунку 3.13 ... 3.15.

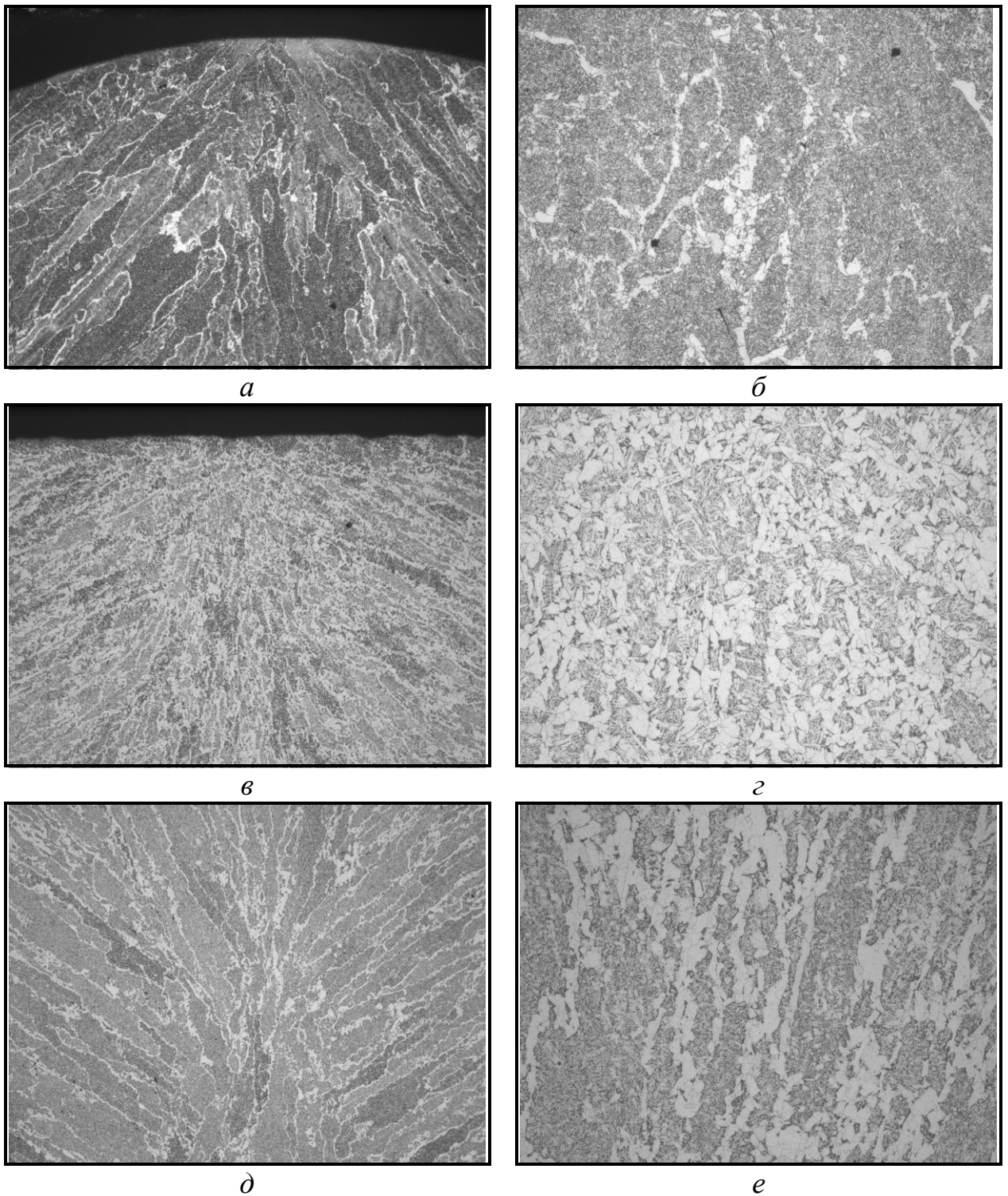


Рисунок 3.12 – Мікроструктура зварного шва після зварювання під шаром флюсу:
a, *б* – 09Г2С; *в*, *г* – 10ХСНД; *д*, *е* – 10Г2ФБ

Проведений комплекс металографічних досліджень показує, в центрі зварного шва присутня дендритна структура, що характерна для литого металу (рисунок 3.15). Поява дендритної структури пояснюється тим, що саме у даній зоні відбувається нагрів до температури плавлення, як основного металу, так и

флюсу. В наслідок цього, наступне охолодження призводить до неповної сегрегації домішок, які потрапляють до розплаву з флюсу. Як наслідок, домішки залишаються між кристалами α - фази, яка зростає, що призводить до появи міждендритної ліквідації. При наближенні до границі зони 1, швидкість кристалізації змінюється, як наслідок, $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення відбувається при більш низьких температурах, ніж в середині зони.

Як наслідок, в зоні 2 кристалізація відбувається при більш низьких температурах. Таким чином, спостерігаються пластинки фериту, що виділились під кутом 120° – структура відманштеттового ферриту [158] (рисунок 3.14). В наслідок появи α - фази відбувається перерозподіл вуглецю в γ - фазі, що призводить до утворення аустенітних областей, які будуть збагачені вуглецем майже до концентрації $\approx 0,8\%C$, і при наступному охолодженні вони перетворюються з формуванням перліту. Згідно літературних джерел [159], перлітна складова, яка формується за таких умов, має назву квазієвтектоїду. Через порівняно високу швидкість охолодження, аустеніт який залишається зазнає перетворення за проміжним механізмом, тобто, формується бейнітна складова (рисунок 3.13).

В наслідок структурних перетворень, які відбуваються під впливом температури зварювання та хімічного складу електричного дроту, перлітна складова зазнає процеси сфероїдезації, що призводять до появи в зоні 3 сфероїдезованого перліту (рисунок 3.14).

Структурний стан зони IV відповідає структурі металу, що був нагрітий в міжкритичному інтервалі температур. Відповідно, в структурі присутні великі зерна фериту, та дрібних колоній квазієвтектоїду, які є наслідком часткової рекристалізації аустеніту [160].

3.5. Кількісний аналіз структурного стану, який формується після різних режимів зварювання низьковуглецевих низьколегованих сталей

З метою кількісного аналізу отриманих даних було здійснено експериментальне вимірювання геометричних розмірів зон зварного з'єднання.

Отримані дані узагальнено та наведено у таблиці 3.1 ... 3.3.

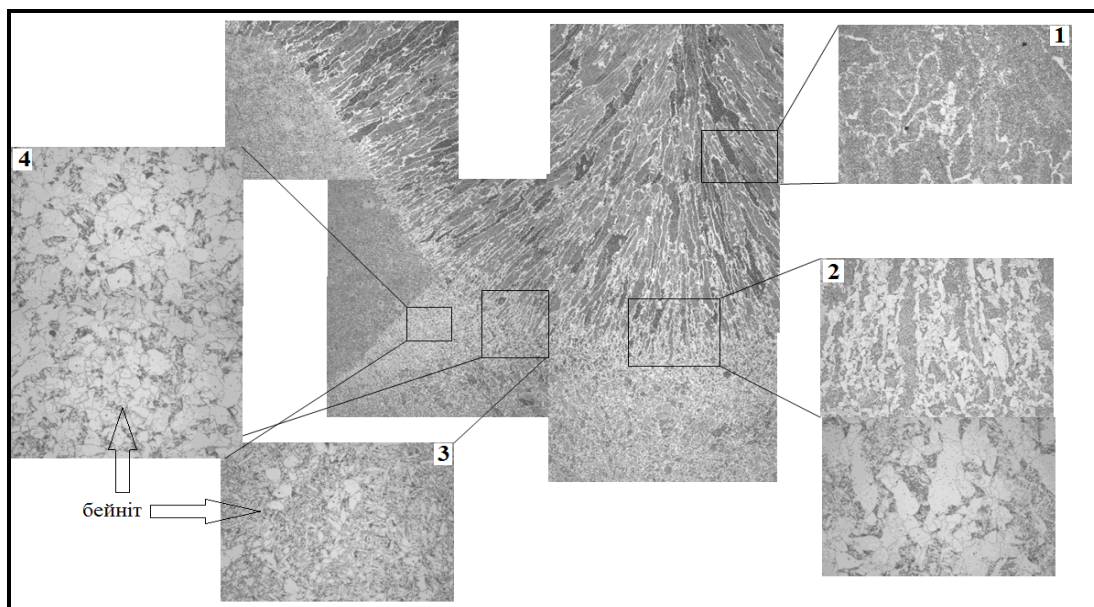


Рисунок 3.13 – Загальний вид та будова структури зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу: сталь 09Г2С: 1 – зона I; 2, 3 – зони II; 4 – зона III.

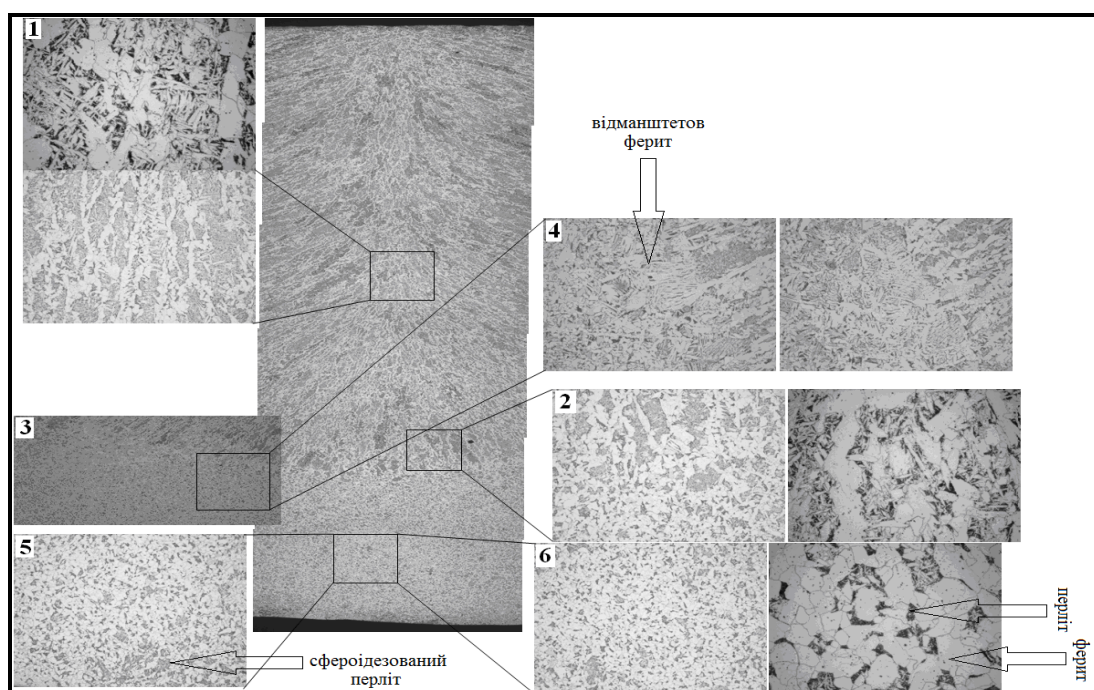


Рисунок 3.14 – Загальний вид та будова структури зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу: сталь 10ХСНД: 1, 2 – зона I; 3, 4 – зона II; 5, 6 – зона III.

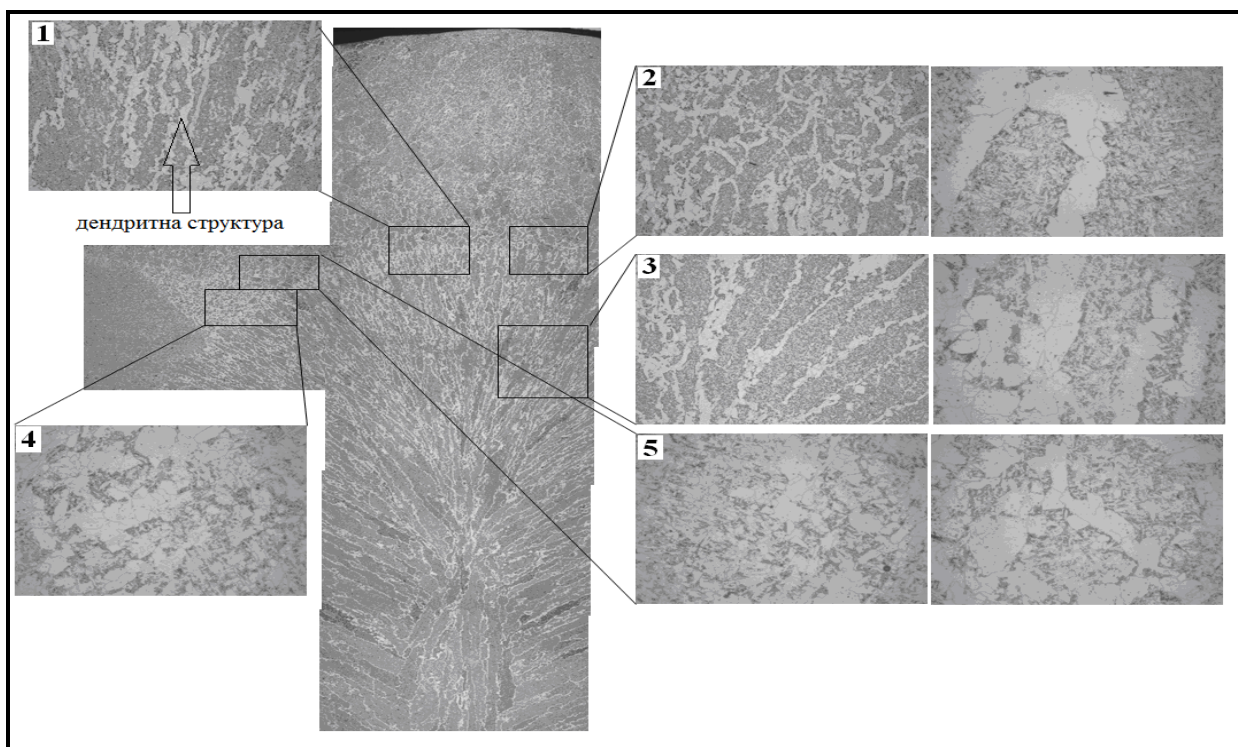


Рисунок 3.15 – Загальний вид та будова структури зварного з’єднання після зварювання під шаром флюсу: сталь 10Г2ФБ: 1, 2, 3 – зона І; 4, 5 – зона ІІ.

Таблиця 3.1 – Геометричні розміри ділянок зварного з’єднання зразків зі сталі 09Г2С

Тип з’єднання	Ділянки			
	Зварний шов, мм	Границя шва – ЗТВ, мм	ЗТВ, мм	Границя ЗТВ – основний метал, мм
Лазерне зварювання	6,9	0,8	3,5	3,2
Електронно-променевого зварювання	11,7	1,5	4,9	2,6
Зварювання під шаром флюсу	16,4	0,8	6,9	0,5

Кількісний аналіз результатів наведених в таблиці 3.1 свідчить про те, що, найменші розміри границі шов - зона термічного впливу для сталі 09Г2С спостерігаються при лазерному зварюванні, та при зварюванні під шаром флюсу, для електронно - променевого зварювання ширина розміру збільшена у

1,8 разів. Найменші розміри зони термічного впливу спостерігаються при лазерному зварюванні, при електронно - променевому зварюванні та при зварюванні під шаром флюсу розміри зони термічного впливу перевищено майже у 1,5 - 2 рази. Найменша ширина між границею зони термічного впливу-основний метал спостерігається при зварюванні під шаром флюсу, при електронно-променевому зварюванні спостерігається збільшення розміру у 1,2 рази, а при лазерному зварюванні у 6,4 рази.

Таблиця 3.2 – Геометричні розміри ділянок зварного з'єднання зразків зі сталі 10ХСНД

Тип з'єднання	Ділянки			
	Зварний шов, мм	Границя шва – ЗТВ, мм	ЗТВ, мм	Границя ЗТВ – основний метал, мм
Лазерне зварювання	14,6	1,4	2,2	2,6
Електронно-променевого зварювання	8,6	0,9	2,4	1,9
Зварювання під шаром флюсу	15,6	1,2	8,9	0,8

Таблиця 3.3 – Геометричні розміри ділянок зварного з'єднання зразків зі сталі 10Г2ФБ

Тип з'єднання	Ділянки			
	Зварний шов, мм	Границя шва – ЗТВ, мм	ЗТВ, мм	Границя ЗТВ – основний метал, мм
Лазерне зварювання	10,4	0,6	4,4	2,4
Електронно-променевого зварювання	15,4	0,5	5,4	0,6
Зварювання під шаром флюсу	12,4	0,6	8,6	0,4

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.2 показує, що для сталі 10ХСНД найменша ширина границі шва та зони термічного впливу спостерігається при електронно-променевому зварюванні, при зварюванні під шаром флюсу та при лазерному зварюванні ці розміри будуть 0,5-1 разів збільшені. Найменші розміри зони термічного впливу спостерігаються при лазерному зварюванні, та при електронно-променевому зварюванні, при зварюванні під шаром флюсу ширина зони термічного впливу збільшена у 4 рази. Розмір границя зона термічного впливу - основний метал при зварюванні під шаром флюсу спостерігається найменшим, для електронно-променевого зварювання розмір перевищує майже в 0,5 разів, для лазерного зварювання ширина розміру буду збільшена в 3 рази.

Комплексний аналіз наведених у таблиці 3.3 даних показує, що для сталі 10Г2ФБ найменші розміри між границею шва та зоною термічного впливу спостерігається при електронно-променевому зварюванні, для лазерного зварювання, та для зварювання під шаром флюсу дані показники перевищують всього на 0,1. Розміри зони термічного впливу для лазерного зварювання спостерігаються найменшими, розміри зони термічного впливу для електронно-променевого зварювання збільшені у 0,8 разів, для зварювання під шаром флюсу майже у тричі. Розміри границя зона термічного впливу - основний метал для зварювання під шаром флюсу та для електронно-променевого зварювання спостерігаються найменшими, для лазерного зварювання ширина розміру границя зона термічного впливу - основний метал спостерігається збільшеною майже вдвічі.

Отриманні кількісні дані свідчать про те, що лінійний розмір границь розділу між зонами зварного з'єднання змінюється в залежності як від вибору марки сталі, так і від обраного режиму зварювання. Комплексний аналіз приведених в таблицях даних показує, що найменші розміри границі шов - зона термічного впливу та границі зона термічного впливу - основний метал при всіх типах зварювання має сталь 10Г2ФБ. З точки зору обраного режиму зварювання найменші за розмірами зони утворюються при лазерному зварюванні.

Для виконання кількісного аналізу отриманих даних було здійснено експериментальне вимірювання відсоткового співвідношення структурних складових по зонам зварного з'єднання досліджувальних марок сталі.

Отримані дані узагальнено та наведено у таблицях 3.4...3.6.

Сумісний аналіз наведених в таблиці 3.4 даних показує, що для зразків зі сталі 09Г2С відсотковий вміст феритної складової при лазерному зварюванні збільшується в 3 та 4 ділянці. Відсотковий вміст перлітної складової на вказаних ділянках зменшується. При електронно-променевому зварюванні відсотковий вміст феритної складової зменшується лише у 3 ділянці порівняно з 2 та 4 ділянкою; а вміст перлітної складової навпаки, у 3 ділянці зростає. При зварюванні під шаром флюсу відсотковий вміст феритної та перлітної складової у 2, 3 та 4 ділянках не змінюється.

Аналіз наведених в таблиці 3.5 даних показує, що для зразків зі сталі 10ХСНД відсотковий вміст феритної складової при лазерному зварюванні у 3 та 4 ділянці збільшується, а відсотковий вміст перлітної складової зменшується. При електронно-променевому зварюванні відсотковий вміст феритної складової у 3 та 4 ділянці зменшується, а відсотковий вміст перлітної складової порівняно з 2 ділянкою збільшується. При зварюванні під шаром флюсу відсотковий вміст феритної та перлітної складової у всіх 4 ділянках залишається однаковим.

Аналіз даних, представлених у таблиці 3.6 для зразків зі сталі 10Г2ФБ вказує, що при лазерному зварюванні у 2 та 3 ділянках відсотковий вміст феритної та перлітної складової буде однаковим, та до 4 ділянки не змінюється, у 4 ділянці спостерігається значне зменшення перлітної складової, що пояснюється перерозподілом вуглецю, в наслідок якого відбувається формування бейнітної складової. При електронно-променевому зварюванні у 2 ділянці відсотковий вміст феритної та перлітної складової буде однаковим, у 3 та 4 ділянці вміст феритної складової зменшується, а вміст перлітної складової збільшується. При зварюванні під шаром флюсу відсотковий вміст феритної складової збільшено лише у 3 ділянці, збільшення змісту перлітної складової спостерігається у 2 та 4 ділянці.

Таблиця 3.4 – Відсоткове співвідношення структурних складових зразків зі сталі
09Г2С

Тип зварювання	Ділянка 2 (границя зварний шов – ЗТВ)		Ділянка 3 (ЗТВ)		Ділянка 4 (Границя ЗТВ – основний метал)	
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт
Лазерне зварювання	50	50	55	45	55	45
Електронно-променевого зварювання.	60	40	50	50	60	40
Зварювання під шаром флюсу	60	40	60	40	60	40

Таблиця 3.5 – Відсоткове співвідношення структурних складових зразків зі сталі
10ХСНД

Тип зварювання	Ділянка 2 (границя зварний шов – ЗТВ)		Ділянка 3 (ЗТВ)		Ділянка 4 (Границя ЗТВ – основний метал)	
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт
Лазерне зварювання	50	50	60	40	60	40
Електронно-променевого зварювання.	45	55	40	60	40	60
Зварювання під шаром флюсу	40	60	40	60	40	60

Результатами щодо дослідження розмірів структурних складових, які формуються в зварному з'єднанні після різних режимів зварювання узагальнено та наведено у таблицях 3.7... 3.9.

Таблиця 3.6 – Відсоткове співвідношення структурних складових зразків зі сталі 10Г2ФБ

Тип зварювання	Ділянка 2 (границя зварний шов – ЗТВ)		Ділянка 3 (ЗТВ)		Ділянка 4 (Границя ЗТВ – основний метал)		
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Бейніт
Лазерне зварювання	50	50	50	50	50	35	15
Електронно-променевого зварювання.	50	50	45	55	45	55	-
Зварювання під шаром флюсу	45	55	50	50	45	55	-

Таблиця 3.7 – Середній розмір зерна фериту зразків зі сталі 09Г2С

Тип зварювання	Ділянка 2 (границя зварний шов – ЗТВ)	Ділянка 3 (ЗТВ)	Ділянка 4 (Границя ЗТВ – основний метал)
	Ферит	Ферит	Ферит
Лазерне зварювання	17	9	9
Електронно-променевого зварювання	15	9	9
Зварювання під шаром флюсу	13	9	8

Аналіз даних, представлених у таблиці 3.7 для зразків зі сталі 09Г2С показує, для всіх досліджувальних режимів зварювання у 2 ділянці спостерігається збільшене зерно фериту, у 3 та 4 ділянках зерно фериту зменшується.

Таблиця 3.8 – Середній розмір зерна фериту зразків зі сталі 10ХСНД

Тип зварювання	Ділянка 2 (границя зварний шов – ЗТВ)	Ділянка 3 (ЗТВ)	Ділянка 4 (Границя ЗТВ – основний метал)
	Ферит	Ферит	Ферит
Лазерне зварювання	28	18	13
Електронно-променевого зварювання	33	18	11
Зварювання під шаром флюсу	24	23	28

Таблиця 3.9 – Середній розмір зерна фериту зразків зі сталі 10Г2ФБ

Тип зварювання	Ділянка 2 (границя зварний шов – ЗТВ)	Ділянка 3 (ЗТВ)	Ділянка 4 (Границя ЗТВ – основний метал)
	Ферит	Ферит	Ферит
Лазерне зварювання	9	7	9
Електронно-променевого зварювання	8	9	6
Зварювання під шаром флюсу	36	22	17

Аналіз даних, представлених у таблиці 3.8 для зразків зі сталі 10ХСНД показує, у 2 ділянці для всіх досліджувальних режимів зварювання спостерігається збільшене зерно фериту. При лазерному та електронно-променевому зварюванні у 3 та 4 ділянці зерно фериту зменшується, а при зварюванні під шаром флюсу зменшення зерна спостерігається тільки у 3 ділянці, у 4 ділянці спостерігається на 0,2 % збільшення зерна у порівнянні із 2 ділянкою.

Аналіз даних, представлених у таблиці 3.9 для зразків зі сталі 10Г2ФБ збільшення зерна при лазерному зварюванні спостерігається у 2 та 4 ділянці, у 3 ділянці розмір зерна зменшується. При електронно-променевому зварюванні та

при зварюванні під шаром флюсу збільшення зерна відбувається у 2 та 3 ділянці, зменшення росту зерна спостерігається у 4 ділянці.

3.6. Висновки по розділу 3

1. Проведено дослідження структурного стану зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після лазерного зварювання, електронно-променевого зварювання, та після зварювання під шаром флюсу;
2. Встановлено, що при зварюванні під шаром флюсу на границі між зварним швом та зоною термічного впливу, а також у зоні термічного впливу через підвищену швидкість охолодження для сталей 10ХСНД спостерігається поява відменштетового фериту та дрібних колоній квазієвтектоїду. Для сталі 10Г2ФБ в структурі спостерігається поява бейнітної складової, що обумовлено перерозподілом вуглецю та появи збіднених вуглецем локальних областей аустеніту.
3. Проведено кількісний аналіз структурного стану для всіх досліджувальних марок сталі після різних режимів зварювання. Аналіз отриманих результатів показує, що при лазерному зварюванні для сталей 09Г2С та 10Г2ФБ спостерігається найменша ширина зварного шва, та границя між зварним швом та зоною термічного впливу. Для сталей 10ХСНД найбільші розміри шва та розміри між границею шва та зоною термічного впливу були отримані при електронно-променевому зварюванні. Це свідчить про те, що лазерне та електронно-променеве зварювання стосовно досліджувальних марок сталі характеризуються більш низьким ступенем механічних напружень в зоні зварного з'єднання та зоні термічного впливу, що позитивно впливає на якість з'єднання та механічні властивості всього металу.
4. Кількісний аналіз відсоткового вмісту структурних складових показав, що при зварюванні під шаром флюсу для сталей 09Г2С на границі зварний щов- зона термічного впливу, у зоні термічного впливу та на границі між

зотою термічного впливу та основним металом, відсотковий вміст феритної складової становить 60%, зменшення відсоткового вмісту фериту для структурних складових не спостерігається, при цьому, вміст перлітної складової становить 40% для всіх з 2-4 ділянки, при інших режимах зварювання вміст перлітної складової збільшено. При лазерному зварюванні для сталей 10ХСНД та 10Г2ФБ відсотковий вміст феритної складової в зоні термічного впливу та на границі зони термічного впливу - основний метал збільшується, а вміст перлітної складової зменшується. При електронно-променевому зварюванні та при зварюванні під шаром флюсу навпаки, в досліджувальних ділянках спостерігається відсоткове збільшення перлітної та зменшення феритної складової. Виходячи з цього, слід зазначити, що, при лазерному зварюванні, та при зварюванні під шаром флюсу для відповідних марок сталі, за рахунок збільшення відсоткового вмісту феритної складової, а для сталі 10Г2ФБ ще й бейнітної складової призводить до підвищення міцності, ударної в'язкості та пластичності сталі. При збільшенні відсоткового вмісту перлітної складової спостерігається зменшення пластичності та ударної в'язкості металу.

5. Проведений комплекс досліджень показав, що при зварюванні під шаром флюсу для зразків зі сталі 09Г2С та 10ХСНД на границі між зварним швом та зоною термічного впливу середній розмір феритного зерна буде найменшим, порівняно з іншими режимами зварювання, та починаючи з 2 ділянки розмір феритного зерна зменшується. При лазерному та електронно-променевому зварюванні для сталі 10Г2ФБ на границі зварний шов та зона термічного впливу спостерігається найменший середній розмір феритного зерна, з подальшим його зменшенням в структурних складових. Слід зауважити, зменшення розміру феритної складової призводить до значного підвищення механічних характеристик всього металу.
6. Проведений комплекс металографічних досліджень показав, що в зварних з'єднань в наслідок локального тепло вкладання формується структурний стан, який характеризується елементами, характерними як для литого, так і

для рекристалізованого та швидкоохолодженого металопрокату. Як наслідок, найбільш небезпечними зонами (з точки зору зародження дефектів) є приграничні зони зварного з'єднання, а саме: границя шов – зона термічного впливу, та границя зона термічного впливу – основний метал. В цих зонах спостерігається певна різноструктурність, яка призводить до підвищення рівня внутрішніх мікронапружень, і як наслідок підвищення рівня внутрішньої енергії, і можливого зародження руйнування.

3.7. Список використаних джерел в розділі 3

У розділі 3 використані джерела [150-160]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 4

КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА КРИТЕРІЯМИ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОГО СТАНУ З'ЄДНАННЯ

4.1. Кореляційний аналіз взаємозв'язку між параметрами процесу зварювання та відповідним структурним станом матеріалу

У таблиці 4.1 представлено величину енерговкладу для різних типів зварювання. Для розрахунків використовувались данні експериментальних режимів зварювання, які наведено в пункті 2.2 розділу 2 даної дисертаційної роботи.

Величина енерговкладу була визначена по формулі:

$$J_{\text{пит}} = \frac{P}{VD}, \quad (4.1)$$

де P – потужність джерела, кВт ; V – швидкість процесу, м/с ; D – діаметр пучка, мм .

Таблиця 4.1 – Величина енерговкладу для різних типів зварювання

Тип з'єднання	P потужність зварювання, кВт	V Швидкість зварювання, м/с	D діаметр променя, мм	$J_{\text{пит.}}$, МДж/м^2
Лазерне зварювання	4,4	$25 \cdot 10^{-3}$	0,6	293
Електронно-променевого зварювання	4,2	$55 \cdot 10^{-4}$	2	382
Зварювання під шаром флюсу	24,8	$31 \cdot 10^{-2}$	2,5	578

Для дослідження взаємозв'язку між величиною енерговкладання та геометричними розмірами зон зварного з'єднання після різних режимів

зварювання було використано математичний апарат кореляційного аналізу. У якості вихідних даних використовувались експериментальні підрахунки геометричних розмірів зон зварного з'єднання (дивись пункт 3.4 донної роботи). Отримані результати наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вплив теплоти вкладення $J_{\text{пит}}$ на геометричний розмір зон зварного з'єднання

Лазерне зварювання			
Зони зварного з'єднання	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Зварний шов	0,443533	0,064018	0,554416
Границя зварний шов – зона термічного впливу.	0,992065	0,998705	0,958804
Зона термічного впливу	0,646221	0,999980	0,992065
Границя зони термічного впливу-основний метал	0,998705	0,927648	0,984111
Електронно-променеве зварювання			
Зони зварного з'єднання	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Зварний шов.	0,555431	0,961257	0,973904
Границя зварний шов – зона термічного впливу.	0,848555	0,932557	0,628619
Зона термічного впливу	0,700473	0,797017	0,764265
Границя зони термічного впливу-основний метал	0,885892	0,932557	0,933257
Автоматичне зварювання під шаром флюсу			
Зони зварного з'єднання	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Зварний шов.	0,964579	0,866025	0,899770
Границя зварний шов – зона термічного впливу.	0,944911	0,704634	0,500000
Зона термічного впливу	0,933257	0,821995	0,214708
Границя зони термічного впливу-основний метал	0,500000	0,944911	0,866025

Аналіз наведених в таблиці 4.2 даних показує, що для всіх досліджувальних марок сталі при лазерному зварюванні спостерігається прямий тісний зв'язок між енерговкладенням та геометричними розмірами границь між відповідними зонами зварного з'єднання. Для електронно-променевого зварювання теж спостерігається

подібна залежність, але тіснота зв'язку дещо менша. Для зварювання під шаром флюсу прямий тісний зв'язок спостерігається між енерговкладанням та геометричними розмірами самих зон.

Отримані залежності свідчать про те, що, при зварюванні під шаром флюсу відбувається розсіювання тепла зварювання в більшій області, ніж при лазерному та електронно-променевому зварюванні. Це призводить до того, що процеси структуроутворення при електронно-променевому та лазерному зварюванні будуть проходити в більш вузькій області, тобто, швидкість формування структурних складових буде більше [3, 130]. Це призведе до формування в більш дисперсного структурного стану, що підтверджується результатами металографічного дослідження (див. розділ 3 даної роботи).

Аналіз взаємозв'язку між геометричними розмірами зон зварного з'єднання здійснювалися шляхом побудови кореляційної матриці взаємозв'язку. В якості вихідних даних використовувалися дані таблицях 3.1...3.3 розділу 3. Загальний вигляд отриманих матриць приведено в таблиці А.1 Додатку А.

Аналіз отриманих даних показує, що для лазерного зварювання сталі 09Г2С, 10ХСНД з збільшенням геометричних розмірів зварного шва зменшуються розміри зон контакту. При цьому, для всіх трьох досліджувальних марок сталі прямий тісний зв'язок спостерігається між геометричними розмірами ЗТВ та границею зварний шов ЗТВ, це свідчить про те, що, теплова енергія зварювання концентрується в достатньо вузькій області, при цьому, одночасно на границях між зоною розплавлення та іншими зонами зварного з'єднання одночасно протікають процеси як кристалізації з рідкого стану, так і фазові перекристалізації. Аналогічна картина спостерігається також і для електронно-променевого зварювання. Для зварювання під шаром флюсу спостерігається більш тісний взаємозв'язок між геометричними розмірами зон зварного з'єднання.

Для аналізу взаємозв'язку впливу енерговкладу на структурний стан зварного з'єднання було застосовано математичний апарат попарного кореляційного аналізу [142, 143].

У якості вихідних даних використовувались експериментальні результати щодо кількісного аналізу відсоткового вмісту структурних складових фериту та перліту по зонам зварного з'єднання, які отримано в розділі 3 даної дисертаційної роботи. Побудовані кореляційні матриці узагальнено та наведено в таблицях 4.3, 4.4.

Таблиця 4.3 – Кореляційна матриця взаємозв'язку впливу теплоти вкладення $J_{\text{пит}}$ та, відсотковим вмістом феритної складової

Лазерне зварювання			
Вміст відсоткової складової	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Ферит зони 2	0,993221	0,997949	0,991242
Ферит зони 3	0,879135	0,977010	0,896258
Ферит зони 4	0,993221	0,930711	0,701704
Електронно-променеве зварювання			
Вміст відсоткової складової	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Ферит зони 2	0,834342	0,844531	0,733712
Ферит зони 3	0,984324	0,954338	0,803957
Ферит зони 4	0,741935	0,267828	0,803957
Автоматичне зварювання під шаром флюсу			
Вміст відсоткової складової	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Ферит зони 2	0,866025	0,832240	0,893375
Ферит зони 3	0,866025	0,832240	0,846172
Ферит зони 4	0,970725	0,832240	0,825431

Аналіз даних в таблицях 4.3, 4.4 показує прямий тісний зв'язок між відсотковим вмістом феритної складової по зонам зварного з'єднання та відповідним енерговкладанням. При цьому, для лазерного та електронно-променевого зварювання з удаленням від зони сплавлення, зв'язок між енерговкладанням та відсотковим вмістом знижується. Це пов'язано з локальним

тепловкладенням і, як наслідок, більш високою швидкістю охолодження (порівняно зі зварюванням під шаром флюсу), яке має місце при лазерному та електронно-променевому зварюванні. Зі структурної точки зору це означає перерозподіл дифузійних потоків вуглецю та формування більш розширеної перлітної складової, або формування структури за проміжним механізмом (поява бейнітної складової структури для сталі 10Г2ФБ при лазерному зварюванні (дивись таблицю 3.6 розділу 3).

Таблиця 4.4 – Кореляційна матриця взаємозв'язку впливу теплоти вкладки $J_{\text{пит}}$ та, відсотковим вмістом перлітної складової

Лазерне зварювання			
Вміст відсоткової складової	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Перліт зони 2	0,941043	0,980241	0,701704
Перліт зони 3	0,879135	0,992065	0,443533
Перліт зони 4	0,941043	0,992065	0,701704
Електронно-променеве зварювання			
Вміст відсоткової складової	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Перліт зони 2	0,267828	0,869656	0,933257
Перліт зони 3	0,741935	0,933257	0,933257
Перліт зони 4	0,797017	0,933257	0,933257
Автоматичне зварювання під шаром флюсу			
Вміст відсоткової складової	Марка сталі		
	09Г2С	10ХСНД	10Г2ФБ
Перліт зони 2	0,188982	0,693375	0,210257
Перліт зони 3	0,359211	0,866025	0,188982
Перліт зони 4	0,188982	0,866025	0,202144

Аналізуючи взаємозв'язок між енерговкладенням та формуванням перліту можливо дійти висновку, що для лазерного та електронно-променевого зварювання по всім зонам зварного з'єднання, енерговкладення має прямий вплив

на відсотковий вміст перлітної складової. Це пояснюється перерозподілом дифузійних та теплових потоків, які створюють відповідні умови для фазових перетворень за дифузійним механізмом.

Для автоматичного зварювання під шаром флюсу тісного зв'язку між енерговкладенням та формуванням перлітної складовою не спостерігається. Отримані дані (дивись таблицю 4.4) свідчать про наявність слабкого зв'язку між параметрами які досліджуються.

Результати кореляційного аналізу взаємозв'язку між відсотковим вмістом структурних складових та геометричних розмірів зон зварного з'єднання після різних режимів зварювання представлено в таблиці А.2 Додатку А.

Аналіз даних показує, що існує прямий тісний зв'язок між геометричними розмірами зон зварного з'єднання та відповідними структурними складовими. Отримані кореляційні дані узгоджуються як за результатами теоретичних досліджень (дивись наприклад роботи [123, 124, 150, 152]), так із результатами проведеного комплексу відповідних металографічних досліджень (дивись розділ 3 даної роботи).

4.2. Застосування факторного аналізу для дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталі 09Г2С та різними режимами зварювання

Факторний аналіз було виконано з використанням модуля моделювання структурними рівняннями (SEPATH) програми STATSOFT STATISTICA 10.0 [136-138]. Проведення факторного аналізу для різних типів зварювання було здійснено в декілька етапів:

1. Дослідження структури взаємозв'язків змінних. У цьому випадку кожне групування змінних буде визначатися фактором, за яким ці змінні мають максимальні навантаження.
2. Ідентифікація факторів як прихованих (латентних) змінних - причин взаємозв'язку вихідних змінних.
3. Обчислення значень факторів для випробовуваних як нових, інтегральних змінних. При цьому число чинників істотно менше числа вихідних змінних.

У цьому сенсі факторний аналіз вирішує завдання скорочення кількості ознак з мінімальними втратами вихідної інформації [162].

Практична реалізація для різних типів зварювання здійснювалась за наступною методикою:

1. Була створена таблиця вхідних даних, яка складалася з 9 змінних та 48 спостережень;
2. На підставі таблиці вхідних даних було отримано кореляційну матрицю;
3. Для подальшого аналізу було обрано метод факторного аналізу, та метод виділення факторів;
4. Виконано відображення власних значень та відбір факторів;
5. Виконані факторні навантаження без обертання;
6. Здійснено обертання факторів для отримання спрощеної структури для подальшого дослідження;
7. Інтерпретація факторів та отримання діаграми обертання обраних факторів [139, 136, 137, 163].

На підставі даних розділу 3 пункту 3.4. було побудовано кореляційну матрицю співвідношення структурних складових зразків зі сталі 09Г2С для різних типів зварювання (таблиця 4.5.).

За даними таблиці 4.5 було зроблено виділення факторів за методом головних компонент. Даний метод перетворює набір корелюючих вихідних змінних в інший набір - некорелюючих змінних. В основі аналізу головних компонент лежить математичний метод знаходження власних значень і власних векторів кореляційної матриці [162].

Отримані дані зразків зі сталі 09Г2С для різних типів зварювання були узагальнені та надані у вигляді таблиці 4.6.

Аналіз даних в табл. 4.6 показує, що для лазерного зварювання власне значення для першого фактора становить 4,829835, тобто доля дисперсії першого фактора дорівнює 53,66484%, доля дисперсії другого фактора становить 24,25934%. Як бачимо, з подальшим отриманням факторів отримані власні

значення а також доля дисперсії зменшується. Сума всіх власних значень дорівнює кількості змінних.

Таблиця 4.5 – Кореляційна матриця співвідношення структурних складових зразків зі сталі 09Г2С для різних типів зварювання

Лазерне зварювання									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	-0,16	-0,55	0,51	-0,11	-0,42	-0,31	0,06	0,24
ЗТВ	-0,16	1,00	-0,46	-0,46	-0,09	-0,06	-0,81	-0,60	-0,77
Границя ЗТВ-основний метал	-0,55	-0,46	1,00	-0,02	0,58	0,83	0,88	0,78	0,67
Ферит 2	0,51	-0,46	-0,02	1,00	-0,16	-0,04	0,15	0,23	0,43
Ферит 3	-0,11	-0,09	0,58	-0,16	1,00	0,48	0,46	0,56	0,44
Ферит 4	-0,42	-0,06	0,83	-0,04	0,48	1,00	0,50	0,74	0,55
Перліт 2	-0,31	-0,81	0,88	0,15	0,46	0,50	1,00	0,77	0,78
Перліт 3	0,06	-0,60	0,78	0,23	0,56	0,74	0,77	1,00	0,96
Перліт 4	0,24	-0,77	0,67	0,43	0,44	0,55	0,78	0,96	1,00
Електронно-променеве зварювання									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	-0,33	0,45	0,05	-0,61	0,36	0,61	-0,66	0,03
ЗТВ	-0,33	1,00	-0,12	0,32	0,17	0,60	-0,53	0,59	-0,90

Продовження таблиці 4.5

Електронно-променеве зварювання									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Границя ЗТВ-основний метал	0,45	-0,12	1,00	-0,67	-0,91	-0,18	0,68	-0,31	0,20
Ферит 2	0,05	0,32	-0,67	1,00	0,43	0,77	-0,20	0,15	-0,49
Ферит 3	-0,61	0,17	-0,91	0,43	1,00	0,03	-0,83	0,20	-0,23
Ферит 4	0,36	0,60	-0,18	0,77	0,03	1,00	-0,10	0,00	-0,82
Перліт 2	0,61	-0,53	0,68	-0,20	-0,83	-0,10	1,00	-0,43	0,52
Перліт 3	-0,66	0,59	-0,31	0,15	0,20	0,00	-0,43	1,00	-0,26
Перліт 4	0,03	-0,90	0,20	-0,49	-0,23	-0,82	0,52	-0,26	1,00
Автоматичне зварювання під шаром флюсу									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	-0,05	0,27	0,38	-0,63	-0,33	-0,59	0,23	-0,14
ЗТВ	-0,05	1,00	-0,47	0,62	0,22	-0,11	0,02	-0,38	0,14
Границя ЗТВ-основний метал	0,27	-0,47	1,00	0,15	-0,48	-0,46	-0,08	-0,32	-0,02
Ферит 2	0,38	0,62	0,15	1,00	0,15	-0,78	-0,61	-0,61	-0,03
Ферит 3	-0,63	0,22	-0,48	0,15	1,00	-0,17	-0,22	-0,33	-0,08
Ферит 4	-0,33	-0,11	-0,46	-0,78	-0,17	1,00	0,62	0,40	-0,21
Перліт 2	-0,59	0,02	-0,08	-0,61	-0,22	0,62	1,00	0,22	0,45
Перліт 3	0,23	-0,38	-0,32	-0,61	-0,33	0,40	0,22	1,00	0,40
Перліт 4	-0,14	0,14	-0,02	-0,03	-0,08	-0,21	0,45	0,40	1,00

Таблиця 4.6 – Узагальнені власні значення зразків зі сталі 09Г2С для різних типів зварювання

Лазерне зварювання			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,829835	53,66484	53,6648
Фактор 2	2,183341	24,25934	77,9242
Фактор 3	0,955756	10,61951	88,5437
Фактор 4	0,654871	7,27634	95,8200
Фактор 5	0,376197	4,17997	100,0000
Електронно-променеве зварювання			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,179374	46,43749	46,4375
Фактор 2	2,390334	26,55926	72,9968
Фактор 3	1,524795	16,94216	89,9389
Фактор 4	0,703839	7,82043	97,7593
Фактор 5	0,201659	2,24066	100,0000
Автоматичне зварювання під шаром флюсу			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	3,117890	34,64323	34,6432
Фактор 2	2,218494	24,64993	59,2932
Фактор 3	1,412769	15,69743	74,9906
Фактор 4	1,284221	14,26913	89,2597
Фактор 5	0,966626	10,74029	100,0000

Групування факторів відбувалося таким чином, що в першу чергу вибиралися змінні які мали найбільшу кореляцію та найбільший відсоток загальної долі дисперсії, та формувалися в окремий фактор, після цього змінні, які були обрані у перший фактор були виключені із подальшого аналізу, таким чином, процес групування факторів продовжувався до тих пір, поки не була вилучена вся загальна доля дисперсії.

Групування факторів відбувалося наступним чином. В перший фактор було згруповано змінні, які найбільше взаємодіють між собою, та мають найбільше значення долі дисперсії, що дорівнює 53,66484. Із таблиці 4.5 ми бачимо, що найбільший взаємозв'язок було отримано між відсотковим змістом фериту по зонам зварного з'єднання.

Другий фактор отримуємо таким же чином, вибираючи найбільший взаємозв'язок між тими змінними, які залишилися після групування першого фактору, та мають більшу долю дисперсії, та дорівнює 24,25934. У даному факторі найбільшу взаємодію між собою має відсотковий вміст перліту по зонам зварного з'єднання.

У третьому факторі змінні, які мають найбільший взаємозв'язок між собою мають долю дисперсії 10,61951. Найбільший взаємозв'язок у даному факторі відбувається між геометричними розмірами зон зварного з'єднання.

У четвертому факторі згруповані наступні змінні – вплив відсоткового співвідношення в одній зоні на відсоткове співвідношення в іншій зоні, які мають найбільший взаємозв'язок із залишковими змінними, та мають долю дисперсії 7,27634.

У п'ятому факторі були згруповані всі залишкові змінні, які мають долю дисперсії дуже малу - 4,17997. У даному випадку до цих змінних відноситися взаємозв'язок змісту структурних складових через зону.

Таким чином, для зразків зі сталі 09Г2С для різних типів зварювання були отримані залежності факторів від змінних в наступному вигляді:

Фактор 1 = f (ферит 2 – зона II; ферит 3 – зона III; ферит 4 – зона IV).

Фактор 2 = f (перліт 2 – зона II; перліт 3 – зона III; перліт 4 – зона IV).

Фактор 3 = f (зона I – зона II; зона II- зона III; зона III – зона IV).

Фактор 4 = f (ферит 2 – ферит 3; ферит 3 – ферит 4; перліт 2 – перліт 3; перліт 3 – перліт 4).

Фактор 5 = f (ферит 2 – зона III; ферит 3 – зона IV; перліт 2 – зона III; перліт 3 – зона IV).

Таким чином, всі досліджувальні змінні було згруповано в 5 факторів.

При аналізі в один фактор об'єднуються сильно корелюючі між собою змінні, як наслідок відбувається перерозподіл дисперсії між компонентами і виходить максимально проста і наочна структура факторів. Після об'єднання корельованість компонент всередині кожного фактора між собою буде вище, ніж їх корельованість з компонентами з інших чинників [164].

В процесі компонентного аналізу вирішували рівняння (4.2) [162]:

$$R=AA', \quad (4.2)$$

де R - вихідна матриця кореляцій; A - матриця, кожен елемент якої a_{ik} - компонентне навантаження змінної i (рядок) по компоненті k (стовпець); A' транспонована матриця A . Рівняння (1) Л. Терстоун назвав «фундаментальної факторної теоремою» (Г. Харман, 1972) [162]. Результатом вирішення цього рівняння є матриця компонентних навантажень A . Рішення рівняння (4.2) дозволяє отримати матрицю компонентних навантажень.

Електронно-променево зварювання. Власне значення для першого фактора становить 4,179374, тобто доля дисперсії першого фактора дорівнює 46,43749%, доля дисперсії другого фактора становить 26,55926%. Як бачимо, з подальшим отриманням факторів отримані власні значення а також доля дисперсії зменшується. Сума всіх власних значень дорівнює кількості змінних.

В перший фактор було згруповано змінні, які найбільше взаємодіють між собою, та мають найбільше значення долі дисперсії, що дорівнює 46,43749.

Другий фактор отримуємо аналогічно з долею дисперсії, 26,55926. У даному факторі найбільшу взаємодію між собою має відсотковий вміст перліту по зонам зварного з'єднання.

У третьому факторі змінні, які мають найбільший взаємозв'язок між собою мають долю дисперсії 16,94216. Найбільший взаємозв'язок у даному факторі відбувається між геометричними розмірами зварного з'єднання.

У четвертому факторі згруповано - вплив відсоткового співвідношення в одній зоні на відсоткове співвідношення в іншій зоні, які мають долю дисперсії 7,82043.

У п'ятий фактор були згруповані всі залишкові змінні, які мають долю дисперсії - 2,24066. У даному випадку до цих змінних відноситися взаємозв'язок змісту структурних складових через зону.

Автоматичне зварювання під шаром флюсу. Власне значення для першого фактора становить 3,117890, тобто доля дисперсії першого фактора дорівнює 34,64323%, доля дисперсії другого фактора становить 24,64993%.

Аналогічно, в перший фактор згруповано змінні, які мають найбільше значення долі дисперсії, 34,64323.

Другий фактор - змінні, які мають долю дисперсії, 24,64993.

У третьому факторі змінні, які мають долю дисперсії 15,69743.

У четвертому факторі згруповані змінні - це вплив відсоткового співвідношення в одній зоні на відсоткове співвідношення в іншій зоні, які мають найбільший взаємозв'язок із залишковими змінними, та мають долю дисперсії 14,26913.

У п'ятий фактор були згруповані всі залишкові змінні, які мають долю дисперсії - 10,74029.

Побудовані факторні навантаження без обертання факторів для різних типів зварювання приведено в таблиці Б.1 Додатку Б.

Скорочення факторів здійснювали з застосуванням Критерію Кайзера Даний критерій заснований на тому, що обирати слід ті фактори, у яких власні значення будуть не менше 1. Р. Кеттел запропонував свій критерій «Критерій кам'янистої осипі» [136-138], який засновано на пошуку такої точки на графіку, де кількість власних значень помітно зменшується (графік власних значень) [165, 166, 167].

Розглянемо шукану факторну структуру в загальному вигляді, як матрицю факторних завантажень. Елементи структури чинника - факторні навантаження (Factor Loadings) змінних a_{ik} аналогічні компонентним навантажень. Однак основна вимога їх отримання, на відміну від аналізу головних компонент, - максимально повне відображення вихідних коефіцієнтів кореляції. Тому основне рівняння факторного аналізу залишається у наступному вигляді [162]:

$$R' = A \cdot A' \text{ за умовою } R' \rightarrow R \quad (4.3)$$

де R - вихідна матриця інтеркореляцій; R' - матриця відновлених коефіцієнтів кореляції; A - матриця факторних навантажень розмірністю, стовпці якої - факторні навантаження P змінних по M факторам; A' - транспонована матриця A . Відмінність рівняння (4.3) від схожого з ним рівняння компонентного аналізу (4.2) в тому, що матриця факторних навантажень A обчислюється таким чином, щоб відновлені коефіцієнти кореляції мінімально відрізнялися від вихідних кореляцій.

У випадку зварювання лазером, при виборі кількості факторів, було звернено увагу на навантаження кожного фактору стосовно змінних, як бачимо із таблиці 3, що перший фактор зі значенням навантаження факторів 0,7 має значні навантаження для п'яти змінних - Границя ЗТВ - основний метал; ферит 4; перліт 2; перліт 3; перліт 4. Другий фактор має значні навантаження для двох змінних - Границя зварний шов - ЗТВ; ферит 2. Третій, четвертий та п'ятий фактор взагалі не має ні одного навантаження на змінні зі значенням навантаження факторів 0,7.

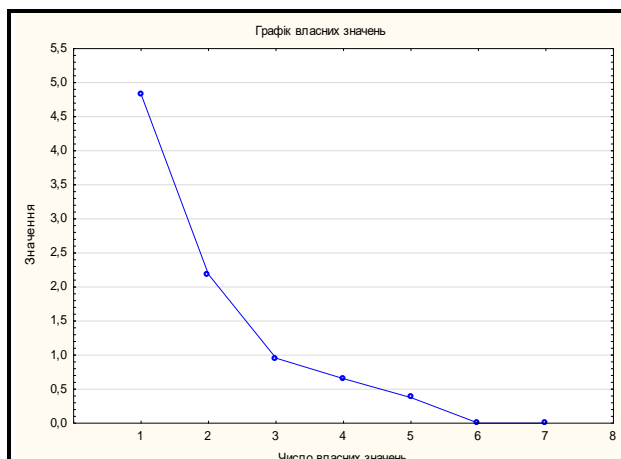
Виходячи з цього, після інтерпретації факторів для подальшого дослідження було залишено два фактори, які мають значні навантаження на змінні. Перший фактор має 53,6% загальної дисперсії, другий фактор - 24,2% загальної дисперсії загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 77,8% від всієї загальної дисперсії.

Для випадку електронно-променевого зварювання бачимо, що перший фактор зі значенням навантаження факторів 0,7 має значні навантаження для п'яти змінних - ЗТВ; Границя ЗТВ - основний метал; ферит 3; перліт 2; перліт 4. Другий фактор має значні навантаження для двох змінних - Границя зварний шов - ЗТВ; ферит 4. Третій, четвертий та п'ятий фактор взагалі не має ні одного навантаження на змінні зі значенням навантаження факторів 0,7.

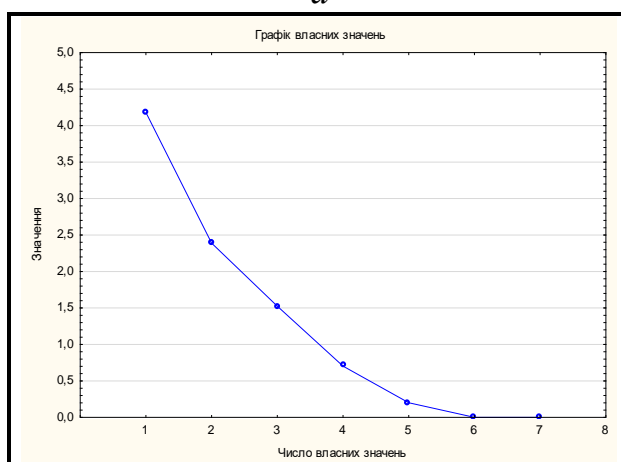
Виходячи з цього, після інтерпретації факторів для подальшого дослідження було залишено два фактори, які мають значні навантаження на змінні. перший фактор має 38,7% загальної дисперсії, другий фактор - 34,2% загальної дисперсії

загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 72,9% від всієї загальної дисперсії.

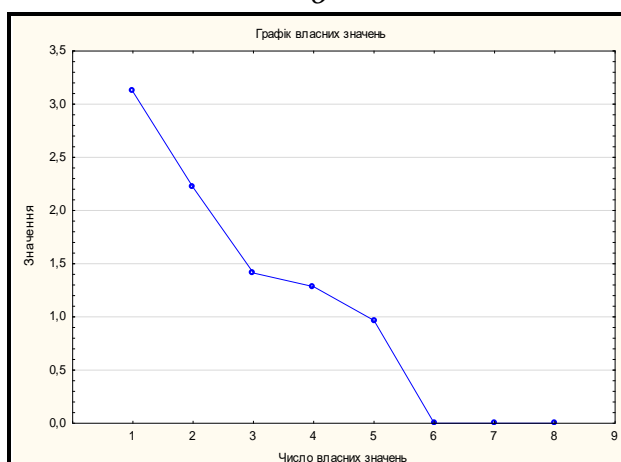
Графічну інтерпретацію отриманих даних таблиці Б.1 наведено на рисунку 4.1.



а



б



в

Рисунок 4.1 – Графік власних значень: *а* – лазерне зварювання; *б* – електронно-променевого зварювання; *в* – автоматичне зварювання під шаром флюсу

Геометрична інтерпретація даних таблиці Б.2 наведено на рисунку 4.2, 4.3.

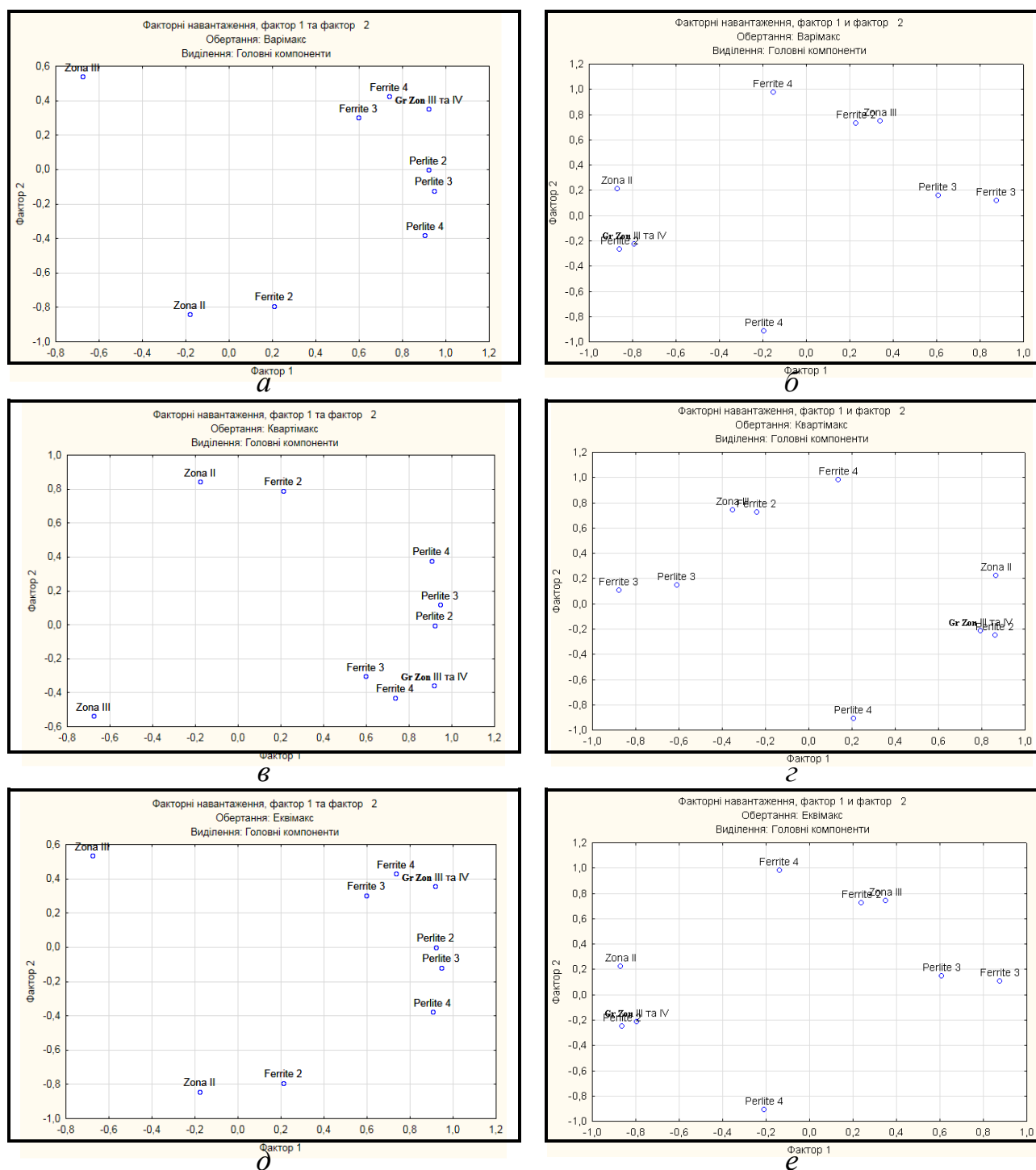


Рисунок 4.2 – Діаграма обертання двох факторів для сталі 09Г2С: *a* – метод варімакс для лазерного зварювання; *б* – метод варімакс для електронно-променевого зварювання; *в* – метод квартімакс для лазерного зварювання; *г* – метод квартімакс для електронно-променевого зварювання; *д* – метод еквімакс для лазерного зварювання; *е* – метод еквімакс для електронно-променевого зварювання.

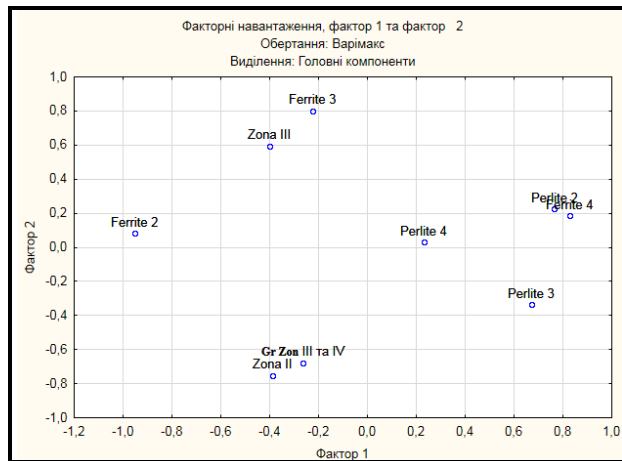
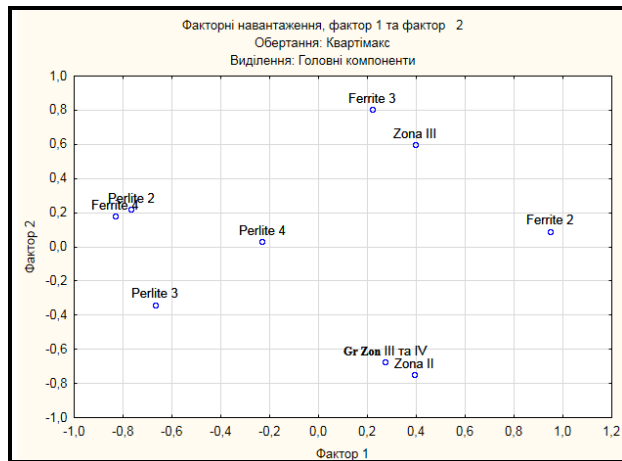
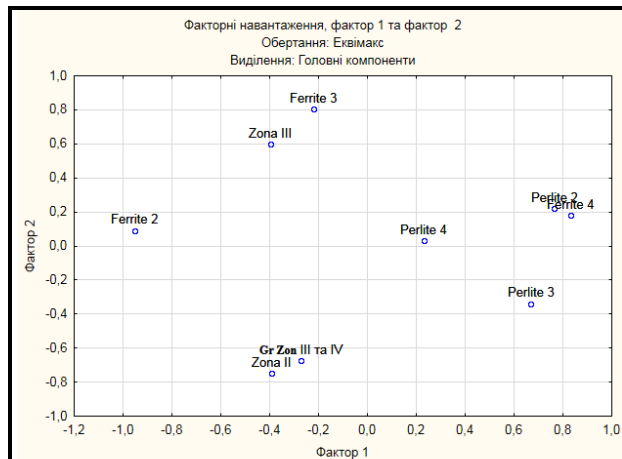
*a**б**в*

Рисунок 4.3 – Діаграма обертання двох факторів для автоматичного зварювання під шаром флюсу: *a* – метод варімакс; *б* – метод квартімакс; *в* – метод еквімакс

Для випадку автоматичного зварювання під шаром флюсу перший фактор зі значенням навантаження факторів 0,7 має значні навантаження для трьох змінних - ферит 2; ферит 4; перліт 2. Другий фактор має значні навантаження для двох

змінних - Границя зварний шов - ЗТВ; ферит 3. Третій фактор має значні навантаження для однієї змінної - перліт 4. Четвертий та п'ятий фактор взагалі не має ні одного навантаження на змінні зі значенням навантаження факторів 0,7.

Аналогічно для подальшого дослідження було залишено два фактори, які мають значні навантаження на змінні. 1 фактор має 34,5% загальної дисперсії, 2 фактор - 24,7% загальної дисперсії загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 59,2% від всієї загальної дисперсії.

Результати приведенного комплексу розрахунків згруповані та приведені у таблиці Б.2 Додатку Б.

Для геометричної інтерпретації результатів факторного аналізу було здійснено обертання вибраних факторів, які дають можливість виявити взаємозв'язок між змінними та двома обраними факторами. Обертання здійснювалося за трьома методами, а саме: метод варімакс, метод кватрімакс та метод еквімакс [136-138].

Анализ даних, наведених рисунків 4.2, 4.3 показує, що взаємне розташування змінних і факторів свідчить про те, що виділені фактори 1 і 2 є пов'язаними з усіма вихідними змінними, тобто є найбільш загальними для досліджуваного процесу. Таким чином, в результаті проведеного комплексу досліджень встановлено, що найбільш значущими змінними при аналізі структурного стану зварних з'єднань після різних режимів зварювання є відсотковий розподіл феритної та перлітної структурної складової по зонам зварного з'єднання. Саме ці параметри необхідно використовувати для побудови математичної моделі якості зварного з'єднання.

4.3. Застосування факторного аналізу для дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталі 10ХСНД та різними режимами зварювання

Аналогічно пункту 4.2 розділу 4 було побудовано кореляційну матрицю співвідношення структурних складових зразків зі сталі 10ХСНД для різних типів зварювання (таблиця 4.7):

Таблиця 4.7 – Кореляційна матриця співвідношення структурних складових зразків зі сталі 10ХСНД для різних типів зварювання

Лазерне зварювання									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	0,51	0,74	-0,81	-0,41	0,00	-0,49	-0,61	-0,69
ЗТВ	0,51	1,00	0,28	-0,24	-0,76	-0,69	0,17	-0,68	-0,54
Границя ЗТВ-основний метал	0,74	0,28	1,00	-0,97	0,03	0,47	-0,26	-0,71	-0,51
Ферит 2	-0,81	-0,24	-0,97	1,00	-0,09	-0,49	0,36	0,66	0,50
Ферит 3	-0,41	-0,76	0,03	-0,09	1,00	0,82	-0,09	0,21	0,39
Ферит 4	0,00	-0,69	0,47	-0,49	0,82	1,00	-0,34	0,01	0,09
Перліт 2	-0,49	0,17	-0,26	0,36	-0,09	-0,34	1,00	0,29	0,68
Перліт 3	-0,61	-0,68	-0,71	0,66	0,21	0,01	0,29	1,00	0,82
Перліт 4	-0,69	-0,54	-0,51	0,50	0,39	0,09	0,68	0,82	1,00
Електронно-променеве зварювання									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	-0,72	-0,25	0,03	-0,03	0,51	-0,39	0,23	0,67
ЗТВ	-0,72	1,00	0,54	0,08	0,17	-0,24	0,61	0,39	-0,67
Границя ЗТВ-основний метал	-0,25	0,54	1,00	-0,67	-0,67	-0,51	-0,30	-0,09	-0,62

Продовження таблиці 4.7

Електронно-променеве зварювання									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Ферит 2	0,03	0,08	-0,67	1,00	0,97	0,77	0,78	0,62	0,50
Ферит 3	-0,03	0,17	-0,67	0,97	1,00	0,65	0,86	0,68	0,34
Ферит 4	0,51	-0,24	-0,51	0,77	0,65	1,00	0,40	0,63	0,86
Перліт 2	-0,39	0,61	-0,30	0,78	0,86	0,40	1,00	0,73	-0,03
Перліт 3	0,23	0,39	-0,09	0,62	0,68	0,63	0,73	1,00	0,21
Перліт 4	0,67	-0,67	-0,62	0,50	0,34	0,86	-0,03	0,21	1,00
Автоматичне зварювання під шаром флюсу									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	-0,84	-0,12	0,39	0,45	-0,34	0,59	0,66	0,70
ЗТВ	-0,84	1,00	0,63	-0,55	-0,21	-0,01	-0,76	-0,82	-0,79
Границя ЗТВ-основний метал	-0,12	0,63	1,00	-0,60	0,23	-0,51	-0,47	-0,56	-0,33
Ферит 2	0,39	-0,55	-0,60	1,00	0,14	-0,12	0,17	0,40	-0,02
Ферит 3	0,45	-0,21	0,23	0,14	1,00	-0,33	0,57	0,53	0,40
Ферит 4	-0,34	-0,01	-0,51	-0,12	-0,33	1,00	0,14	0,30	0,12
Перліт 2	0,59	-0,76	-0,47	0,17	0,57	0,14	1,00	0,91	0,92
Перліт 3	0,66	-0,82	-0,56	0,40	0,53	0,30	0,91	1,00	0,82
Перліт 4	0,70	-0,79	-0,33	-0,02	0,40	0,12	0,92	0,82	1,00

За даними таблиці 4.7 було зроблено виділення факторів за методом головних компонент, які наведено в таблиці 4.8.

Лазерне зварювання. Аналіз даних таблиці 4.8 показує, що власне значення для першого фактора становить 4,438056, доля дисперсії - 49,31173%, доля дисперсії другого фактора - 30,77492%.

Дисперсія змінних по факторам дорівнює:

Перший фактор - 49,31173.

Другий фактор - 30,77492.

Третій фактор - 12,09309.

Четвертий фактор - 6,26527.

П'ятий фактор - 1,55498.

Таблиця 4.8 – Узагальнені власні значення зразків зі сталі 10ХСНД для різних типів зварювання

Лазерне зварювання			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,438056	49,31173	49,3117
Фактор 2	2,769743	30,77492	80,0867
Фактор 3	1,088379	12,09309	92,1797
Фактор 4	0,563874	6,26527	98,4450
Фактор 5	0,139948	1,55498	100,0000
Електронно-променеве зварювання			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,546941	50,52157	50,5216
Фактор 2	2,973983	33,04426	83,5658
Фактор 3	1,058407	11,76008	95,3259
Фактор 4	0,344187	3,82430	99,1502
Фактор 5	0,076481	0,84979	100,0000
Автоматичне зварювання під шаром флюсу			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,787475	53,19417	53,1942
Фактор 2	1,900976	21,12196	74,3161
Фактор 3	1,330826	14,78696	89,1031
Фактор 4	0,709690	7,88544	96,9885
Фактор 5	0,271033	3,01147	100,0000

Електронно-промене́ве зварювання. З таблиці 4.8 бачимо, що власне значення для першого фактора дорівнює 4,546941, доля дисперсії становить 50,52157%, доля дисперсії другого фактора - 33,04426%.

Дисперсія змінних по факторам дорівнює:

Перший фактор – 50,52157.

Другий фактор – 33,04426.

Третій фактор – 11,76008.

Четвертий фактор – 3,82430.

П'ятий фактор – 0,84979.

Автоматичне зварювання під шаром флюсу. Виходячи з таблиці 4.8, власне значення для першого фактора - 4,787475, доля дисперсії - 53,19417%, доля дисперсії для другого фактора - 21,12196%.

Дисперсія змінних по факторам дорівнює:

Перший фактор – 53,19417.

Другий фактор – 21,12196.

Третій фактор – 14,78696.

Четвертий фактор – 7,88544.

П'ятий фактор – 3,01147.

Побудовані факторні навантаження без обертання факторів для різних типів зварювання приведено в таблиці Б.3 Додатку Б.

Графічну інтерпретацію даних таблиці Б.3 наведено на рисунку 4.4.

Результати відповідних розрахунків згруповано та приведено у таблиці Б.4 Додатку Б.

Геометрична інтерпретація даних таблиці Б.4 наведено на рисунках 4.5, 4.6.

Лазерне зварювання. Після інтерпретації факторів для подальшого дослідження було залишено два фактори, які мають значні навантаження на змінні. 1 фактор має 48,1% загальної дисперсії, 2 фактор – 31,9% загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 80% від всієї загальної дисперсії.

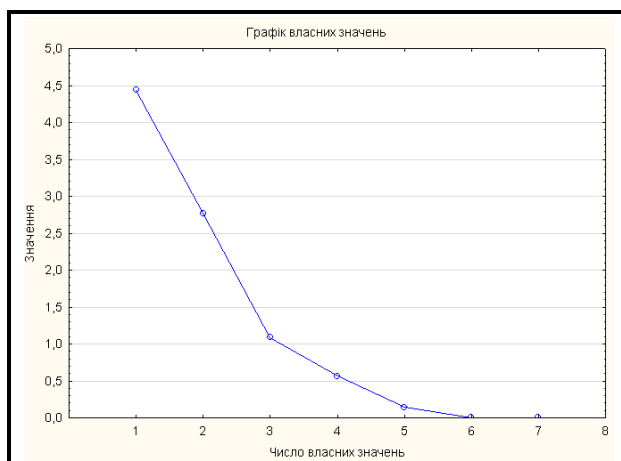
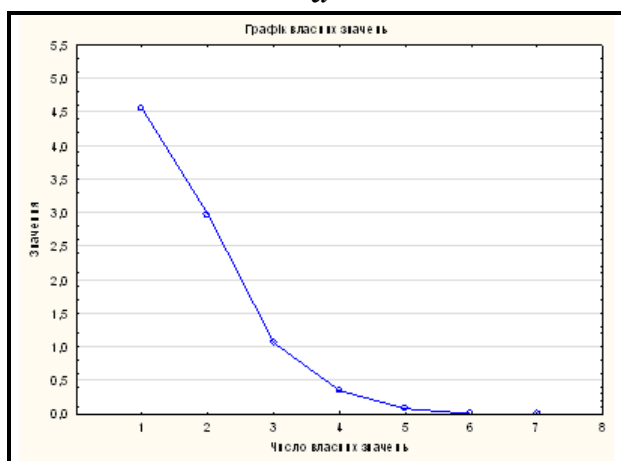
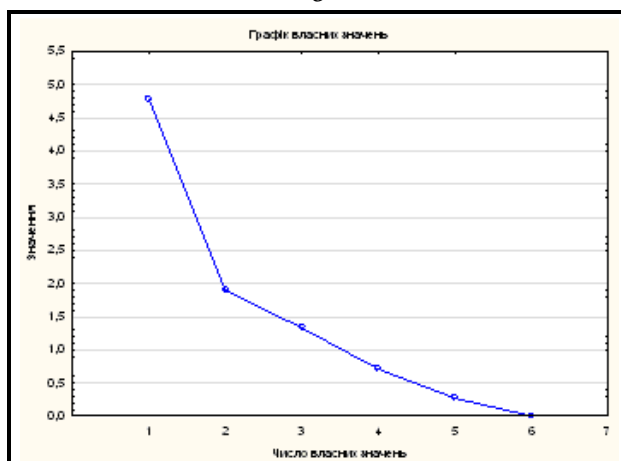
*a**б**в*

Рисунок 4.4 – Графік власних значень: *a* – лазерне зварювання; *б* - електронно-променеве зварювання; *в* - автоматичне зварювання під шаром флюсу.

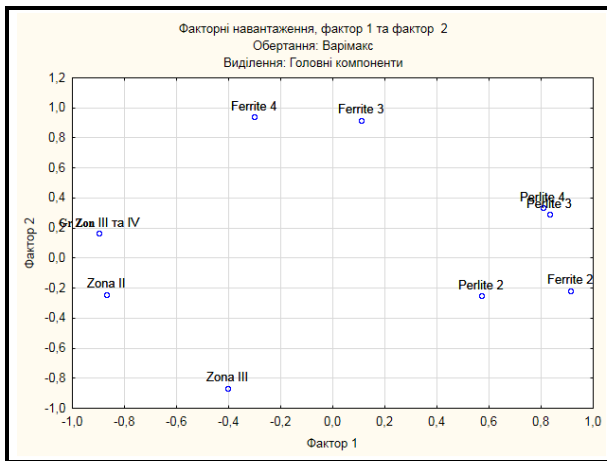
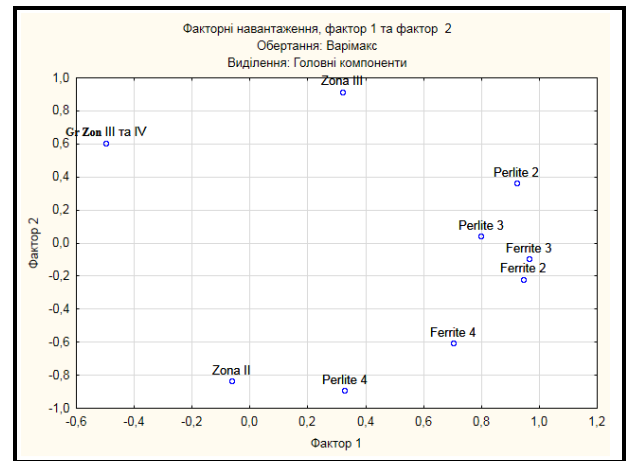
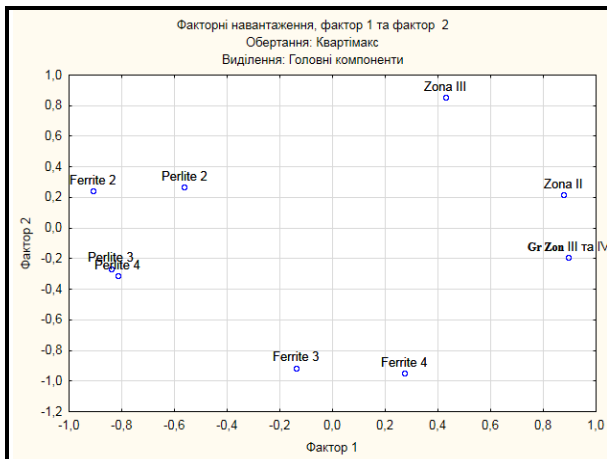
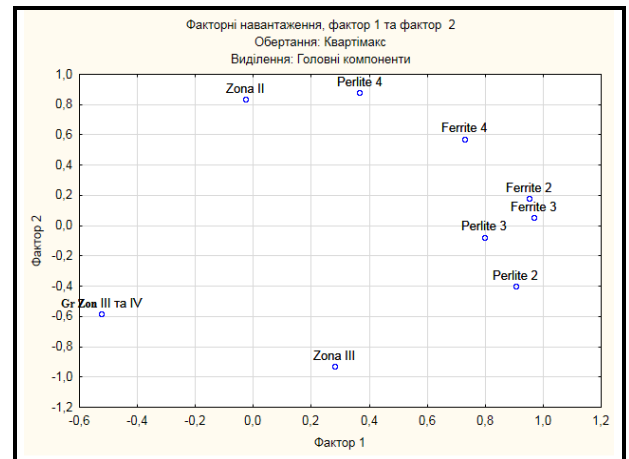
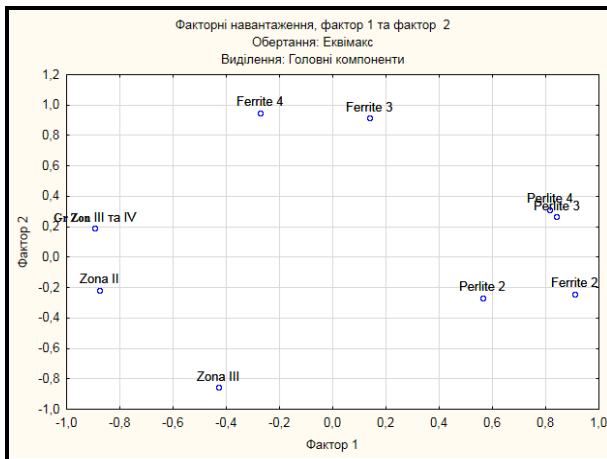
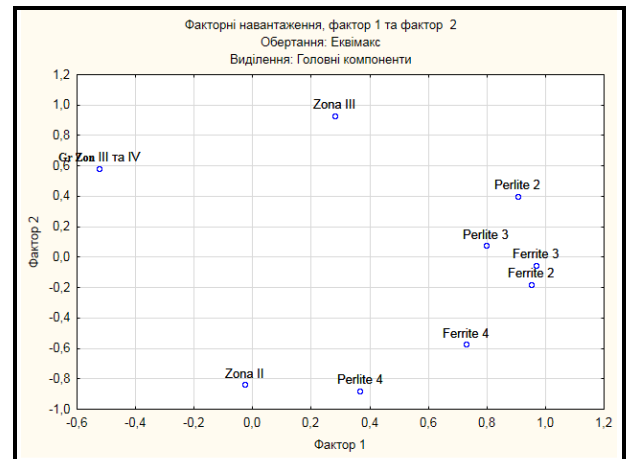
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 4.5 – Діаграма обертання двох факторів для сталі 10ХСНД:
a – метод варімакс для лазерного зварювання; *б* – метод варімакс для електронно-променевого зварювання; *в* – метод квартімакс для лазерного зварювання; *г* – метод квартімакс для електронно-променевого зварювання; *д* – метод еквімакс для лазерного зварювання; *е* – метод еквімакс для електронно-променевого зварювання.

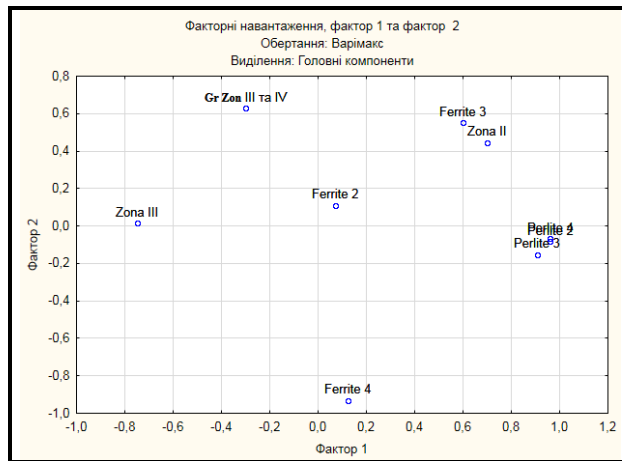
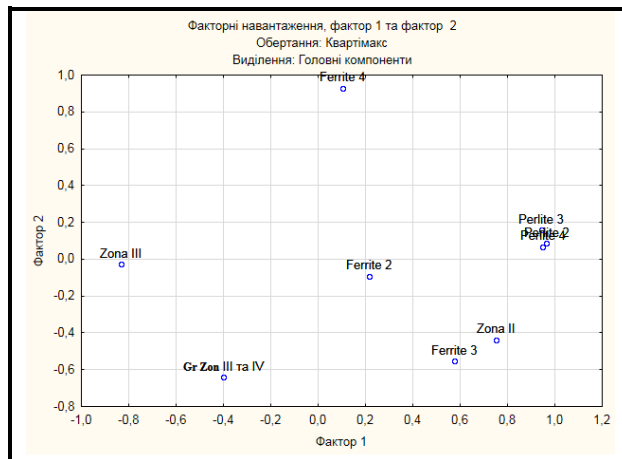
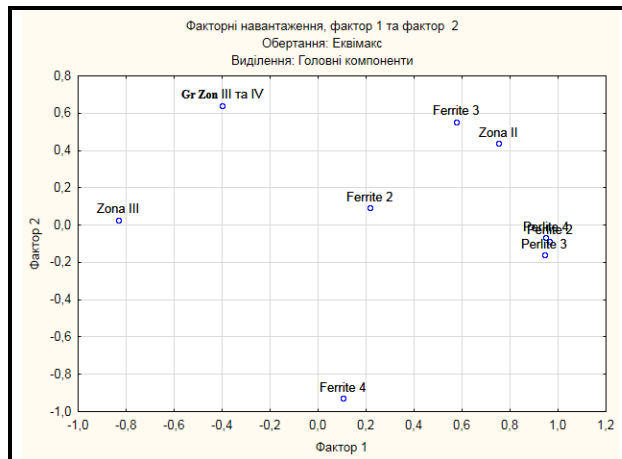
*a**б**в*

Рисунок 4.6 – Діаграма обертання двох факторів для автоматичного зварювання під шаром флюсу: *a* – метод варімакс; *б* – метод квартімакс; *в* – метод еквімакс

Електронно-променеве зварювання. Для подальшого дослідження було залишено два фактори, які мають значні навантаження на змінні. 1 фактор має 47,3% загальної дисперсії, 2 фактор – 36,1% загальної дисперсії загальної

дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 83,4% від всієї загальної дисперсії.

Автоматичне зварювання під шаром флюсу. Після інтерпретації факторів було залишено два фактори, які мають значні навантаження на змінні. 1 фактор має 46,3% загальної дисперсії, 2 фактор – 20,1% загальної дисперсії загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 66,4% від всієї загальної дисперсії.

4.4. Застосування факторного аналізу для дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталі 10Г2ФБ та різними режимами зварювання

Була створена таблиця вхідних даних, яка складалася з 10 змінних та 48 спостережень.

Аналогічно пунктам 4.2 та 4.3 даного розділу побудовано кореляційну матрицю співвідношення структурних складових зразків зі сталі 10Г2ФБ для різних типів зварювання (таблиця 4.9):

Таблиця 4.9 – Кореляційна матриця співвідношення структурних складових зразків зі сталі 10Г2ФБ для різних типів зварювання

Лазерне зварювання										
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4	Бейніт 4
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	0,28	0,08	-0,69	-0,42	-0,73	-0,64	-0,96	-0,47	-0,31
ЗТВ	0,28	1,00	0,28	-0,78	-0,46	-0,34	-0,10	-0,45	-0,03	-0,10
Границя ЗТВ-основний метал	0,08	0,28	1,00	0,10	0,19	0,22	-0,21	-0,31	0,65	-0,29

Продовження таблиці 4.9

Лазерне зварювання										
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4	Бейніт 4
Ферит 2	-0,69	-0,78	0,10	1,00	0,48	0,59	0,20	0,71	0,38	0,32
Ферит 3	-0,42	-0,46	0,19	0,48	1,00	0,73	0,47	0,45	0,79	-0,61
Ферит 4	-0,73	-0,34	0,22	0,59	0,73	1,00	0,82	0,67	0,80	-0,30
Перліт 2	-0,64	-0,10	-0,21	0,20	0,47	0,82	1,00	0,65	0,48	-0,27
Перліт 3	-0,96	-0,45	-0,31	0,71	0,45	0,67	0,65	1,00	0,33	0,31
Перліт 4	-0,47	-0,03	0,65	0,38	0,79	0,80	0,48	0,33	1,00	-0,53
Бейніт 4	-0,31	-0,10	-0,29	0,32	-0,61	-0,30	-0,27	0,31	-0,53	1,00
Електронно-променеве зварювання										
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4	
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	-0,15	0,96	-0,47	-0,24	0,13	-0,49	-0,37	-0,22	
ЗТВ	-0,15	1,00	-0,02	-0,73	-0,53	-0,72	-0,45	0,12	-0,16	
Границя ЗТВ-основний метал	0,96	-0,02	1,00	-0,61	-0,37	-0,10	-0,49	-0,29	-0,17	
Ферит 2	-0,47	-0,73	-0,61	1,00	0,67	0,72	0,61	0,01	0,10	
Ферит 3	-0,24	-0,53	-0,37	0,67	1,00	0,71	0,83	0,56	0,65	
Ферит 4	0,13	-0,72	-0,10	0,72	0,71	1,00	0,29	-0,18	-0,01	
Перліт 2	-0,49	-0,45	-0,49	0,61	0,83	0,29	1,00	0,78	0,83	
Перліт 3	-0,37	0,12	-0,29	0,01	0,56	-0,18	0,78	1,00	0,94	
Перліт 4	-0,22	-0,16	-0,17	0,10	0,65	-0,01	0,83	0,94	1,00	
Автоматичне зварювання під шаром флюсу										
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4	
Границя зварний шов – ЗТВ	1,00	-0,43	0,66	-0,53	-0,61	-0,37	0,26	0,54	0,31	

Автоматичне зварювання під шаром флюсу									
	Границя зварний шов – ЗТВ	ЗТВ	Границя ЗТВ-основний метал	Ферит 2	Ферит 3	Ферит 4	Перліт 2	Перліт 3	Перліт 4
ЗТВ	-0,43	1,00	-0,08	0,03	0,06	-0,15	-0,51	-0,15	0,39
Границя ЗТВ-основний метал	0,66	-0,08	1,00	-0,83	-0,84	-0,84	-0,48	0,80	0,48
Ферит 2	-0,53	0,03	-0,83	1,00	0,63	0,97	0,35	-0,38	-0,20
Ферит 3	-0,61	0,06	-0,84	0,63	1,00	0,67	0,56	-0,56	-0,15
Ферит 4	-0,37	-0,15	-0,84	0,97	0,67	1,00	0,57	-0,41	-0,26
Перліт 2	0,26	-0,51	-0,48	0,35	0,56	0,57	1,00	-0,32	-0,16
Перліт 3	0,54	-0,15	0,80	-0,38	-0,56	-0,41	-0,32	1,00	0,72
Перліт 4	0,31	0,39	0,48	-0,20	-0,15	-0,26	-0,16	0,72	1,00

Дані зразків зі сталі 10Г2ФБ для різних типів зварювання надані у вигляді таблиці 4.10.

Лазерне зварювання. Виходячи з таблиці 4.10 бачимо, що власне значення для першого фактора буде дорівнювати 4,843798, доля дисперсії даного фактора становить 48,43798%, доля дисперсії другого фактора - 24,90927%.

Дисперсія змінних по факторам дорівнює:

Перший фактор – 48,43798.

Другий фактор – 24,90927.

Третій фактор – 12,83459.

Четвертий фактор – 11,14390.

П'ятий фактор – 2,67426.

Були отримані наступні залежності факторів від змінних:

Фактор 1 = f (ферит 2 – зона II; ферит 3 – зона III; ферит 4 – зона IV).

Фактор 2 = f (перліт 2 – зона II; перліт 3 – зона III; перліт 4 – зона IV; перліт 4 – бейніт 4; ферит 4 – бейніт 4).

Фактор 3 = f (зона I – зона II; зона II – зона III; зона III – зона IV).

Фактор 4 = f (ферит 2 – ферит 3; ферит 3 – ферит 4; перліт 2 – перліт 3; перліт 3 – перліт 4; перліт 3 – бейніт 4; ферит 3 – бейніт 4).

Фактор 5 = f (ферит 2 – зона III; ферит 3 – зона IV; перліт 2 – зона III; перліт 3 – зона IV; ферит 2 – бейніт 4; перліт 2 – бейніт 4).

Таблиця 4.10 – Узагальнені власні значення зразків зі сталі 10Г2ФБ для різних типів зварювання

Лазерне зварювання			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,843798	48,43798	48,4380
Фактор 2	2,490927	24,90927	73,3472
Фактор 3	1,283459	12,83459	86,1818
Фактор 4	1,114390	11,14390	97,3257
Фактор 5	0,267426	2,67426	100,0000
Електронно-променеве зварювання			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,419991	49,11101	49,1110
Фактор 2	2,400740	26,67489	75,7859
Фактор 3	1,714751	19,05279	94,8387
Фактор 4	0,405599	4,50666	99,3453
Фактор 5	0,058919	0,65465	100,0000
Автоматичне зварювання під шаром флюсу			
	Власні значення	Відсоток загальної дисперсії	Кумулятивність, %
Фактор 1	4,681881	52,02090	52,0209
Фактор 2	1,893643	21,04048	73,0614
Фактор 3	1,331335	14,79261	87,8540
Фактор 4	0,695146	7,72385	95,5778
Фактор 5	0,397995	4,42216	100,0000

Електронно-променеве зварювання. Виходячи із таблиці 4.10 зазначимо, що власне значення першого фактора дорівнює 4,419991, доля дисперсії першого фактора дорівнює 49,11101%, доля дисперсії для другого фактора - 26,67489%.

Дисперсія змінних по факторам дорівнює:

Перший фактор – 49,11101.

Другий фактор – 26,67489.

Третій фактор – 19,05279.

Четвертий фактор – 4,50666.

П'ятий фактор – 0,65465.

Автоматичне зварювання під шаром флюсу. Аналізуючи таблицю 4.10, зазначимо, що власне значення першого фактора - 4,681881, доля дисперсії дорівнює 52,02090%, доля дисперсії другого фактора - 21,04048%.

Дисперсія змінних по факторам дорівнює:

Перший фактор – 52,02090.

Другий фактор – 21,04048.

Третій фактор – 14,79261.

Четвертий фактор – 7,72385.

П'ятий фактор – 4,42216.

Побудовані факторні навантаження без обертання факторів представлено у таблиці Б.5 Додатку Б.

Графічну інтерпретацію даних таблиці Б.5 наведено на рисунку 4.7.

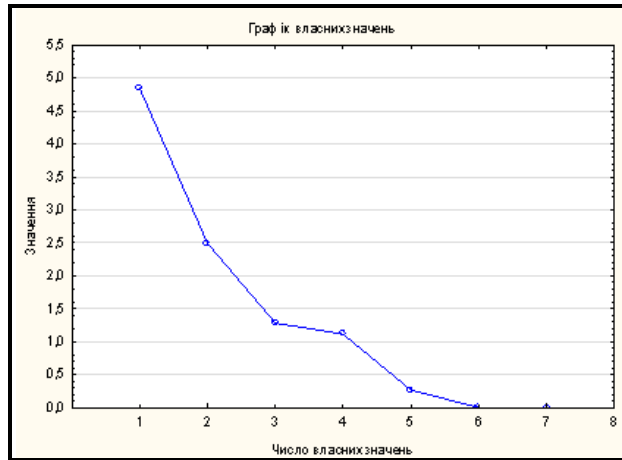
Лазерне зварювання. Після інтерпретації факторів зазначимо, що перший фактор має 41,2% загальної дисперсії, другий фактор – 32% загальної дисперсії загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 73,2% від всієї загальної дисперсії.

Електронно-променеве зварювання. Для подальшого дослідження було залишено два фактори, а саме: перший фактор, що має 40,6% загальної дисперсії та другий фактор, що має 35,1% загальної дисперсії загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 75,7% від всієї загальної дисперсії.

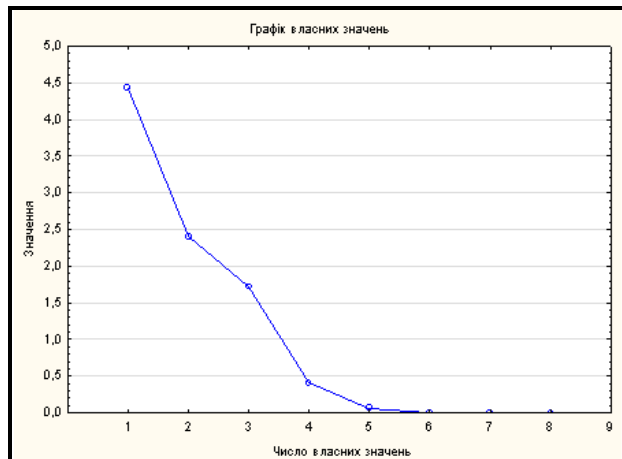
Автоматичне зварювання під шаром флюсу. Для подальшого дослідження було залишено два фактори. Перший фактор має 43,7% загальної дисперсії, 2 фактор – 21,1% загальної дисперсії загальної дисперсії, в результаті чого, два обраних фактора пояснюють 64,8% від всієї загальної дисперсії.

Результати відповідних розрахунків наведено у таблиці Б.6 Додатку Б.

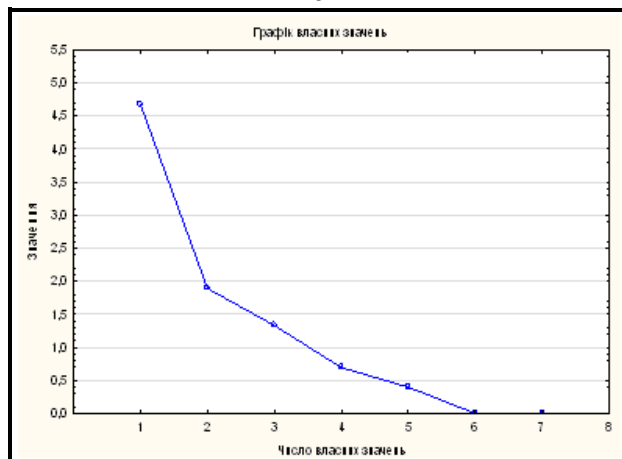
Геометрична інтерпретація даних таблиці Б.6 наведено на рисунках 4.8., 4.9.



а



б



в

Рисунок 4.7 – Графік власних значень: *а* – лазерне зварювання; *б* – електронно-променевого зварювання; *в* – автоматичне зварювання під шаром флюсу.

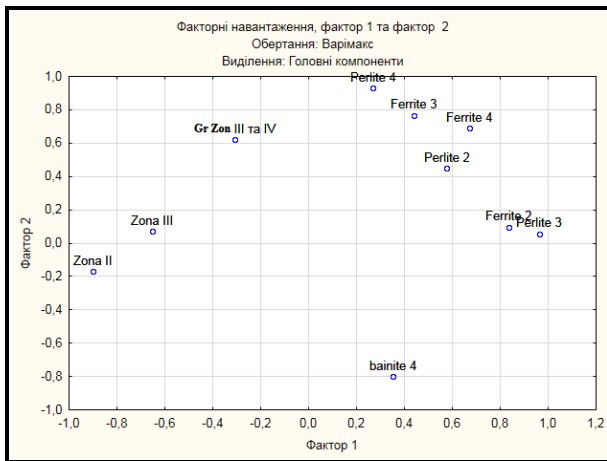
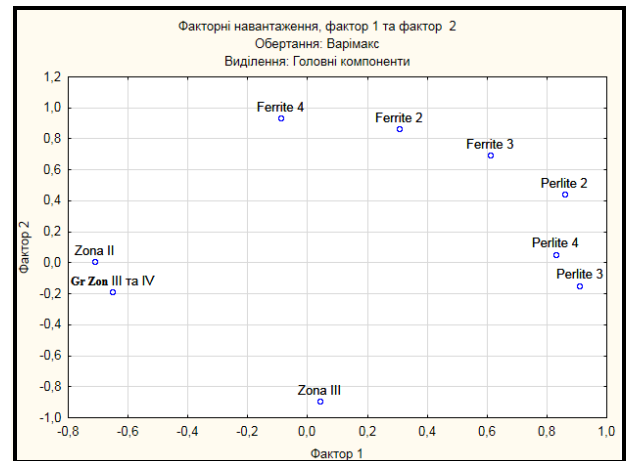
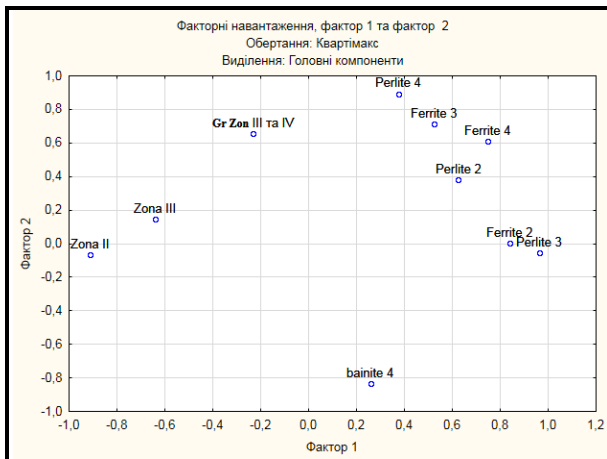
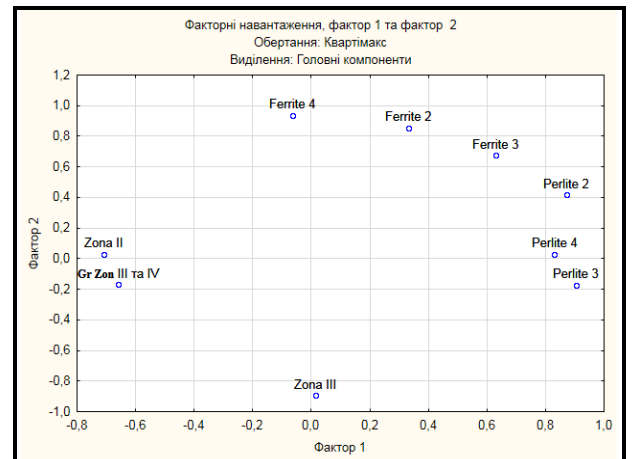
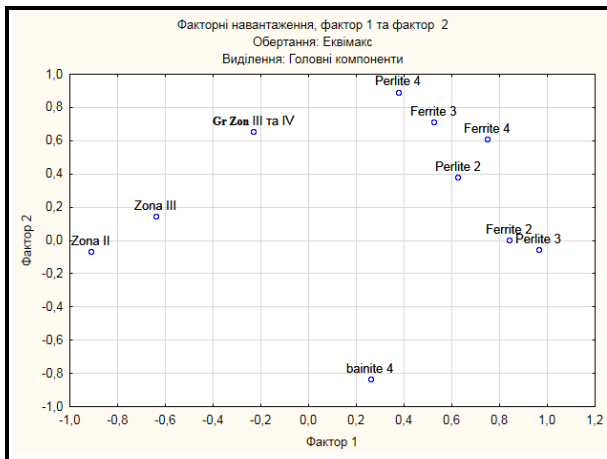
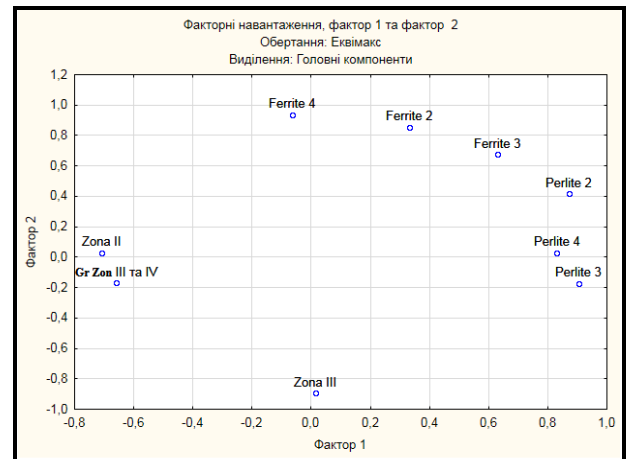
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 4.8 – Діаграма обертання двох факторів для сталі 10Г2ФБ:
a – метод варімакс для лазерного зварювання; *б* – метод варімакс для електронно-променевого зварювання; *в* – метод квартімакс для лазерного зварювання; *г* – метод квартімакс для електронно-променевого зварювання; *д* – метод еквімакс для лазерного зварювання; *е* – метод еквімакс для електронно-променевого зварювання.

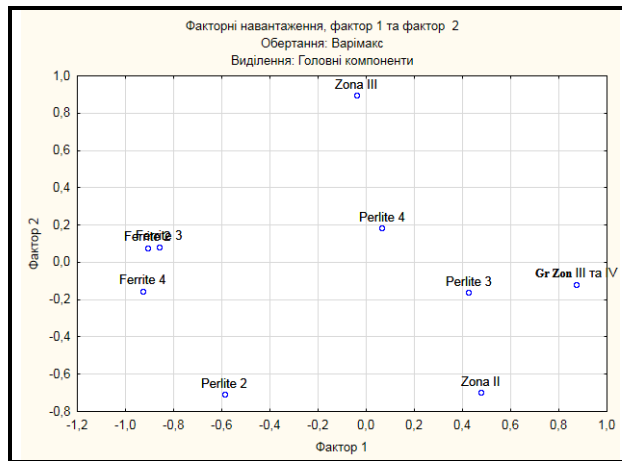
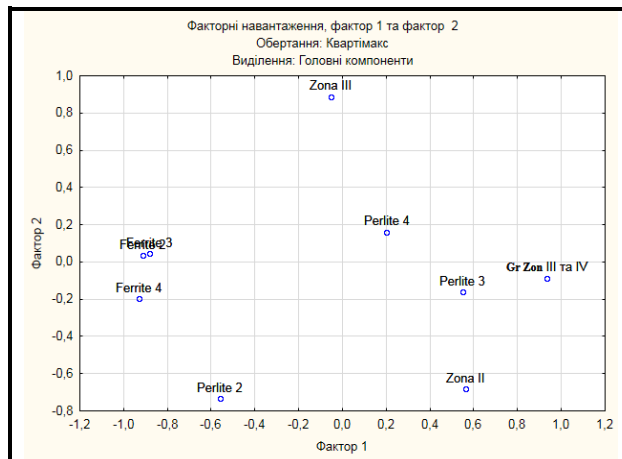
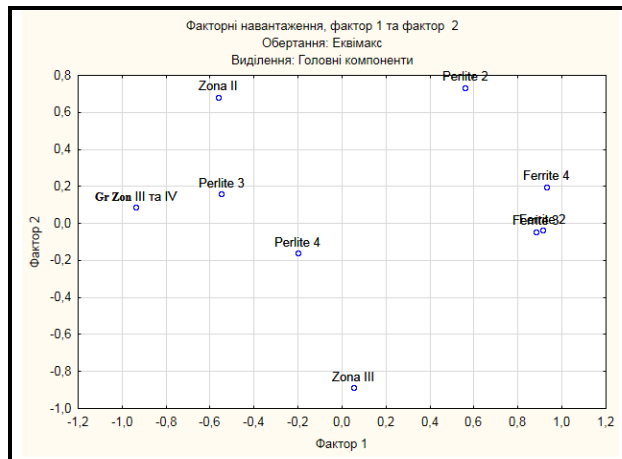
*а**б**в*

Рисунок 4.9 – Діаграма обертання двох факторів для автоматичного зварювання під шаром флюсу: *а* – метод варімакс; *б* – метод квартімакс; *в* – метод еквімакс

4.5 Застосування методів регресійного аналізу для оцінки отриманих факторних залежностей

Узагальнюючи отримані в пунктах 4.2, 4.3, 4.4 данної роботи результати щодо групування факторів, було отримано наступні залежності:

Фактор 1 = f (ферит 2 – зона II; ферит 3 – зона III; ферит 4 – зона IV).

Фактор 2 = f (перліт 2 – зона II; перліт 3 – зона III; перліт 4 – зона IV).

Фактор 3 = f (зона I – зона II; зона II- зона III; зона III – зона IV).

Фактор 4 = f (ферит 2 – ферит 3; ферит 3 – ферит 4; перліт 2 – перліт 3; перліт 3 – перліт 4).

Фактор 5 = f (ферит 2 – зона III; ферит 3 – зона IV; перліт 2 – зона III; перліт 3 – зона IV).

У зв'язку з появою бейнітної складової, для лазерного зварювання отримані наступні фактори:

Фактор 1 = f (ферит 2 – зона II; ферит 3 – зона III; ферит 4 – зона IV).

Фактор 2 = f (перліт 2 – зона II; перліт 3 – зона III; перліт 4 – зона IV; перліт 4 – бейніт 4; ферит 4 – бейніт 4).

Фактор 3 = f (зона I – зона II; зона II- зона III; зона III – зона IV).

Фактор 4 = f (ферит 2 – ферит 3; ферит 3 – ферит 4; перліт 2 – перліт 3; перліт 3 – перліт 4; перліт 3 – бейніт 4; ферит 3 – бейніт 4).

Фактор 5 = f (ферит 2 – зона III; ферит 3 – зона IV; перліт 2 – зона III; перліт 3 – зона IV; ферит 2 – бейніт 4; перліт 2 – бейніт 4).

Згідно розділу 4 пунктів 4.2., 4.4 у програмі STATSOFT STATISTICA 10.0. було отримано рівняння регресії власних значень та для загального відсотка дисперсії [136].

Абсолютна величина коефіцієнтів в рівнянні регресії являє собою внесок відповідної складової на параметр відгуку y .

У таблиці 4.11 наведено рівняння регресії для власних значень для першого фактору.

Рівняння регресії для власних значень та для загального відсотка дисперсії четвертого та п'ятого фактору представлено у таблицях В.1-В.4 Додатку В.

У таблиці 4.12 наведено рівняння регресії для загального відсотка дисперсії першого фактору.

Таблиця 4.11 – Коефіцієнти рівняння регресії для власних значень для першого фактору

Фактор 1	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння			
		B_0	B_1	B_2	B_3
Сталь 09Г2С					
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	0,489757	-0,050872	0,082280	0,009916
Електронно-променевого зварювання		1,674456	-0,040910	- 0,057756	- 0,005496
Зварювання під шаром флюсу		4,320083	-0,298297	- 0,012710	- 0,069168
Сталь 10ХСНД					
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	- 0,213768	0,030006	- 0,065446	0,107329
Електронно-променевого зварювання		1,788128	-0,213800	0,068730	0,019515
Зварювання під шаром флюсу		1,605698	-0,024409	- 0,077069	- 0,019877
Сталь 10Г2ФБ					
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	1,346731	0,046565	- 0,116135	0,020914
Електронно-променевого зварювання		1,358890	-0,068963	- 0,102063	0,087618

Продовження таблиці 4.11

Фактор 1	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння			
		V_0	V_1	V_2	V_3
Сталь 10Г2ФБ					
Зварювання під шаром флюсу	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3$	0,893086	0,110939	- 0,035396	- 0,078294

Таблиця 4.12 – Коефіцієнти рівняння регресії для загального відсотка дисперсії першого фактору

Фактор 1	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння			
		V_0	V_1	V_2	V_3
Сталь 09Г2С					
Лазерне зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3$	9,037711	0,395455	0,272768	- 0,654813
Електронно-променевого зварювання		12,40656	-1,59807	-0,06073	1,31453
Зварювання під шаром флюсу		0,357622	0,655075	0,069187	0,044983
Сталь 10ХСНД					
Лазерне зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3$	9,302386	0,351040	- 0,575481	0,188689
Електронно-променевого зварювання		1,788128	-0,213800	0,068730	0,019515
Зварювання під шаром флюсу		13,12247	-0,06658	-0,23915	-0,33514

Продовження таблиці 4.12

Фактор 1	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння			
		V_0	V_1	V_2	V_3
Сталь 10Г2ФБ					
Лазерне зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3$	12,19303	0,38164	0,09804	-0,76496
Електронно-променевого зварювання		7,221202	-0,199090	-0,324307	0,651681
Зварювання під шаром флюсу		12,29356	-0,29805	0,60970	-0,82747

У таблиці 4.13 наведено рівняння регресії для власних значень для другого фактору.

Таблиця 4.13 – Коефіцієнти рівняння регресії для власних значень для другого фактору

Фактор 2	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		V_0	V_1	V_2	V_3	V_4
Сталь 09Г2С						
Лазерне зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3$	0,293	0,06185	-	0,00412	-
		349	3	0,0509	8	
					84	
Електронно-променевого зварювання		-	0,21355	0,0665	-	-
		0,863	4	52	0,08296	
		887			7	

Продовження таблиці 4.13

Фактор 2	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
Сталь 09Г2С						
Зварювання під шаром флюсу	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	- 0,367 884	0,02225 9	0,1112 11	- 0,02303 8	-
Сталь 10ХСНД						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	0,672 100	- 0,03405 7	0,1119 47	- 0,08619 8	-
Електронно- променевого зварювання		0,091 955	- 0,00548 4	- 0,0352 10	0,08028 9	-
Зварювання під шаром флюсу		0,326 963	- 0,06723 8	- 0,0466 76	0,10728 2	-
Сталь 10Г2ФБ						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	- 0,108 171	0,06663 1	- 0,1290 09	0,02197 6	0,29493 8
Електронно- променевого зварювання		0,039 053	- 0,10281 1	- 0,1300 30	0,26287 0	-
Зварювання під шаром флюсу		- 0,869 695	0,10995 3	0,0478 32	- 0,03134 3	-

У таблиці 4.14 наведено рівняння регресії для загального відсотка дисперсії другого фактору.

Таблиця 4.14 – Коефіцієнти рівняння регресії для загального відсотка дисперсії другого фактору

Фактор 2	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
Сталь 09Г2С						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	14,94 101	-0,76092	0,8455 1	-1,62623	-
Електронно-променевого зварювання		8,254 104	0,47654 0	- 0,5992 55	- 0,24351 9	-
Зварювання під шаром флюсу		10,88 565	-1,17498	0,1743 0	-0,01717	-
Сталь 10ХСНД						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$	6,296 137	-0,10509	0,8715 47	-0,80810	-
Електронно-променевого зварювання		0,091 955	- 0,00548 4	0,0352 10	0,08028 9	-
Зварювання під шаром флюсу		1,405 163	- 0,28328 3	- 0,0492 01	0,52002 8	-
Сталь 10Г2ФБ						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	14,91 505	-0,51558	0,0857 4	-0,45366	- 1,33246
Електронно-променевого зварювання		14,31 302	-0,31760	0,8316 6	-1,62071	-

Продовження таблиці 4.14

Фактор 2	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
Сталь 10Г2ФБ						
Зварювання під шаром флюсу	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	7,559 496	0,12776 5	- 0,0550 83	- 0,48714 5	-

У таблиці 4.15 наведено рівняння регресії для власних значень для третього фактору.

Таблиця 4.15 – Коефіцієнти рівняння регресії для власних значень для третього фактору

Фактор 3	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
Сталь 09Г2С						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	- 0,311 463	0,05451 4	0,6447 92	0,12579 8	0,46453 4
Електронно- променевого зварювання		0,444 718	- 0,03477 4	- 0,5350 08	- 0,05397 8	0,11752 0
Зварювання під шаром флюсу		0,370 845	- 0,07962 4	0,3278 13	0,01543 8	0,24398 5
Сталь 10ХСНД						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,222 356	- 0,02746 8	0,0284 08	0,31976 4	- 0,22167 5
Електронно- променевого зварювання		- 0,796 075	0,27280 2	1,7567 49	0,13436 2	0,82989 7

Продовження таблиці 4.15

Фактор 3	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
Сталь 10ХСНД						
Зварювання під шаром флюсу	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	3,351 47	0,04862	- 8,8800 8	-1,33783	3,78181
Сталь 10Г2ФБ						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	- 0,181 842	0,12067 0	- 0,8132 84	0,26316 6	0,15254 9
Електронно- променевого зварювання		- 0,337 110	0,14812 4	1,0809 36	- 0,10867 2	2,47985 2
Зварювання під шаром флюсу		0,061 285	- 0,02064 8	1,6666 87	- 0,02314 8	1,04346 4

У таблиці 4.16 наведено рівняння регресії для загального відсотка дисперсії другого фактору.

Таблиця 4.16 – Коефіцієнти рівняння регресії для загального відсотка дисперсії третього фактору

Фактор 3	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
Сталь 09Г2С						
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,641 866	- 0,16694 2	2,7132 01	1,15799 8	0,52410 8
Електронно- променевого зварювання		- 1,298 01	0,09187	4,5917 2	4,32485	- 1,71777

Продовження таблиці 4.16

Фактор З	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння				
		В ₀	В ₁	В ₂	В ₃	В ₄
Сталь 09Г2С						
Зварювання під шаром флюсу		0,354 907	0,60278 9	4,5974 31	- 0,06275 4	0,67974 1
Сталь 10ХСНД						
Лазерне зварювання	$y = v_0 + v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + v_3 \cdot x_3 + v_4 \cdot x_4$	0,222 356	- 0,02746 8	0,0284 08	0,31976 4	- 0,22167 5
Електронно-променевого зварювання		- 0,796 075	0,27280 2	1,7567 49	0,13436 2	0,82989 7
Зварювання під шаром флюсу		3,351 47	0,04862	- 8,8800 8	-1,33783	3,78181
Сталь 10Г2ФБ						
Лазерне зварювання	$y = v_0 + v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + v_3 \cdot x_3 + v_4 \cdot x_4$	1,413 87	0,56060	0,9276 8	-1,36074	1,63214
Електронно-променевого зварювання		4,197 9	-0,3719	13,295 5	0,4217	- 15,0412
Зварювання під шаром флюсу		2,497 54	-0,11316	- 4,6332 2	0,02766	9,15022

Для перевірки адекватності регресійного аналізу було отримано імовірнісні графіки залишків власних значень та дисперсії для кожного отриманого факторів, які приведені на рисунках 4.10 - 4.18.

На рисунку 4.10 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для першого фактору сталі 09Г2С.

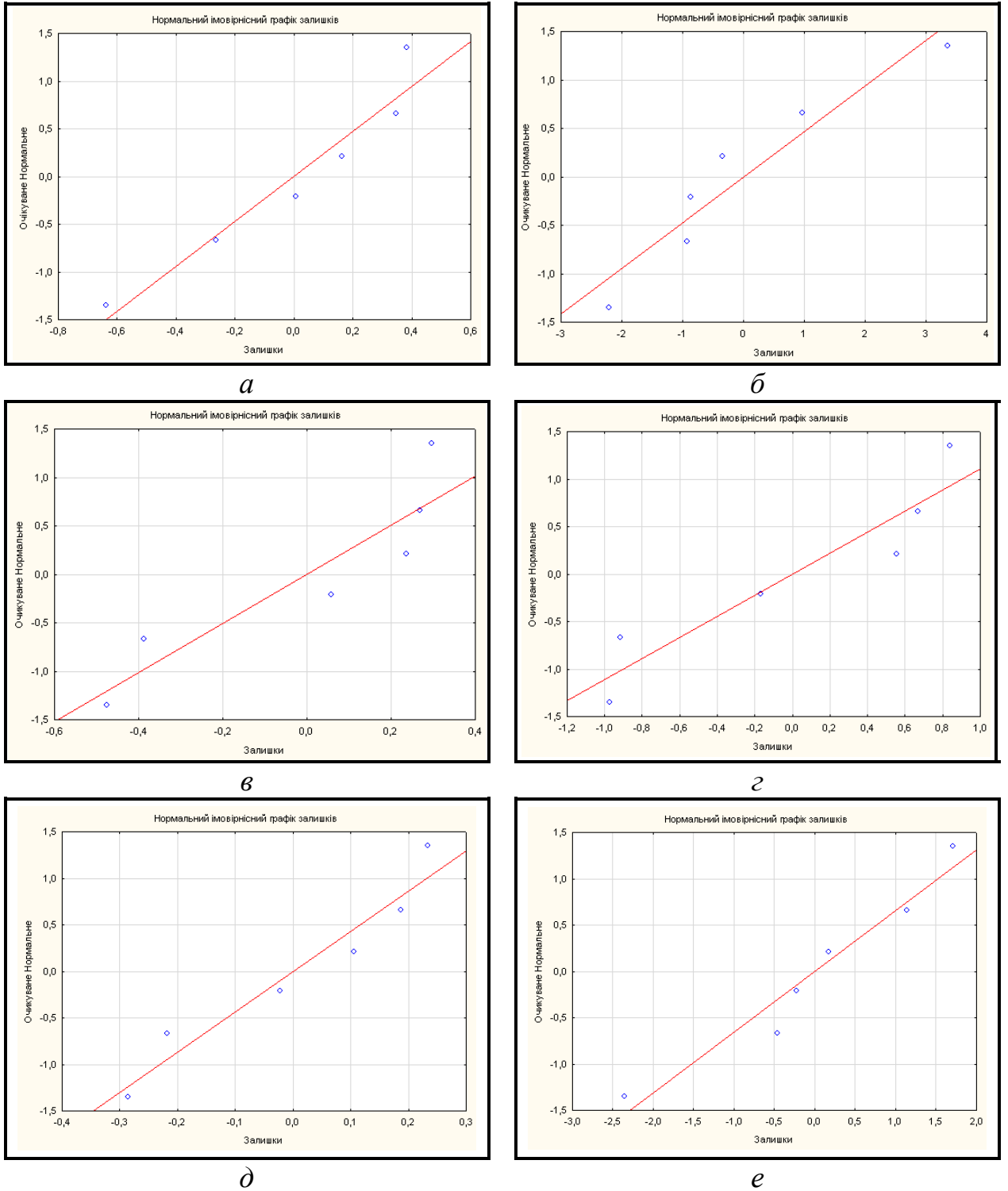


Рисунок 4.10 – Нормальний імовірнісний графік залишків першого фактору сталі 09Г2С

На рисунку 4.11 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для першого фактору сталі 10ХСНД.

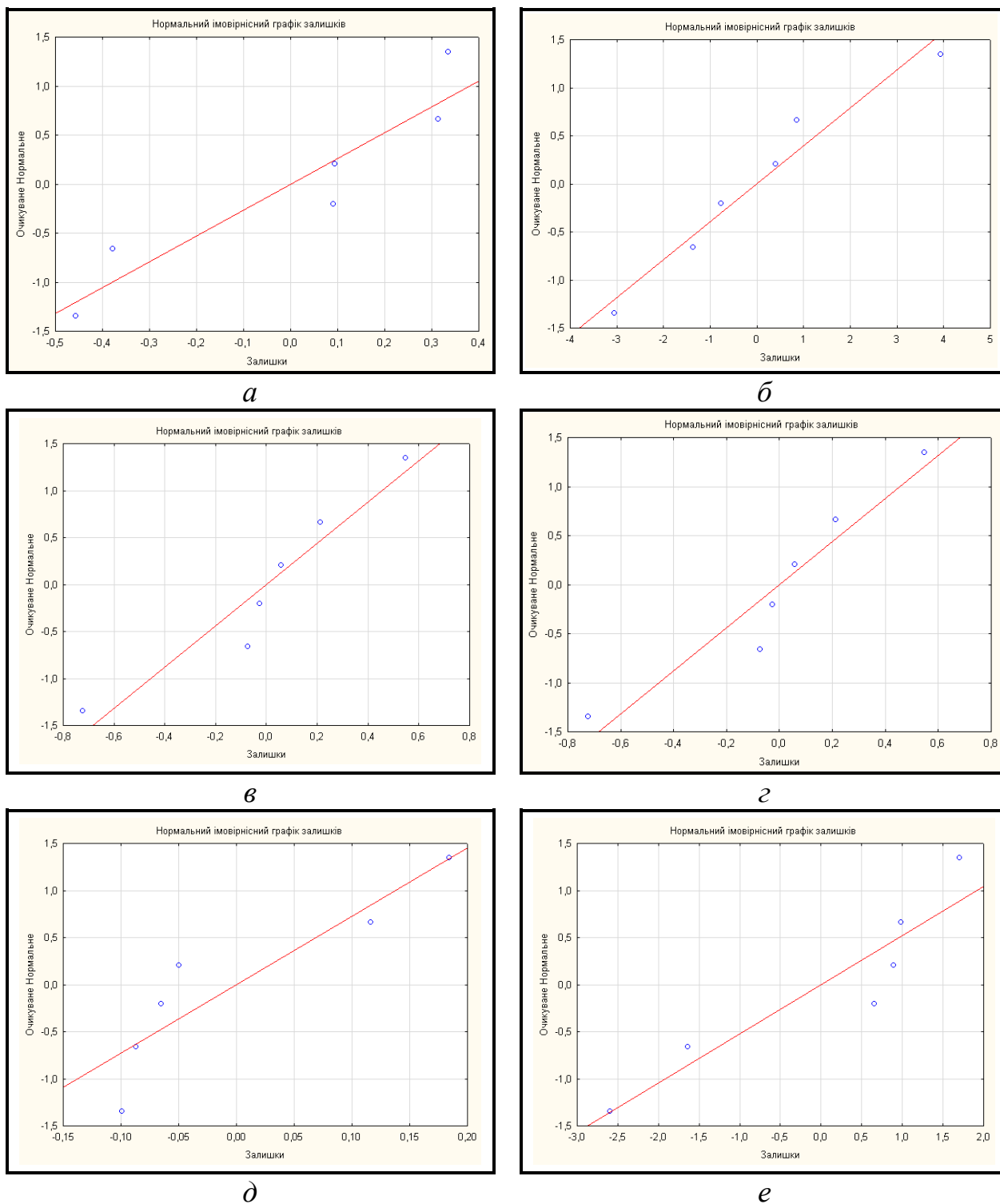
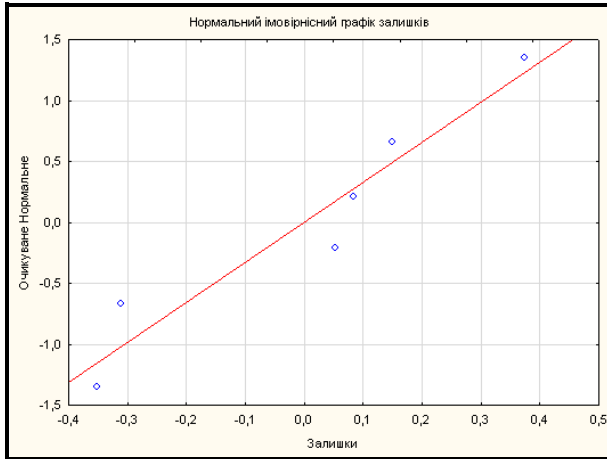
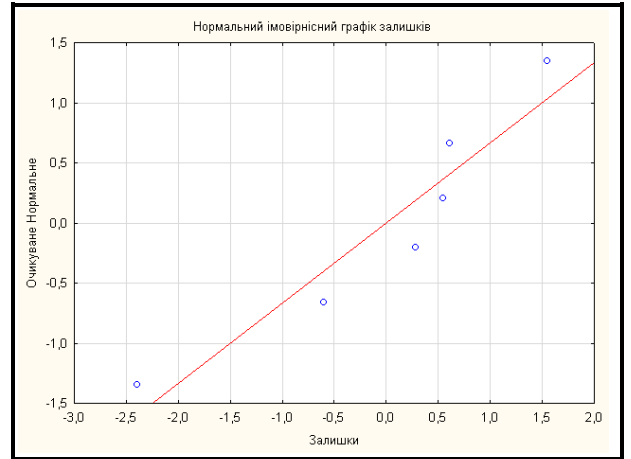


Рисунок 4.11 – Нормальний імовірнісний графік залишків першого фактору сталі 10ХСНД

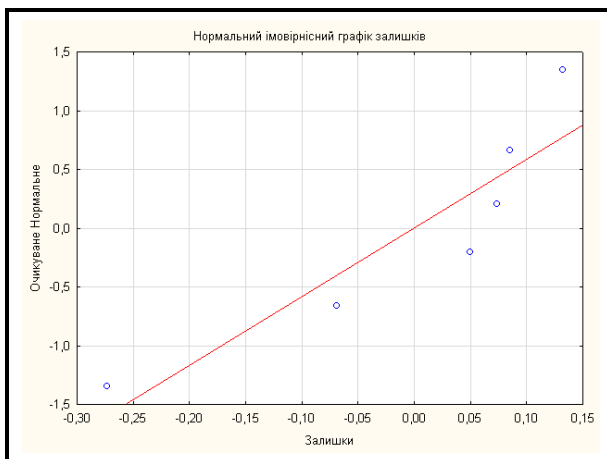
На рисунку 4.12 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для першого фактору сталі 10Г2ФБ.



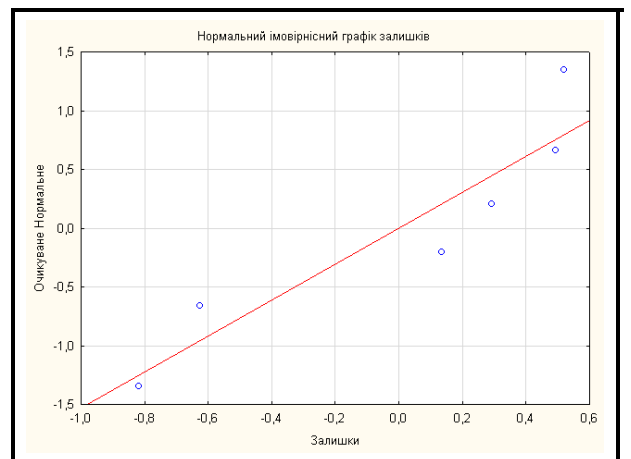
а



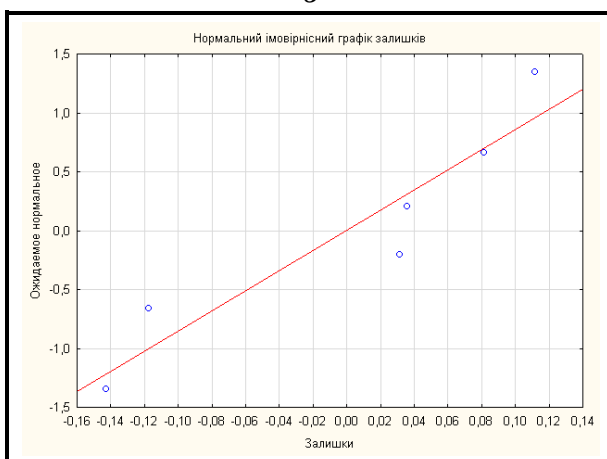
б



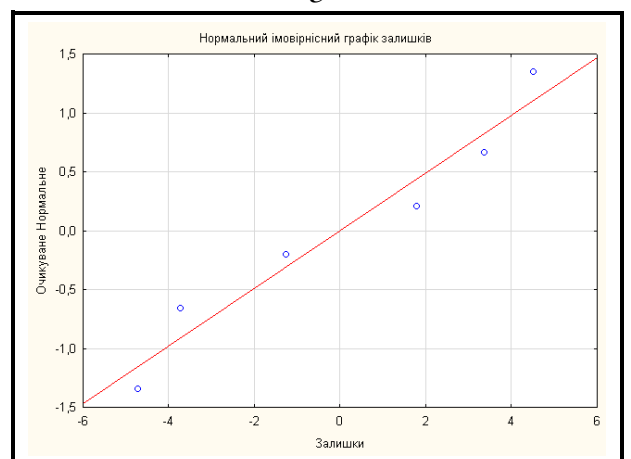
в



г



д



е

Рисунок 4.12 – Нормальний імовірнісний графік залишків першого фактору сталі 10Г2ФБ

На рисунку 4.13 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для другого фактору сталі 09Г2С.

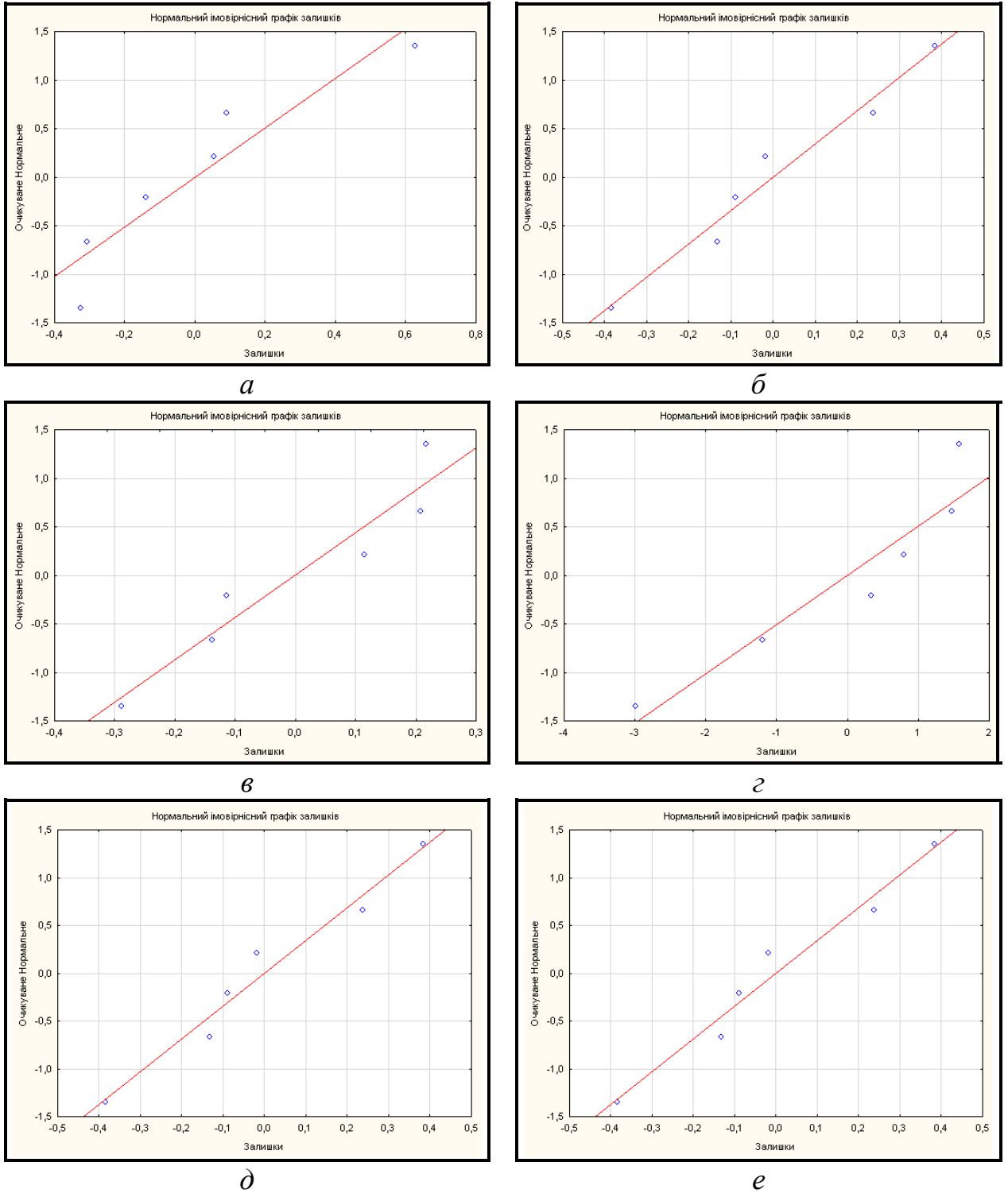


Рисунок 4.13 – Нормальний імовірнісний графік залишків другого фактору сталі 09Г2С

На рисунку 4.14 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для другого фактору сталі 10ХСНД.

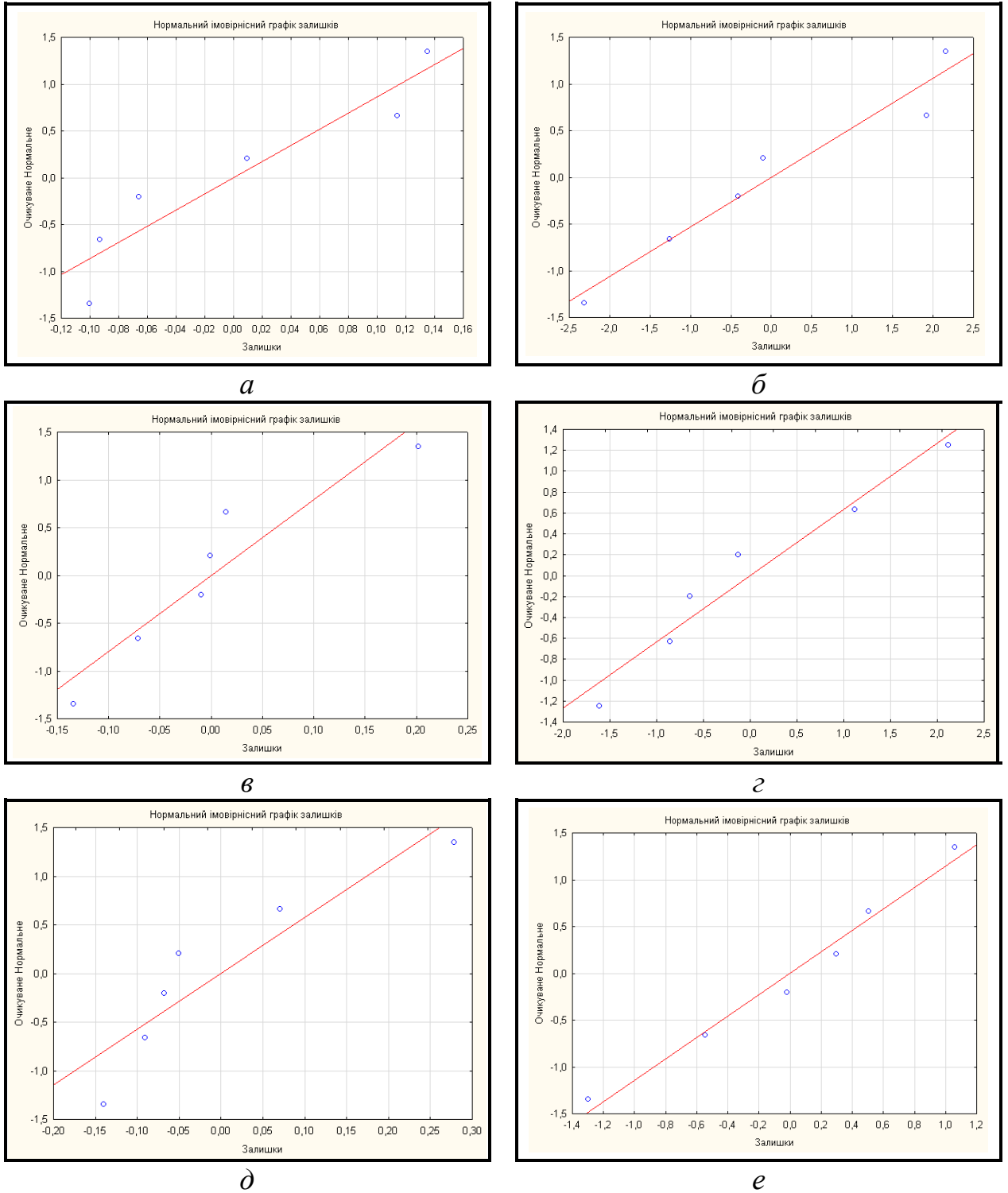


Рисунок 4.14 – Нормальний імовірнісний графік залишків другого фактору сталі 10ХСНД

На рисунку 4.15 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для другого фактору сталі 10Г2ФБ.

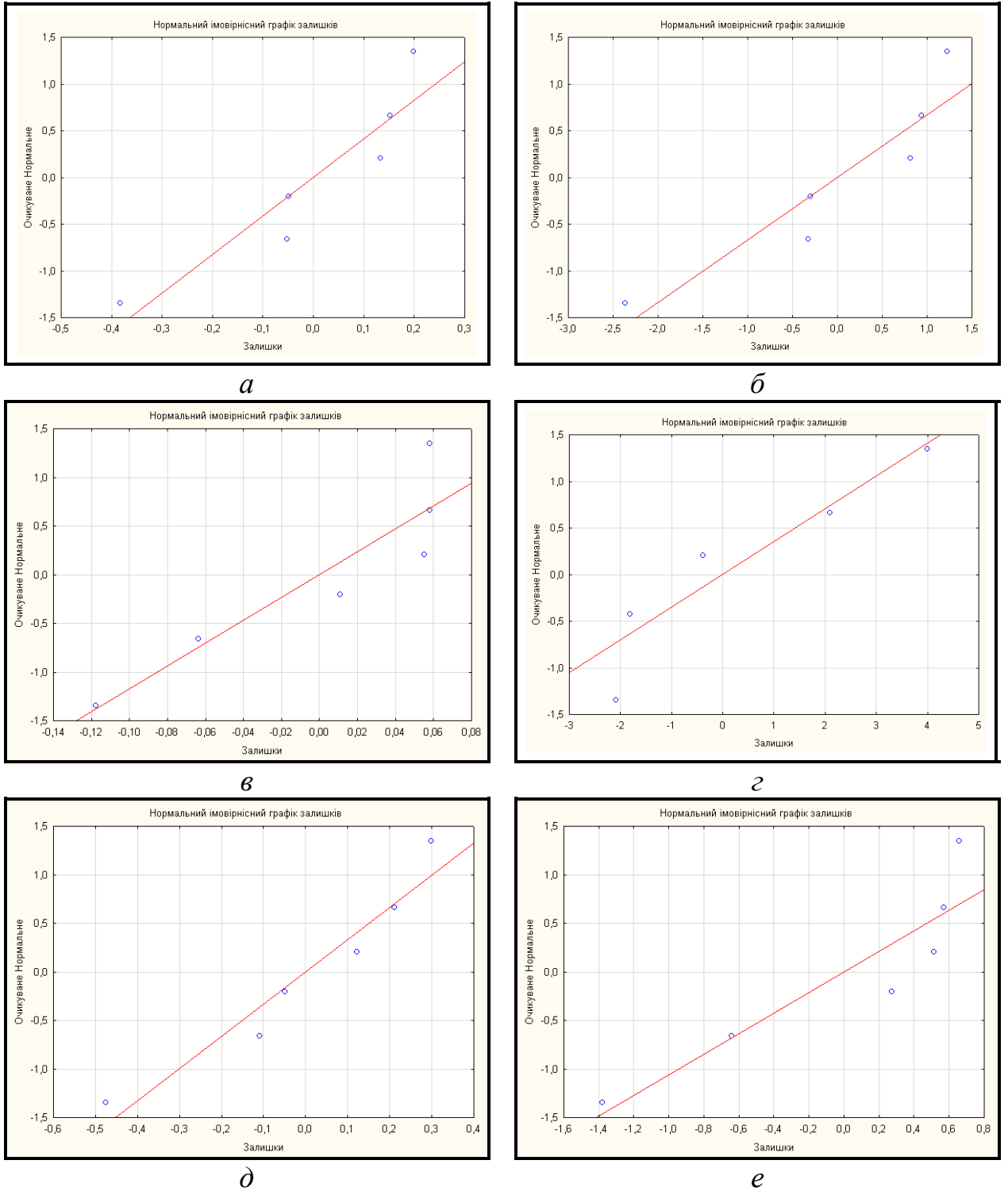


Рисунок 4.15 – Нормальний імовірнісний графік залишків другого фактору сталі 10Г2ФБ

На рисунку 4.16 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для третього фактору сталі 09Г2С.

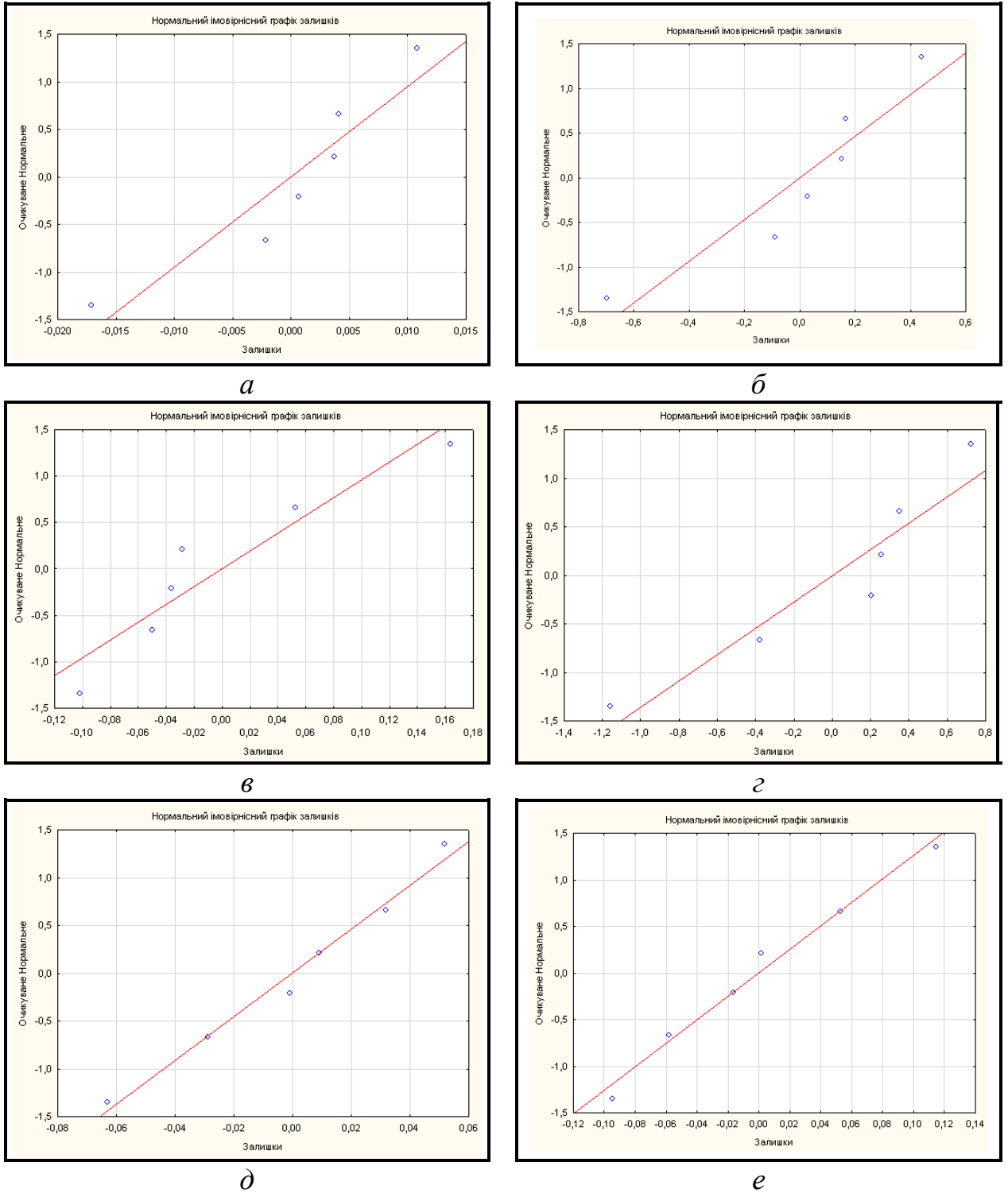


Рисунок 4.16 – Нормальний імовірнісний графік залишків третього фактору сталі 09Г2С

На рисунку 4.17 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для третього фактору сталі 10ХСНД.

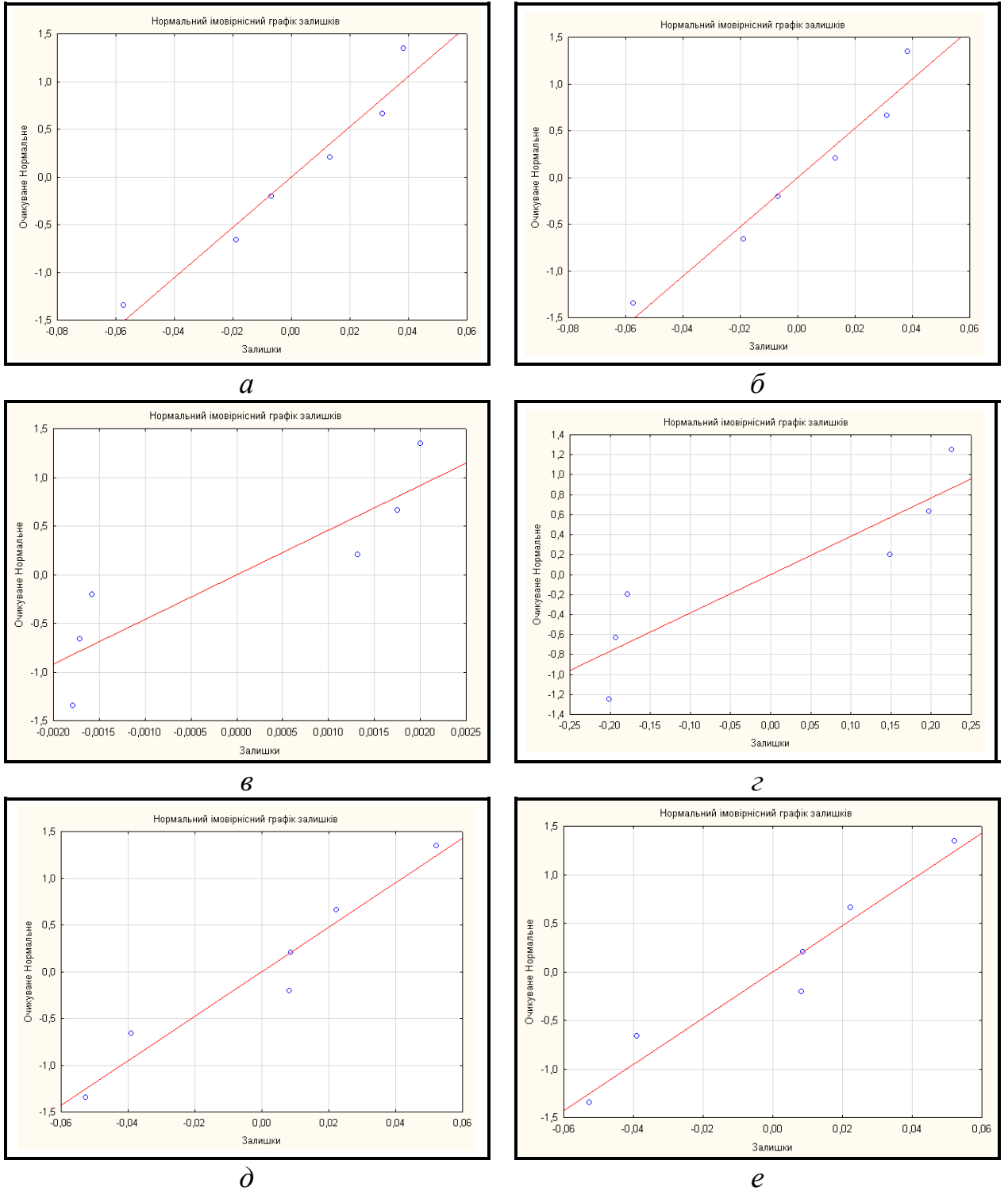


Рисунок 4.17 – Нормальний імовірнісний графік залишків третього фактору сталі 10ХСНД

На рисунку 4.18 наведено нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для третього фактору сталі 10Г2ФБ.

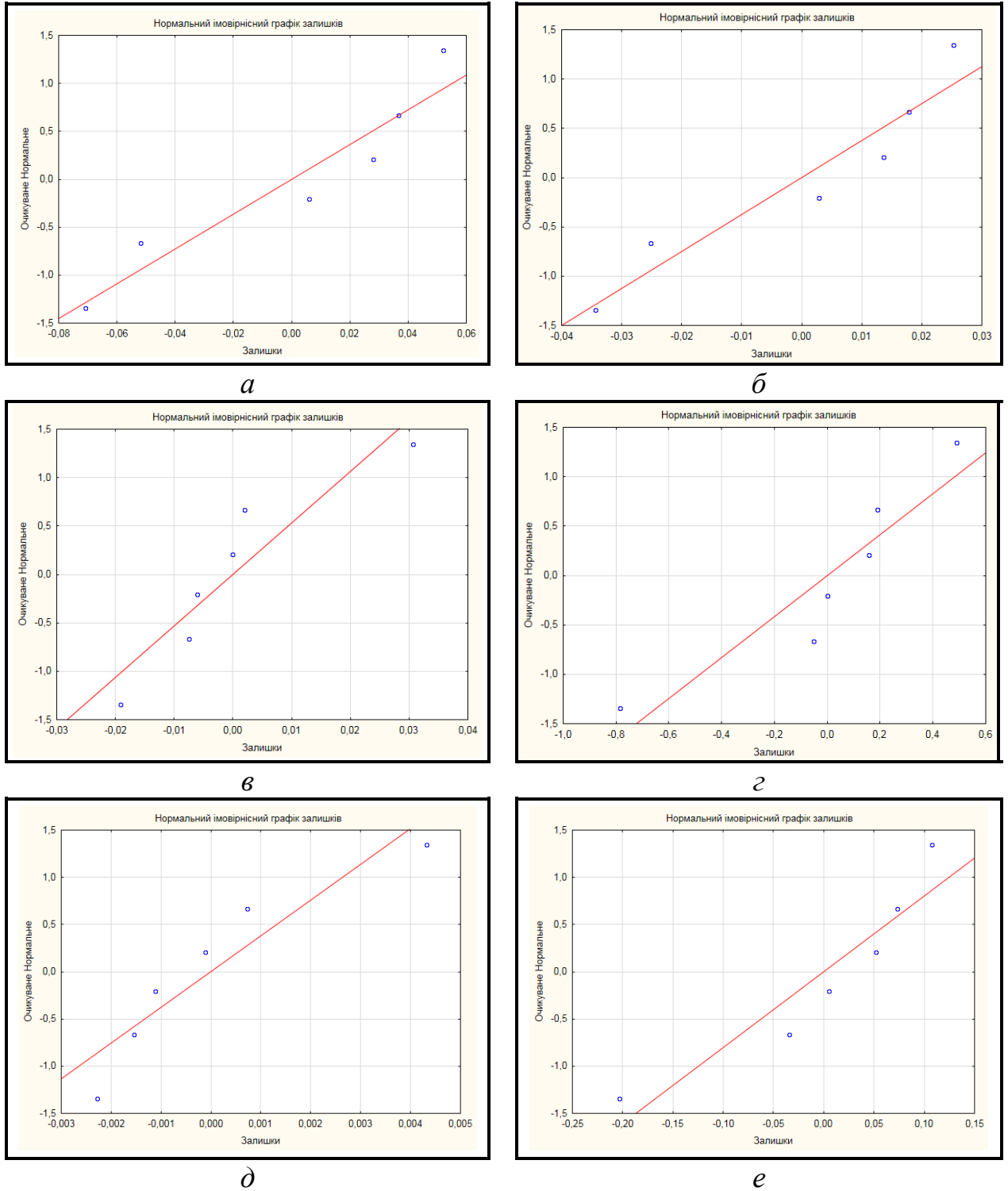


Рисунок 4.18 – Нормальний імовірнісний графік залишків третього фактору сталі 10Г2ФБ

Умовні позначення рисунків 4.10 - 4.18:

a – власні значення лазерного зварювання;

б – загальний відсоток дисперсії лазерного зварювання;

в – власні значення електронно-променевого зварювання;

г – загальний відсоток дисперсії електронно-променевого зварювання;

д – власні значення автоматичного зварювання під шаром флюсу;

e – загальний відсоток дисперсії автоматичного зварювання під шаром флюсу.

Нормальний імовірнісний графік залишків власних значень та залишків загального відсотка дисперсії для четвертого та п'ятого фактору представлено на рисунках В.1- В.6 Додатку В.

Отримані на рисунках 4.10 - 4.18 імовірнісні графіки залишків показують, що вони майже у всіх випадках лягають поблизу прямої лінії, яка відповідає нормальному закону розподілу, що в свою чергу підтверджує гіпотезу про розподіл помилок.

4.6. Висновки по розділу 4

В даному розділі з застосуванням математичних апаратів кореляційного, регресійного та факторного аналізу проаналізовано взаємозв'язок між параметрами процесу зварювання та структурним станом матеріалу для зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання;

1. В ході виконання роботи запропоновано алгоритм застосування факторного аналізу для вирішення прикладних задач матеріалознавства зокрема аналізу структурного стану для зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання;
2. На підставі даних кількісної оцінки, результати металографічних досліджень обрано змінні, які характеризують структурний стан зварного з'єднання досліджувальних марок сталі;

3. З застосуванням математичного апарату факторного аналізу здійснено групування факторів та групування змінних у фактори, та отримано відповідні якісні залежності;
4. На підставі критеріїв факторного аналізу виконано скорочену кількість факторів. Дану операцію було проаналізовано з застосуванням методів варімакс, квартімакс, еквімакс;
5. В результаті проведеного комплексу досліджень встановлено, що найбільш значущими змінними при аналізі структурного стану зварних з'єднань після різних режимів зварювання є відсотковий розподіл феритної та перлітної структурної складової, геометричні розміри зон зварного з'єднання.

4.7. Список використаних джерел в розділі 4

У розділі 4 використані джерела [3, 130, 142, 143, 123, 124, 150, 152, 136-138, 139, 162-167]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 5

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

5.1. Підтверджуючий факторний аналіз

У складних системах, що характеризуються багаторівнянністю і взаємодією між собою елементів, кожен з яких також є системою, при традиційному підході до моделювання дослідник неминуче стикається з величезними труднощами. Основною складністю виявляється безпосередня формалізація і математичний опис загальносистемних ситуацій на базі уможливленого аналізу зв'язків і залежностей між елементами системи, тим більше, що не завжди для цієї мети є відповідні математичні засоби. У таких ситуаціях можливий інший шлях. На допомогу приходять прийоми моделювання, які представляють модель у вигляді алгоритмічної програми для електронно-обчислювальної машини (ЕОМ). У цьому полягає сутність імітаційного моделювання.

Імітаційне моделювання - це дослідження складної системи на ЕОМ, спрямоване на отримання інформації про саму систему. Імітаційне моделювання засноване на відтворенні за допомогою ЕОМ розгорнутого в часі процесу функціонування системи з урахуванням взаємодії із зовнішнім середовищем.

Основними завданнями імітаційного моделювання є:

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

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.

До переваг методу імітаційного моделювання можуть бути віднесені: проведення імітаційних експериментів над імітаційної моделлю системи, для якої натурний експеримент не здійснимо з етичних міркувань або експеримент пов'язаний з небезпекою для життя, або він доріг, або через те, що експеримент не можна провести з минулим; рішення задач, аналітичні методи для яких непридатні або трудомісткі, наприклад, в разі безперервно-дискретних чинників, випадкових впливів, нелінійних характеристик елементів системи та ін.; можливість аналізу загальносистемних ситуацій і прийняття рішення за допомогою ЕОМ (в тому числі для складних систем), вибір критерію порівняння стратегій поведінки який на рівні проектування не здійснимо; скорочення термінів і пошук проектних рішень, які є оптимальними за деякими критеріями оцінки ефективності; проведення аналізу варіантів структури великих систем, різних алгоритмів управління, вивчення впливу змін параметрів системи на її характеристики та ін.

За рахунок ідентичності будови і поведінки можливих поєднань і стрибків стану системи при імітаційному моделюванні має місце певна схожість процесу, відтвореного ЕОМ, і реального процесу функціонування системи. Конструюючи загальносистемні ситуації, ЕОМ як би імітує явища і події процесу, що моделюється.

У якості змінних, які використовувалися при аналізі та конструюванні математичного моделювання використовувалися дані щодо групування та отримання факторів, які було отримано в розділі 4 даної роботи. Процес побудови та аналізу математичного моделювання здійснювався з використанням програмного комплексу STATSOFT STATISTICA 10.0 [136-138].

На першому етапі дослідження було використано математичний апарат підтверджуючого факторного аналізу, який є розвитком звичайного факторного аналізу, що використовується для перевірки певних гіпотез про структуру факторних навантажень та кореляцій між факторами [137]. У моделях

підтверджуючого факторного аналізу навантаження факторів, кореляції факторів або дисперсія і коваріації залишків можуть бути визначені заданим числовим значенням або рівними один одному.

Головною ідеєю підтверджуючого факторного аналізу є порівняння відхилень дисперсій вихідних і отриманих кореляційних та коваріаційних матриць. Першим етапом підтверджуючого факторного аналізу є здійснений додатковий аналіз факторів (дивись розділ 4 даної роботи), та їх групування.

Графічну інтерпретацію моделі наведено на рисунку 5.1.

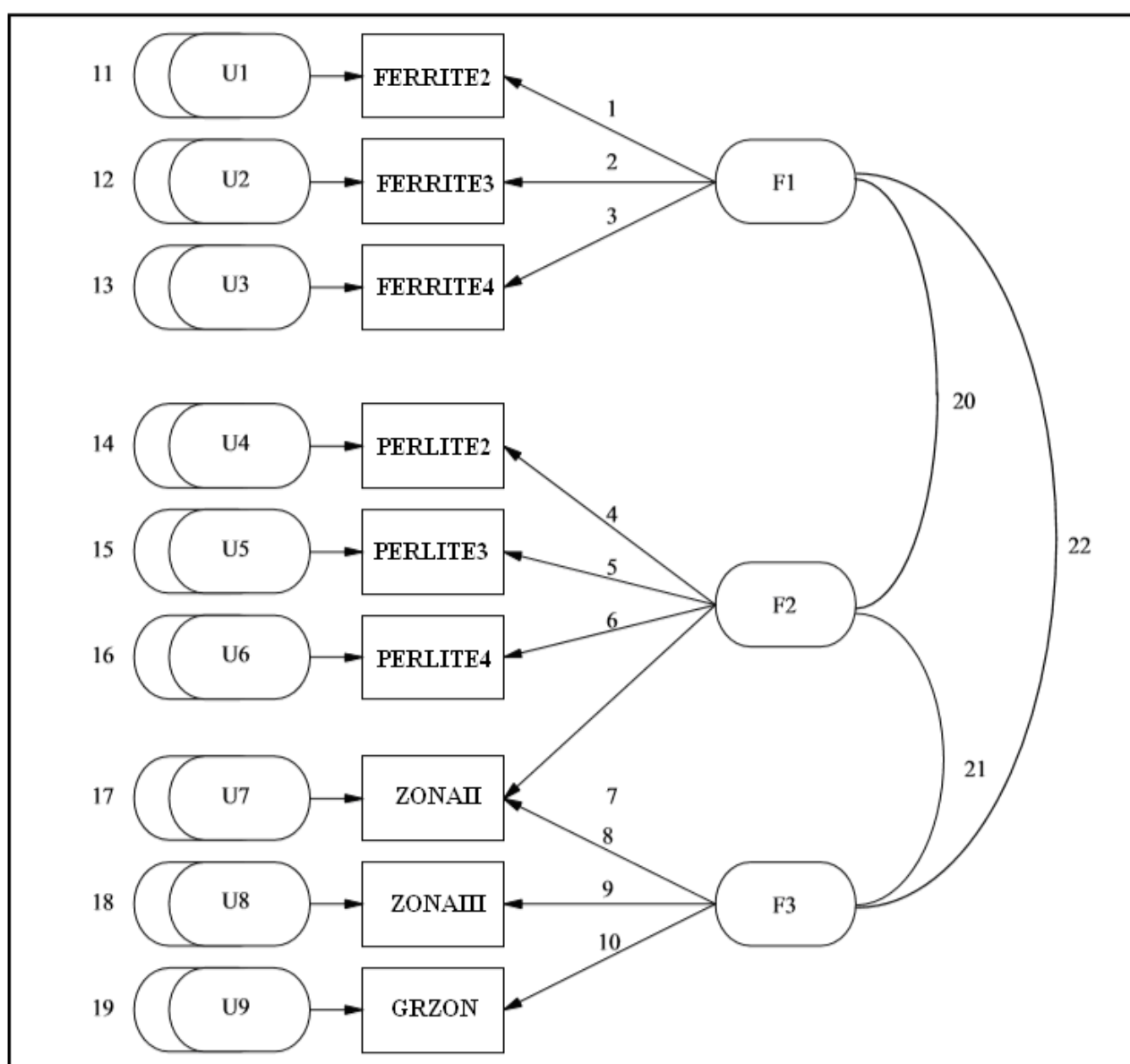


Рисунок 5.1 – Діаграма шляхів підтверджуючого факторного аналізу

На рисунку 5.1 в якості змінних використовувалися:

FERRITE2 – відсоткове співвідношення структурних складових фериту на границі зварного шву та зони термічного впливу;

FERRITE3 – відсоткове співвідношення структурних складових фериту у зоні термічного впливу;

FERRITE4 – відсоткове співвідношення структурних складових фериту на границі між зоною термічного впливу та основним металом;

PERLITE2 – відсоткове співвідношення структурних складових перліту на границі зварного шву та зони термічного впливу;

PERLITE3 – відсоткове співвідношення структурних складових перліту у зоні термічного впливу;

PERLITE4 – відсоткове співвідношення структурних складових перліту на границі між зоною термічного впливу та основним металом;

ZONAII – геометричні розміри між границею зварного шву та зоною термічного впливу;

ZONA III – геометричні розміри зони термічного впливу;

GRZON – геометричні розміри між границею зони термічного впливу та основним металом.

Згідно схеми, яку наведено на рисунку 5.1 досліджувалося три фактора (відповідно до розділу 4 даної роботи), де кожен з факторів навантажує по три явних змінних, а саме:

1. Перший фактор навантажує змінні – FERRITE2, FERRITE3, FERRITE4. Тобто в цьому випадку досліджується ферит у 2, 3 та 4 ділянці.
2. Другий фактор навантажує змінні – PERLITE2, PERLITE3, PERLITE4. У даному випадку досліджується перліт також у 4 ділянках.
3. 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.

На діаграмі представлено явні змінні, тобто змінні, які вимірюються безпосередньо, до яких віднесено ферит та перліт у 2, 3 та 4 ділянці та геометричні розміри зварного з'єднання, також представлено латентні змінні, які не підлягають вимірюванню, до яких відносять похибки вимірювання $U1 - U9$, та факти $F1 - F3$.

Розглянуті фактори, для подальшого їх дослідження, та написання моделі умовно було розділено на структуру 1, структуру 2 та геометричні розміри.

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).

Дугою 11-19 відображено дисперсії до латентних змінних $U1 - U9$; дугою 20 відображено дисперсію між першим та другим фактором $F1 - F2$; дугою 21 - між другим та третім фактором $F3 - F3$; дугою 22 - дисперсію між першим та третім фактором $F1, F3$.

Згідно діаграми шляхів підтверджуючого факторного аналізу (рисунок 5.1), з застосуванням комп'ютерного мови *RATH1* було побудовано модель підтверджуючого факторного аналізу, яку наведено у Додатку Г.

На підставі групування факторів, та результатів підтверджуючого факторного аналізу були отримані та дослідженні відповідні матриці взаємозв'язку (кореляційні та коваріаційні).

5.2. Коваріаційний аналіз отриманих даних в результаті підтверджуючого факторного аналізу

Скорочена таблиця оцінки результатів підтверджуючого факторного аналізу для сталі 09Г2С приведена в таблиці 5.1, для сталі 10ХСНД в таблиці 5.2, для сталі 10Г2ФБ в таблиці 5.3. Загальна таблиця оцінки результатів наведена у Додатку Г таблиці Г.1-Г.3.

Таблиця 5.1 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу для сталі 09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,07	0,17	0,45	0,66
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,80	0,14	5,68	0,01
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	-1,51	0,19	-7,95	0,03
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	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
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,31	0,05	6,24	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,35	1,00	0,35	0,72
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,50	0,22	2,28	0,02

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця 5.2 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу для сталі 10ХСНД після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	-0,49	0,16	-3,08	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,71	0,15	4,76	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	4,44	0,00	-	-
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	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
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,15	0,17	0,90	0,37
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,95	0,13	7,61	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,82	0,37	2,22	0,03

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця 5.3 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу для сталі 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,68	0,1	4,55	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,83	0,44	5,32	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,38	0,10	-4,60	0,00
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	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
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,98	0,11	9,33	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	-0,32	0,14	-2,22	0,03

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Аналізуючи таблиці 5.1...5.3 бачимо, що кожна строка отриманих результатів оцінки моделі аналізує кожен здійснений етап аналізу шляхів.

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 максимум правдоподібності (МП).

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.

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.

Бачимо, що всі коефіцієнти коваріації між факторами та вихідними змінними значимі при рівні значущості $p = 0$. T-статистика відображає значення критерію для гіпотези, що значення параметра дорівнює нулю.

Аналіз отриманих даних здійснювався з використанням статистичного апарату критеріїв згоди, результати даного етапу представлені в таблиці 5.4

Функція незгоди відображає кінцеве значення, що приймається до допомогою функції незгоди.

Значення критерію УУПММ (критерій стійкості до множення на постійний множник масштабу) повинен бути близьким до нуля.

Критерій УИМ (критерій стійкості до зміни масштабу) також повинен бути близький до нуля.

По даним таблиці 5.4 бачимо, що умови повністю відповідають критерію УУПММ та критерій УИМ.

За критерієм хі-квадрата оцінюється розбіжність між вихідною та відтвореною кореляційною матрицею.

Таблиця 5.4 – Оцінка результатів підтверджуючого факторного аналізу для сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

Критерії оцінки	Сталь 09Г2С			Сталь 10ХСНД			Сталь 10Г2ФБ		
	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу
Функція незгоди	1,3E+002	1,4E+002	1,4E+019	1,4E+002	1,4E+002	1,4E+002	0	1,4E+002	1,4E+002
Критерій УУПММ	3,4E-007	-4,5E-006	-9E+004	0,084	-0,018	1,9E-005	-9E+004	-1,8E-007	-1,3E-007
Критерій УИМ	0,0011	0,00011	0,004	0,084	0,056	0,0056	0,009	0,00015	0,00017
Хі-квадрат	47,20	40,31	47,54	49,04	64,37	47,27	54,98	72,01	64,75
Число ступенів свободи	23	23	23	24	23	23	24	23	23
Максимум косинуса залишків	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	0,09	0,00	0,00

Максимум косинуса залишків при умові, коли процес ітерації зійшовся, даний критерій буде становити значення близьке нулю. Аналіз даних, наведених в таблиці відповідає перерахованим умовам.

Ітерація являє собою багаторазове повторення обробки даних, чим більше було проведено ітераційних процесів тим імовірніше буде отриманий результат.

5.3. Кореляційний аналіз отриманих даних в результаті підтверджуючого факторного аналізу

Скорочені результати кореляційного аналізу згруповано та приведено в таблиці 5.5 для сталі 09Г2С, для сталі 10ХСНД в таблиці 5.6, для сталі 10Г2ФБ в таблиці 5.7. Повна таблиця отриманих даних оцінки кореляційного аналізу наведено у Додатку Г таблиці Г.4-Г.6.

Аналогічно таблицям 5.1...5.3 здійснений етап аналізу шляхів, який представлено на комп'ютерному язиці *PATNI* (Додаток Г).

Метод оцінювання моделі: узагальнений метод найменших квадратів → метод максимум правдоподібності (УМНК→МП).

Отримані дані оцінки для кожного відповідного параметра, отримані стандартні похибки факторних навантажень, які показують стандартні відхилення для кожного з написаних шляхів. Аналізуючи отримані результати, бачимо, що стандартні похибки в даному випадку були в допустимих межах.

Результати Т – статистики показують межу відхилення кожного параметра від його номінальної величини, що відображає кількість стандартних помилок.

Імовірнісний рівень приймає значення ближче до 1.

Всі коефіцієнти кореляції між факторами та вихідними змінними значимі при рівні значущості $p = 0$. Т-статистика відображає значення критерію для гіпотези, що значення параметра дорівнює нулю.

Таблиця 5.5 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу для сталі 09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,07	0,17	0,45	0,65
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,80	0,06	12,69	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	-1,51	0,22	-6,93	0,00
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	1,11	0,12	0,35	0,21
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,74	0,04	10,33	0,12
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,91	0,11	5,13	0,21
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,57	0,41	5,55	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,40	0,12	8,67	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,84	0,69	2,77	0,06

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця 5.6 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу для сталі 10ХСНД після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	-0,49	0,13	-3,78	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,68	0,09	7,57	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	1,17	0,20	5,81	0,00
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,97	0,01	1,01	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	1,00	0,00	5,20	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	-0,57	0,09	-6,16	0,76
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,15	0,17	0,91	0,36
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,95	0,02	50,42	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,82	0,34	2,39	0,02

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця 5.7 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу для сталі 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,73	0,06	11,83	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,72	0,06	11,57	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,32	0,13	2,39	0,02
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,67	0,08	8,74	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,83	0,04	19,09	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,96	0,01	67,54	0,00
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,98	0,01	1,26	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	-0,32	0,13	-2,48	0,02
(GEOMETRY) -8- >[ZONAII]	0,65	0,17	3,91	0,00

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Аналіз отриманих даних здійснювався з використанням статистичного апарату критеріїв згоди, результати якого представлені в таблиці 5.8.

Аналогічно таблиці 5.4 отримана функція незгоди відображає кінцеве значення, що приймається до допомогою функції незгоди.

Значення критерію УУПММ (критерій стійкості до множення на постійний множник масштабу) та критерій УИМ (критерій стійкості до зміни масштабу) становлять значення, близьке до нуля.

Проаналізувавши дані критерії, бачимо, що умови повністю відповідають критерію УУПММ та УИМ.

За критерієм хі-квадрата оцінюється розбіжність між вихідною та відтвореною кореляційною матрицею.

Максимум косинуса залишків при умові, коли процес ітерації зійшовся, даний критерій буде становити значення близьке нуля. Бачимо, що отримані результати відповідають даним умовам.

Графічну інтерпретацію кореляційного аналізу представлено на рисунку 5.2, 5.3.

Умовні позначення рисунку 5.2

a – сталь 09Г2С після лазерного зварювання;

б – сталь 10ХСНД після лазерного зварювання;

в – сталь 09Г2С після електронно-променеве зварювання;

г – сталь 10ХСНД після електронно-променеве зварювання;

д – сталь 09Г2С після автоматичного зварювання під шаром флюсу;

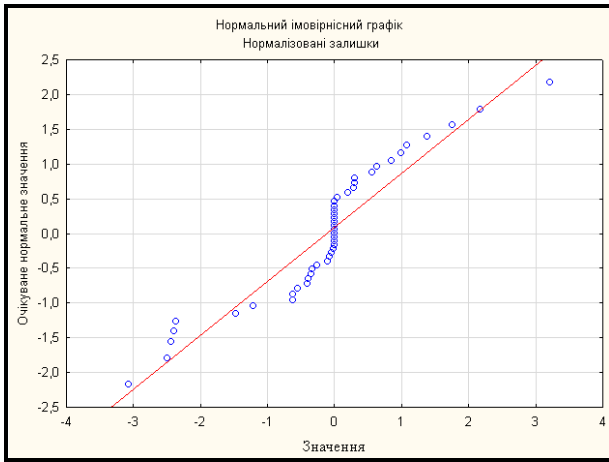
e – сталь 10Г2ФБ після автоматичного зварювання під шаром флюсу.

Аналіз отриманих даних показує, що залишки лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу [169].

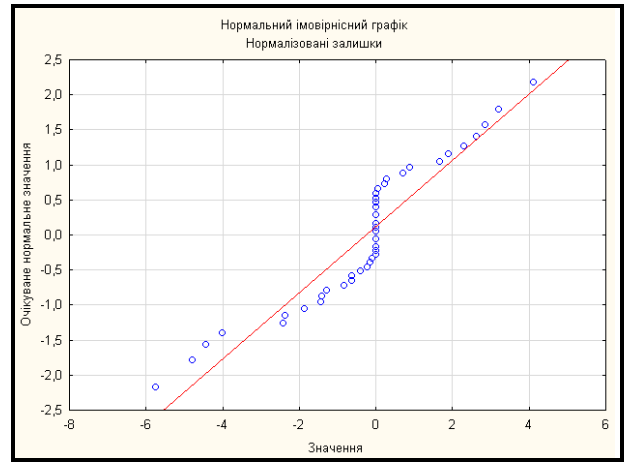
Проведений комплекс досліджень показав, що згруповані в розділі 4 фактори можна використовувати для більш детального аналізу досліджуваного процесу.

Таблиця 5.8 – Оцінка результатів підтверджуючого факторного аналізу для сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

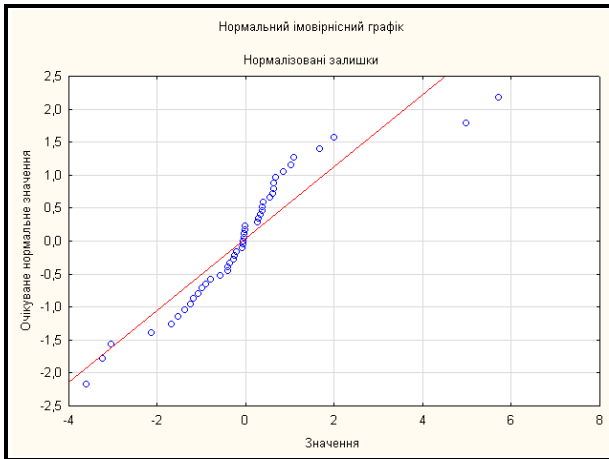
Критерії оцінки	Сталь 09Г2С			Сталь 10ХСНД			Сталь 10Г2ФБ		
	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу
Функція незгоди	1,3E+022	1,4E+022	1,2E+022	1,4E+022	1,4E+022	1,4E+022	1,1E+002	1,4E+022	1,4E+022
Критерій УУПММ	1,7E-007	-9E+004	-9E+004	-3,4E-009	-0,018	1,9E-005	-0,021	-1,8E-007	-1,3E-007
Критерій УИМ	0,00061	1E+004	1E+004	3,7E-005	0,56	0,0056	0,1	0,00015	0,00017
Хі-квадрат	47,20	33,91	57,12	48,94	64,37	47,27	37,26	72,01	64,75
Число ступенів свободи	23	23	23	23	23	23	24	23	23
Максимум косинуса залишків	0,00	0,03	0,00	0,00	0,05	0,00	0,09	0,00	0,00



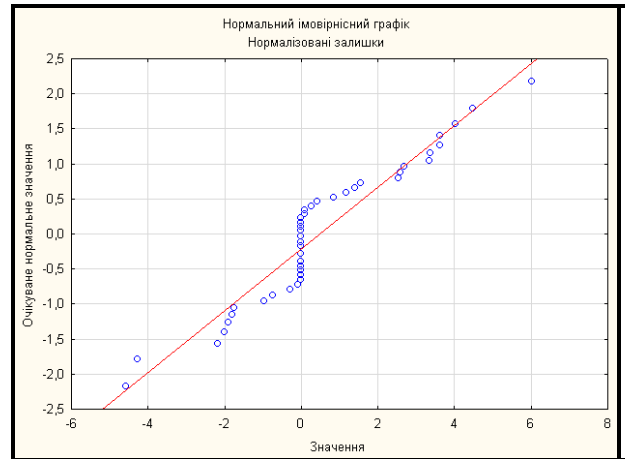
a



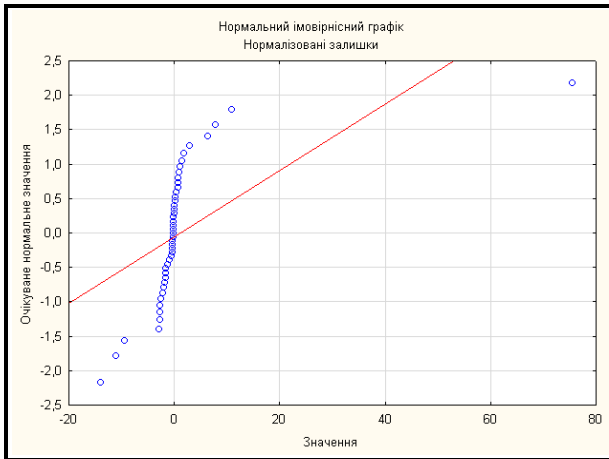
б



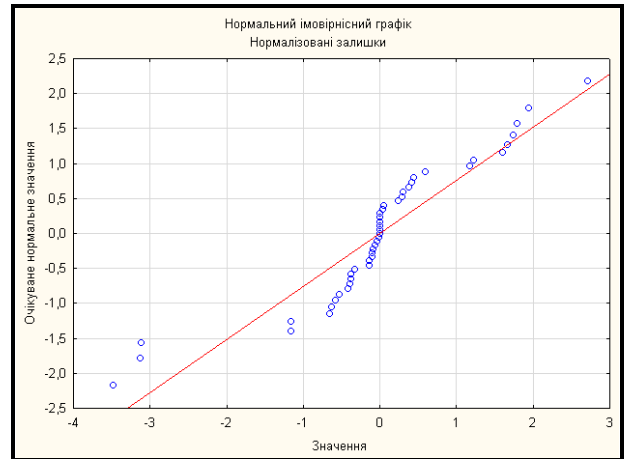
в



г



д



е

Рисунок 5.2 – Графічна інтерпретація кореляційного аналізу результатів підтверджуючого факторного аналізу: *a, в, д* – сталь 09Г2С; *б, г, е* – 10ХСНД після різних режимів зварювання

З рисунку 5.2 бачимо, що для сталі 09Г2С після автоматичного зварювання під шаром флюсу спостерігається незначне відхилення нормалізованих залишків.

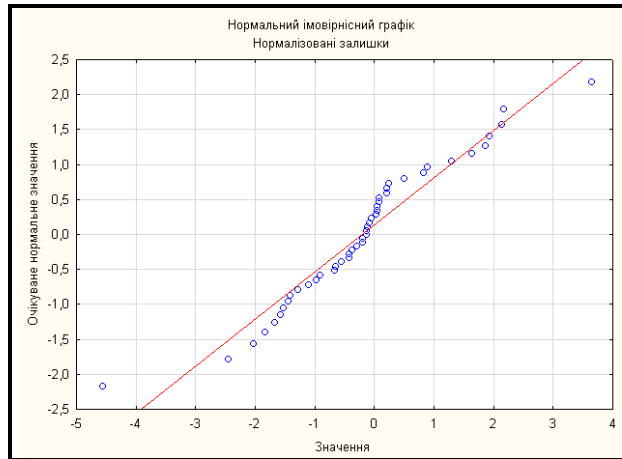
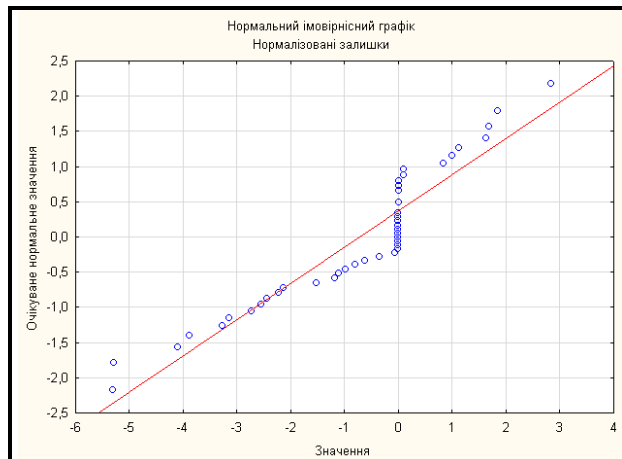
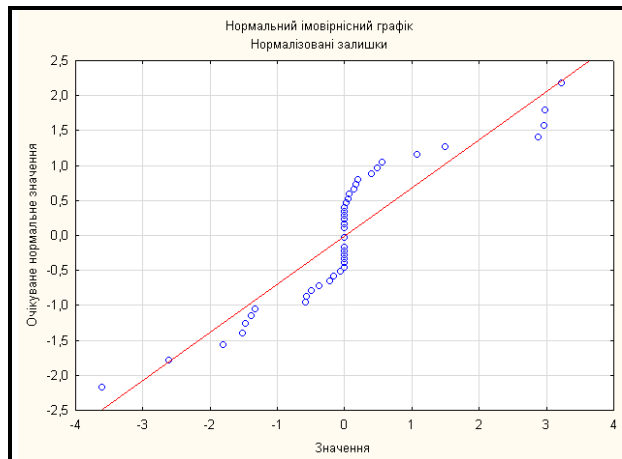
*a**б**в*

Рисунок 5.3 – Графічна інтерпретація кореляційного аналізу результатів підтверджуючого факторного аналізу сталі 10Г2ФБ: *a* – після лазерного зварювання; *б* – після електронно-променевого зварювання; *в* – після автоматичного зварювання під шаром флюсу

5.4. Моделювання структурними рівняннями

При моделюванні структурними рівняннями залежність між змінними та їх взаємозв'язок описується за допомогою діаграм шляхів, що пов'язують змінні лініями, які в свою чергу призначаються в якості відображення причинних зв'язків. Кожен шлях являє собою дві змінні, які мають вигляд прямокутника або овалу, що з'єднуються прямими лініями, які мають стрілку-показчик, а також лініями без стрілки – дугами. Змінні, зображені усередині прямокутника – вказують на явні змінні, які можна безпосередньо виміряти. Змінні, зображені усередині овалу – вказують на латентні змінні, які не можуть бути виміряні безпосередньо.

Стрілками та дугами відображають спрямовані та не спрямовані зв'язки між змінними, які можуть бути ендогенними та екзогенними. До ендогенних змінних відносять залежну змінну, до екзогенних – відносяться незалежні змінні. На діаграмах шляхів їх розрізняють наступним чином: ендогенні змінні мають хоча б одну стрілку, яка вказує на них, для екзогенних змінних вказуючі стрілки відсутні. Дугою на діаграмах шляхів позначається дисперсія незалежних змінних, яка задається для перевірки моделі структурних зв'язків. З метою отримання та пояснення всіх дисперсій та коваріацій на діаграмі шляхів, потрібно дотримуватися деяких вимог, а саме: всі дисперсії та коваріації на діаграмі повинні відображатися тільки між екзогенними змінними, та кожна змінна, яка присутня на діаграмі повинна входити хоча б в одне рівняння.

При побудові діаграми шляхів, виникають випадки, коли екзогенних змінних занадто багато, в результаті чого не вистачає місця для розташування необхідних стрілок. За допомогою правил визначення дисперсії та коваріацій за замовчуванням, що в свою чергу на діаграмі дають змогу неявно відобразити їх значну частину, є одним із методів вирішення цієї проблеми. До таких правил слід віднести [136-138]:

1. На діаграмі шляхів потрібно відображати: явні змінні – всередині квадрату, латентні – всередині овалу;
2. Направлений зв'язок між змінними відображати у вигляді стрілок;

3. Ненаправлений зв'язок відображати у вигляді дуги;
4. З'єднання між змінними у вигляді дуги може здійснюватися тільки для ендогенних змінних;
5. Всі вільні параметри, повинні бути виведені у вигляді чисел, та зображуватися вище стрілки або дуги;
6. Фіксовані значення повинні буди зображені у вигляді числа з плаваючою точкою;
7. У випадку, коли на діаграмі вказані різні імовірнісні простори, їх потрібно відділити словом, наприклад група 1, група 2, та розмежувальною лінією;
8. Дисперсії та коваріації для всіх екзогенних змінних повинні бути відображені у вигляді вільних параметрів, або фіксованих значень;
9. Для латентних змінних, у випадку, коли коваріації не будуть мати явного опису, вони будуть рівними 0; дисперсії у даному випадку будуть виражені фіксованими значеннями та рівними 1.0;
10. Явні екзогенні змінні представлені у вигляді вільних параметрів, де кожен із цих параметрів має свій номер.

Для перетворення діаграм шляхів у вигляд текстового файлу з розширенням (*.cmd), більш зрозумілому комп'ютеру, та для створення файлу моделі, був застосований комп'ютерний язык *PATHT1*.

Шляхи побудови моделі структурного моделювання наведено у Додатку Д.

Отримана модель діаграми шляхів приведена на рисунку 5.4.

Детальне пояснення щодо обраних змінних представлено пункті 5.1 розділу 5 даної роботи.

На рисунку 5.4 представлена діаграма шляхів умовно розділена на три частини, де перша та друга частина складається з двох умовних моделей вимірювання, де дві моделі використовується для вимірювання латентних екзогенних змінних, а третя для латентних ендогенних змінних. У центрі діаграми розташована структурна модель, знизу та зверху діаграми розташована модель вимірювання.

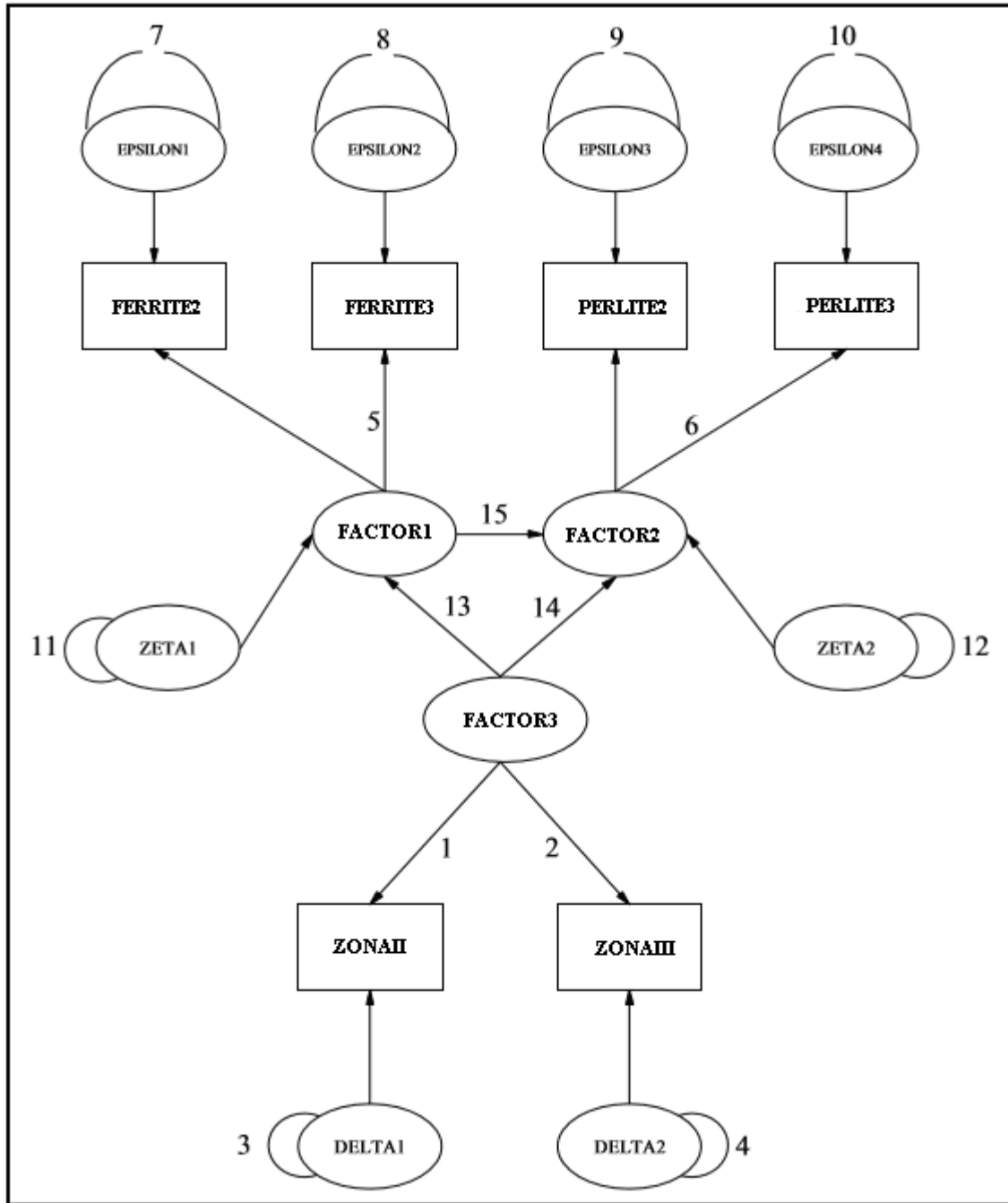


Рисунок 5.4 – Модель діаграма шляхів структурного моделювання

В нижній частині діаграми розташована модель, яка складається із двох явних змінних, а саме: ZONAII та ZONAIII, та з загального фактору FACTOR3. Дуги 3, 4 вказують на дисперсії змінних залишків, що відображено у вигляді DELTA1 та DELTA2. В верхній частині діаграми розташовані дві моделі, які мають загальні фактори FACTOR1 та FACTOR2, та навантажувальні змінні для FACTOR1: FERRITE2, FERRITE3; для FACTOR2: PERLITE2, PERLITE3. Також

представлена регресійна модель, яка відображає регресійну залежність між FACTOR3, FACTOR1 та FACTOR2.

Шлях із FACTOR3 до ZONAII та ZONAIИ, що показано стрілками із числовими значеннями 1 та 2, вказує на факторні навантаження FACTOR3 на ці змінні. В верхній частині діаграми стрілками 5 та 6 показано два факторних навантаження, а саме шлях із FACTOR1 до FERRITE3; та шлях із FACTOR2 до PERLITE3. Дугами 7-10 показані дисперсії змінних залишків верхньої частини діаграми, що відображено у вигляді EPSLON1 – EPSLON4, які надходять до FERRITE2, FERRITE3, PERLITE2, PERLITE3; дугами 11, 12 показані дисперсії залишків, які розташовані по центру діаграми, а саме: ZETA1, яка надходить до FACTOR1; та ZETA2 - до FACTOR2.

В дану діаграму шляхів були внесені незначні зміни, які представлено на рисунку 5.5.

Відмінність діаграми на рисунку 5.5 від діаграми на рисунку 5.4 полягає у додатковому корольованні залишків FERRITE2 та PERLITE2, що відображено дисперсією 16.

Шляхи побудови моделі структурними рівняннями корелюючих залишків наведено у Додатку Д.

Отримана модель діаграми шляхів корелюючих залишків структурного моделювання представлена на рисунку 5.5.

5.5. Аналіз результатів отриманої моделі діаграми шляхів структурними рівняннями

Скорочена оцінка результатів структурного моделювання для сталі 09Г2С приведена в таблиці 5.9., для сталі 10ХСНД в таблиці 5.10., для сталі 10Г2ФБ в таблиці 5.11. Повна оцінка результатів структурного моделювання приведена у Додатку Д таблиці Д.1-Д.3.

Аналогічно таблицям 5.1...5.3, 5.5...5.7 бачимо, що отримана строка одержаних результатів оцінки моделі аналізує кожен здійснений етап аналізу шляхів, який представлено на комп'ютерному язиці *PATH1* (Додаток Д).

В якості методу оцінки моделі був використаний узагальнений метод найменших квадратів → метод максимум правдоподібності (УМНК→МП).

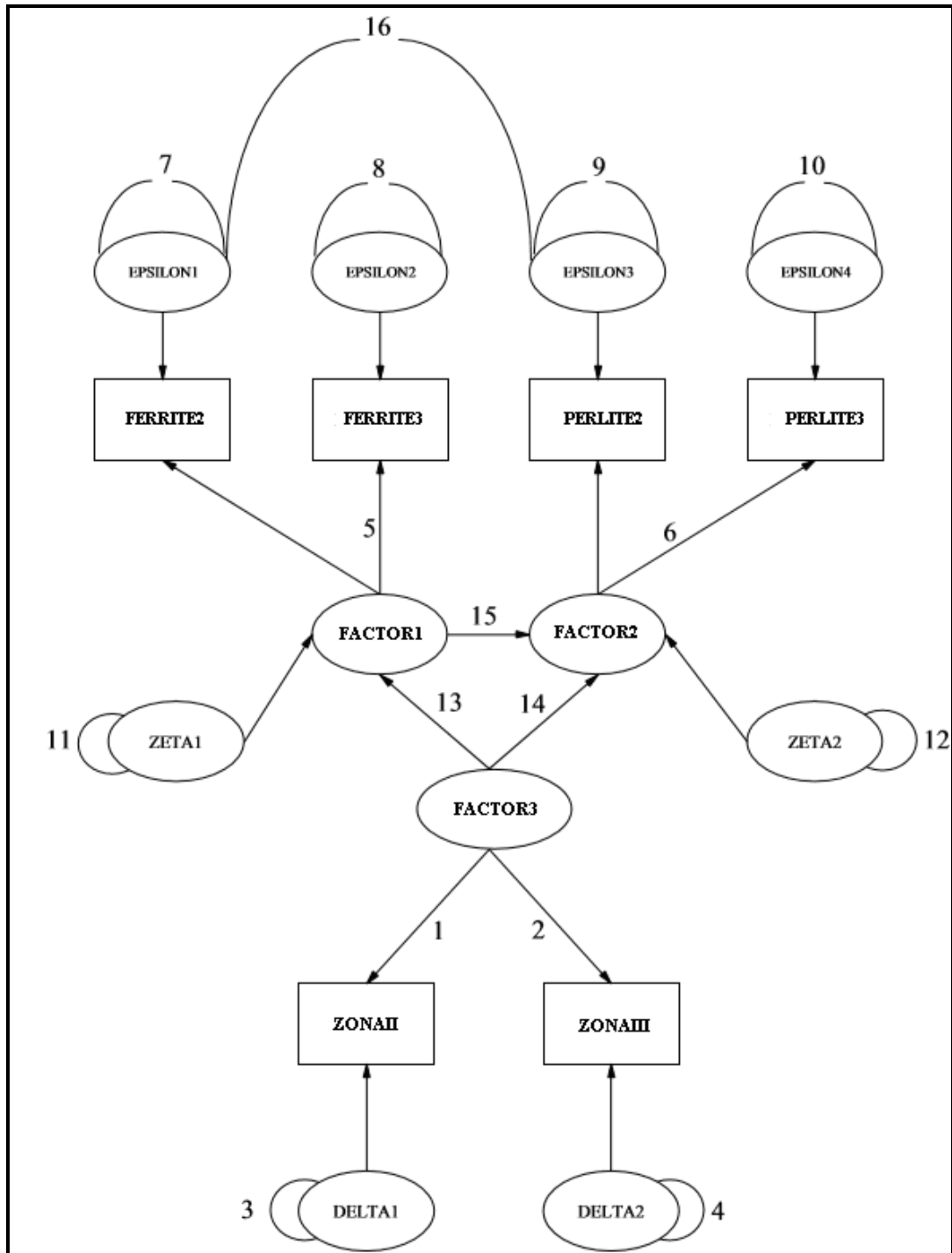


Рисунок 5.5 – Модель діаграма шляхів корелюючих залишків структурного моделювання

Таблиця 5.9 – Оцінка моделі діаграми шляхів структурними рівняннями для сталі 09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,030	0,082	-0,362	0,718
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,436	0,138	3,162	0,002
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	45,392	14,352	3,163	0,002
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,980	0,738	2,682	0,007
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,010	0,050	-0,196	0,844
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-2,280	0,923	-2,469	0,014
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	11,662	6,256	1,864	0,062
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,256	0,081	3,162	0,002
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,101	0,133	-0,756	0,450
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-0,934	0,800	-1,167	0,243
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,435	0,557	0,781	0,435
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,537	1,248	1,232	0,218
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	5,000	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-3,269	2,688	-1,216	0,224
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,185	0,058	-3,162	0,002
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,035	0,324	0,107	0,915
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,192	0,162	1,187	0,235
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,400	0,805	0,497	0,619
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,577	1,265	-0,456	0,648
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	1,124	0,594	1,893	0,058
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,292	0,167	1,752	0,080

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.4.

Таблиця 5.10 – Оцінка моделі діаграми шляхів структурними рівняннями для сталі після різних 10XCHД режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,095	0,069	1,383	0,167
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,244	0,141	1,733	0,083
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-2,525	2,324	-1,086	0,277
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	3,258	2,795	1,166	0,244
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,929	0,819	-1,135	0,256
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,292	1,111	0,262	0,793
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	1,174	0,000	-	-
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,085	0,046	-1,859	0,063
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,374	0,118	3,162	0,002
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,476	0,099	4,811	0,000
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	-0,112	1,277	-0,087	0,930
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,461	1,494	0,978	0,328
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,060	1,041	0,057	0,954
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,341	0,312	-1,093	0,274
Автоматичне зварювання під шаром флюс				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,075	0,032	-2,322	0,020
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,828	0,262	3,162	0,002
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	1,043	0,261	3,993	0,000
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,202	0,663	1,814	0,070
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,151	0,895	1,287	0,198
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,058	0,579	0,100	0,921
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,810	0,336	2,413	0,016

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.4.

Таблиця 5.11 – Оцінка моделі діаграми шляхів структурними рівняннями для сталі після різних 10Г2ФБ режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,116	0,040	2,935	0,003
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,078	0,069	1,128	0,259
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,437	0,397	1,103	0,270
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,734	0,385	1,909	0,056
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-2,973	1,575	-1,888	0,059
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-3,167	2,112	-1,499	0,134
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,074	0,287	-0,256	0,798
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,100	0,018	-5,511	0,000
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,085	0,226	0,375	0,708
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,138	0,906	0,152	0,879
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,105	0,152	7,268	0,000
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-1,802	0,493	-3,652	0,000
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	6,661	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	3,524	0,637	5,537	0,000
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,103	0,043	2,381	0,017
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,011	0,397	-0,028	0,978
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	1,284	0,513	2,506	0,012
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,400	1,496	0,936	0,349
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,818	1,435	1,964	0,050
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,453	1,172	-0,386	0,699
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,651	0,000	-	-

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.4.

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.

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.

Бачимо, що всі коефіцієнти коваріації між факторами та вихідними змінними значимі при рівні значущості $p = 0$. T -статистика відображає значення критерію для гіпотези, що значення параметра дорівнює нулю.

В таблиці 5.12 наведено результати структурного моделювання

Аналогічно таблицям 5.4, 5.8 функція незгоди відображає кінцеве значення, що приймається до допомогою функції незгоди.

Значення критерію УУПММ (критерій стійкості до множення на постійний множник масштабу) повинно бути близьким до нуля.

Критерій УИМ (критерій стійкості до зміни масштабу) також повинен бути близький до нуля.

По даним таблиці 5.12 бачимо, що умови повністю відповідають критерію УУПММ та критерій УИМ.

За критерієм χ^2 -квадрата оцінюється розбіжність між вихідною та відтвореною кореляційною матрицею.

Максимум косинуса залишків при умові, коли процес ітерації зійшовся, даний критерій буде становити значення близьке нулю. Отримані результати відповідають даним умовам.

Таблиця 5.12 – Оцінка результатів структурного моделювання для сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

Критерії оцінки	Сталь 09Г2С			Сталь 10ХСНД			Сталь 10Г2ФБ		
	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу
Функція незгоди	35,3	36,8	35,9	38,4	35,6	36	34,5	37,1	36,7
Критерій УУПММ	0,00579	2,15E-005	2,01E-006	-1,97E-007	4,9E-008	3,46E-008	-2,34E-007	0,172	3,31E-008
Критерій УИМ	0,00571	1,97E-005	1,41E-006	7,49E-005	3,75E-006	3,63E-005	5,05E-005	0,172	2,97E-008
Хі-квадрат	176,482	183,87	179,378	191,928	177,752	180,094	172,283	185,564	183,53
Число ступенів свободи	8	7	6	7	6	6	6	7	7
Максимум косинуса залишків	0,416	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000

5.6. Аналіз результатів отриманої моделі діаграми шляхів корелюючих залишків

Скорочена оцінка отриманих результатів структурного моделювання для сталі 09Г2С приведена в таблиці 5.13, для сталі 10ХСНД в таблиці 5.14, для сталі 10Г2ФБ в таблиці 5.15. Загальна оцінка отриманих результатів приведена у Додатку Д таблиці Д.4-Д.6.

Оцінка результатів структурного моделювання для сталі 09Г2С приведена в таблиці 5.9, для сталі 10ХСНД в таблиці 5.10, для сталі 10Г2ФБ в таблиці 5.11.

Аналогічно таблицям 5.1...5.3, 5.5...5.7, 5.9...5.11 бачимо, що отримана строка одержаних результатів оцінки моделі аналізує кожен здійснений етап аналізу шляхів, який представлено на комп'ютерному язиці *PATH1* (Додаток Д).

В якості методу оцінки моделі був використаний узагальнений метод найменших квадратів → метод максимум правдоподібності (УМНК→МП).

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.

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.

Бачимо, що всі коефіцієнти коваріації між факторами та вихідними змінними значимі при рівні значущості $p = 0$. T -статистика відображає значення критерію для гіпотези, що значення параметра дорівнює нулю.

В таблиці 5.16 наведено результати структурного моделювання моделі шляхів корелюючих залишків

Аналогічно таблицям 5.4, 5.8, 5.12 функція незгоди відображає кінцеве значення, що приймається до допомогою функції незгоди.

Таблиця 5.13 – Оцінка моделі діаграми шляхів кореляючих залишків для сталі 09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,030	0,082	-0,362	0,718
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,436	0,138	3,162	0,002
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	26,491	0,000	-	-
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,790	0,680	2,630	0,009
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,019	0,083	-0,224	0,823
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-2,487	1,059	-2,348	0,019
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	10,959	8,470	1,294	0,196
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-2,427	2,610	-0,930	0,352
Електронно-променеове зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,189	0,098	1,918	0,055
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,243	0,114	-2,128	0,033
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-3,977	1,881	-2,114	0,035
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	4,210	5,561	0,757	0,449
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	0,498	0,218	2,288	0,022
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,896	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	2,627	0,000	-	-
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-0,126	1,937	-0,065	0,948
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,090	0,037	2,412	0,016
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,176	0,120	1,465	0,143
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,024	0,042	0,557	0,578
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,441	0,275	1,604	0,109
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,812	0,000	-	-
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-24,623	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	8,096	0,079	102,834	0,000
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	6,909	0,000	-	-

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.5.

Таблиця 5.14 – Оцінка моделі діаграми шляхів кореляючих залишків для сталі
10ХСНД режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,106	0,068	1,559	0,119
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,299	0,135	2,217	0,027
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-15,191	59,093	-0,257	0,797
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,466	0,672	2,182	0,029
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,098	0,393	-0,249	0,803
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,753	0,391	-1,929	0,054
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	4,782	20,474	0,234	0,815
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-1,720	1,185	-1,452	0,147
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,104	0,042	-2,493	0,013
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,304	0,138	2,212	0,027
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,476	0,099	4,816	0,000
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	-0,098	0,120	-0,818	0,413
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,234	1,631	0,757	0,449
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-3,606	1,056	-3,415	0,001
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,045	0,425	0,105	0,916
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-4,742	0,000	-	-
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,080	0,029	-2,723	0,006
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,790	0,253	3,126	0,002
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,731	0,000	-	-
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	2,397	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,052	0,073	14,490	0,000
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,227	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,402	0,000	-	-
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	1,813	0,000	-	-

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунок 5.5.

Таблиця 5.15 – Оцінка моделі діаграми шляхів кореляючих залишків для сталі 10Г2ФБ режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Умовні позначення (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,117	0,040	2,949	0,003
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,072	0,070	1,035	0,301
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,457	0,448	1,020	0,308
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,725	0,380	1,907	0,056
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-2,892	1,561	-1,853	0,064
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,410	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,887	0,805	1,101	0,271
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-4,938	4,886	-1,011	0,312
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,014	0,040	-0,340	0,734
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,510	0,161	3,162	0,002
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-1,522	0,546	-2,790	0,005
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,015	0,079	12,811	0,000
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,089	1,072	1,949	0,051
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	3,866	1,891	2,044	0,041
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,482	0,660	-0,731	0,465
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	2,516	1,649	1,526	0,127
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,121	0,038	3,162	0,002
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,384	0,378	-1,017	0,309
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	1,289	0,516	2,498	0,012
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,974	0,771	1,263	0,206
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,389	1,386	1,723	0,085
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	3,062	1,333	2,297	0,022
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,418	0,355	-1,177	0,239
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-0,225	1,242	-0,181	0,856

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.5.

Значення критерію УУПММ (критерій стійкості до множення на постійний множник масштабу) повинно бути близьким до нуля. Критерій УИМ (критерій стійкості до зміни масштабу) також повинен бути близький до нуля. По даним таблиці 5.16 бачимо, що умови повністю відповідають критерію УУПММ та критерій УИМ. За критерієм χ^2 -квадрата оцінюється розбіжність між вихідною та відтвореною кореляційною матрицею. Максимум косинуса залишків при умові, коли процес ітерації зійшовся, даний критерій буде становити значення близьке до 0.

Графічну інтерпретацію кореляційного корелюючих залишків представлено на рисунку 5.6, 5.7.

Умовні позначення рисунку 5.6:

a – сталь 09Г2С після лазерного зварювання;

б – сталь 10ХСНД після лазерного зварювання;

в – сталь 09Г2С після електронно-променевого зварювання;

г – сталь 10ХСНД після електронно-променевого зварювання;

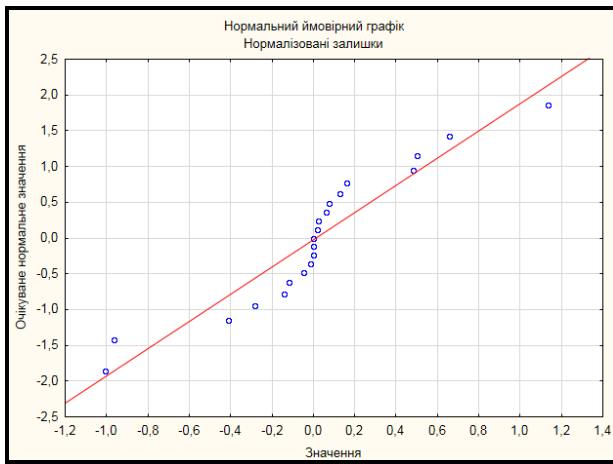
д – сталь 09Г2С після автоматичного зварювання під шаром флюсу;

е – сталь 10Г2ФБ після автоматичного зварювання під шаром флюсу.

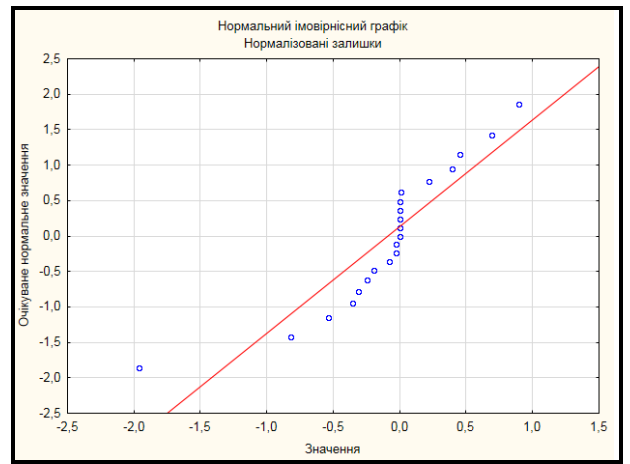
Аналіз отриманих даних показує, що залишки лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу [169].

Таблиця 5.16 – Оцінка результатів структурного моделювання корелюючих залишків для сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

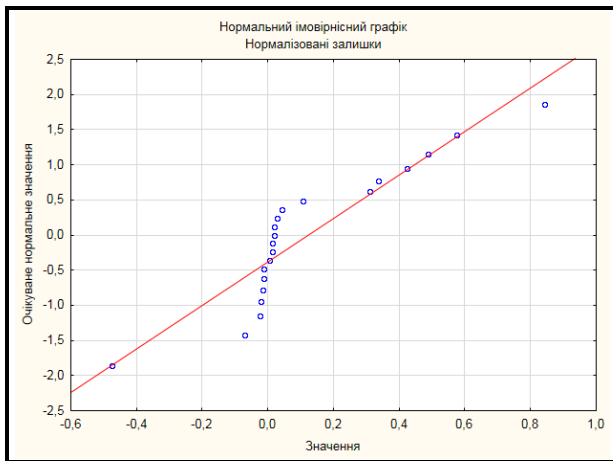
Критерії оцінки	Сталь 09Г2С			Сталь 10ХСНД			Сталь 10Г2ФБ		
	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу	Лазерне зварювання	Електронно променеве зварювання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу
Функція незгоди	35,2	34,9	34	37	33,4	28,8	34,3	37	35,2
Критерій УУПММ	-0,0586	0,0158	0,468	-0,00379	0,0259	0,039	-7,21E-008	0,00255	1,23E-007
Критерій УИМ	0,0532	0,0231	1,35	0,0507	0,705	6,53	5,23E-005	0,13	0,00155
Хі-квадрат	175,769	174,368	169,846	184,764	167,063	143,762	171,346	184,949	176,119
Число ступенів свободи	6	7	9	5	7	12	6	5	5
Максимум косинуса залишків	0,007	0,001	0,400	0,015	0,076	0,048	0,000	0,013	0,000



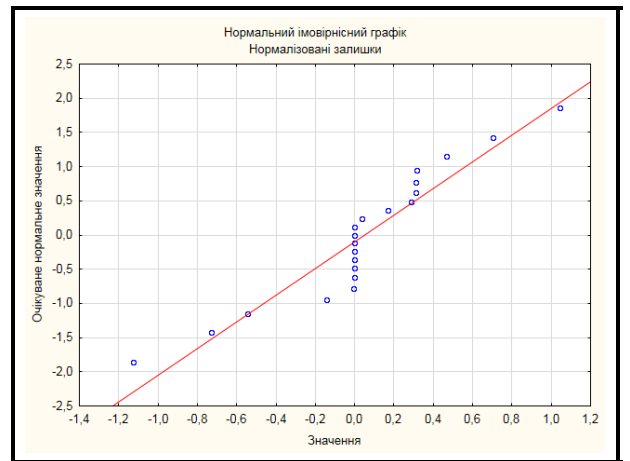
a



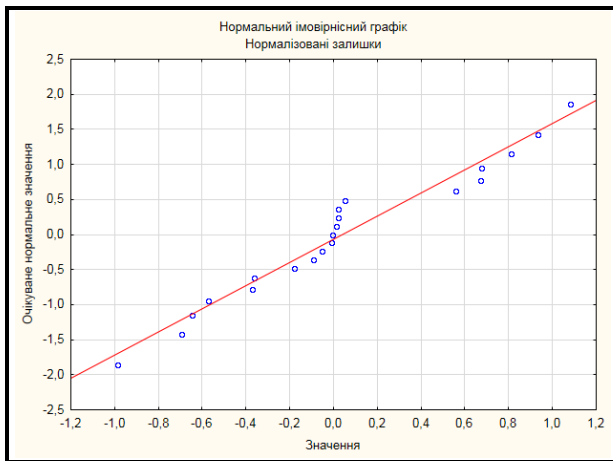
б



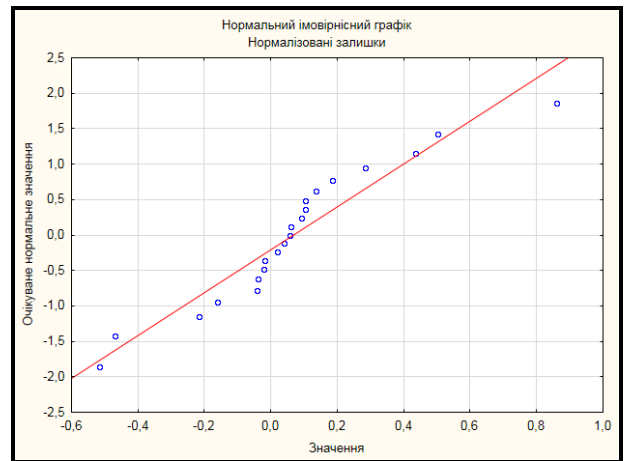
в



г



д



е

Рисунок 5.6 – Графічна інтерпретація корелюючих залишків: *a, в, д* – сталь 09Г2С;
б, г, е – 10ХСНД після різних режимів зварювання

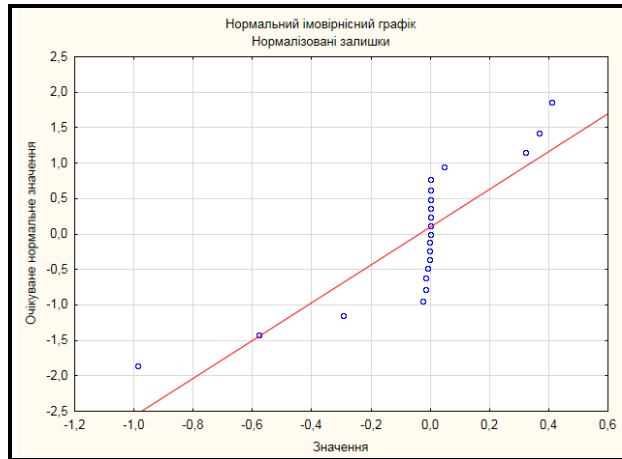
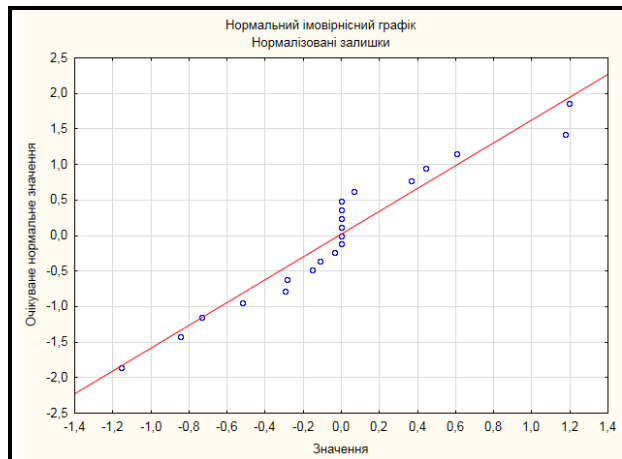
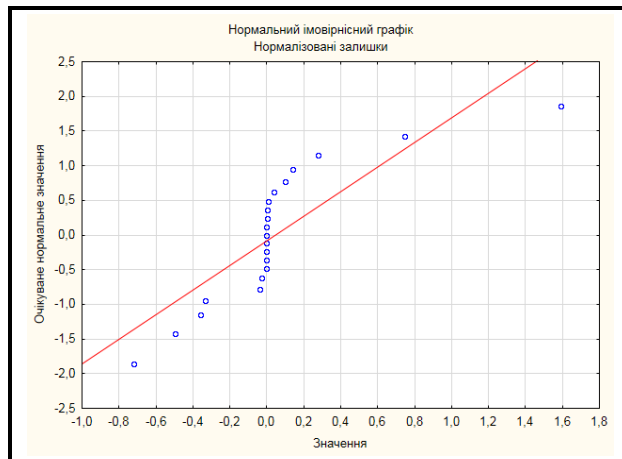
*a**б**в*

Рисунок 5.7 – Графічна інтерпретація корелюючих залишків сталі 10Г2ФБ: *a* – після лазерного зварювання; *б* – після електронно-променевого зварювання; *в* – після автоматичного зварювання під шаром флюсу

5.7. Імітаційне моделювання методом Монте-Карло

Процес функціонування складної системи можна розглядати як зміну її стану, описуючи її фазовими змінними $Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_n(t)$ в n – мірному просторі.

Задачі імітаційного моделювання являють собою напівпричіпні тракторії руху, що розглядають систему в n - мірному просторі (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) , а також виділяють деякі показники, залежні від вихідних сигнальних систем та визначають їх властивості.

У якості математичного методу імітаційного моделювання у даній роботі використовувався метод статистичного моделювання.

Метод статистичного моделювання спочатку розвивався як метод статистичних випробувань (Монте-Карло). Це - чіткий метод, що складається в одержанні оцінки ймовірності характеристик, відповідальних за вирішення аналітичних завдань (наприклад, з рішенням рівнянь та обчислення певного інтегралу). Останнім часом цей метод застосовується для імітації процесів, що виникають у системах, всередині яких є однакові випадковості або які підпорядковані випадковим взаємодіям. Він отримав назву методу статистичного моделювання. Суть методу полягає в наступному: для цільової випадкової величини генерується набір випадкових значень, а потім на його основі розраховуються необхідні значення.

Метод Монте-Карло має безліч різних додатків. Він застосовується в наступних областях: в промисловості для моделювання мінливості виробничих процесів; у фізиці, хімії та біології для моделювання різноманітних явищ; в області ігор для моделювання штучного інтелекту, наприклад, в китайській грі го; в області фінансів для оцінки похідних фінансових інструментів і опціонів. По суті, метод Монте-Карло використовується скрізь.

Сучасний варіант методу сформувався в рамках Манхеттенського проекту, де він застосовувався для моделювання відстаней, які можуть пройти нейтрони в різних матеріалах. Ідея моделювання на основі генерації набору випадкових значень існувала вже протягом деякого часу, але особливий розвиток отримала

при створенні атомної бомби, поширившись потім у багатьох інших областях знань.

Імітаційне моделювання методом Монте-Карло здійснено по вихідним даним підтверджуючого факторного аналізу, який представлено у пункті 5.2, 5.3 даної роботи, але з іншою будовою моделі, яку надано на комп'ютерному язиці *RATN1* у Додатку Е.

У процесі моделювання за допомогою методу Монте-Карло зазначено параметри: зімітована модель має всі факторні навантаження рівними 6, всі дисперсії 64, кореляції між факторами дорівнюють нулю. Було сгенеровано виборку з коваріаційною матрицею, відповідні цим значенням. Максимальна кількість ітерацій становила 150.

Отримані результати для сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання наведено у таблиці 5.17.

Було отримано інтерпретацію ЧАОН, що являє собою числа граничних умов після завершення процесу ітерації. Дані наведено на рисунку 5.7.

Графічну інтерпретацію числа граничних умов наведено на рисунку 5.8.

Гістограма рисунку 5.8 для лазерного зварювання показує, що в 3 реалізаціях з 50 не виникає граничних умов (змінна ЧАОН приймає значення 0), в 25 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 1, в 14 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 2, в 7 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 3, в 1 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 4.

Для електронно-променевого зварювання гістограма показує, що в 6 реалізаціях з 50 не виникає граничних умов (змінна ЧАОН приймає значення 0), в 16 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 1, в 17 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 2, в 11 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 3.

Для автоматичного зварювання під шаром флюсу в 5 реалізаціях з 50 не виникає граничних умов (змінна ЧАОН приймає значення 0), в 19 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 1, в 15 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 2, в 9 реалізаціях змінна ЧАОН приймає значення 3.

Таблиця 5.17 – Результати Монте-Карло для сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання									
Результати Монте-Карло	PERLITE	PERLITE	PERLITE	FERRITE	FERRITE	FERRITE	ZONA	ZONA	GRZON
	2	3	4	2	3	4	II	III	
СЕРЕДНЄ спостер. 1-50	0,4885013	0,56987036	0,58503095	0,61424878	0,58946403	0,57427057	0,5135094	0,63026	0,554322
МЕДІАНА спостер. 1-50	0,5411630	0,66406445	0,66557415	0,58571803	0,60139131	0,59944310	0,5881508	0,60480	0,56681
Станд. відх. спостер. 1-50	0,3374716	0,36971815	0,38626766	0,25068409	0,29651084	0,27252521	0,3298608	0,28369	0,291304
№ спостер. 1-50	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,0000	50,00000
СУМА спостер. 1-50	24,425067	28,493516	29,251547	30,712439	29,473201	28,713528	25,675472	31,5133	27,71614
МІН. спостер. 1-50	-0,2083486	-0,43790639	-0,83192427	0,00000000	0,00000000	0,00000000	-0,290110	0,00000	-0,01104
МАКС. спостер. 1-50	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,00000	1,000000
_25 % спостер. 1-50	0,2554796	0,33808891	0,34807404	0,45869282	0,37713332	0,41777046	0,2876843	0,44017	0,399487
_75 % спостер. 1-50	0,6535462	0,85758658	1,00000000	0,77286393	0,80618109	0,77195431	0,7480357	0,89671	0,729988
Електронно-променево зварювання									
Результати Монте-Карло	PERLITE	PERLITE	PERLITE	FERRITE	FERRITE	FERRITE	ZONA	ZONA	GRZON
	2	3	4	2	3	4	II	III	
СЕРЕДНЄ спостер. 1-50	0,5714901	0,57117545	0,58169565	0,60451567	0,58534916	0,53748604	0,5238579	0,60436	0,496567
МЕДІАНА спостер. 1-50	0,5691713	0,59675375	0,59331547	0,62604660	0,60393990	0,54355123	0,6022654	0,63592	0,53782
Станд. відх. спостер. 1-50	0,2773588	0,3108656	0,2929029	0,34415358	0,32629946	0,34344275	0,3514015	0,35213	0,368474
№ спостер. 1-50	50,00000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,0000	50,00000
СУМА спостер. 1-50	28,574507	28,558772	29,084782	30,225783	29,26745	26,874302	26,192899	30,2182	24,82835

Продовження таблиці 5.17

Електронно-променеє зварювання									
Результати Монте-Карло	PERLITE	PERLITE	PERLITE	FERRITE	FERRITE	FERRITE	ZONA	ZONA	GRZON
	2	3	4	2	3	4	II	III	
МІН. спостер. 1-50	0,000000	-0,11446343	0,00000000	-0,37532043	-0,19648638	-0,80343101	-0,372227	-0,6930	-0,36480
МАКС. спостер. 1-50	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,000000	1,00000	1,000000
_25 % спостер. 1-50	0,3841621	0,3908318	0,3611088	0,3729812	0,3323513	0,3385614	0,2683958	0,39375	0,344300
_75 % спостер. 1-50	0,7738736	0,8341337	0,7753712	1,0000000	0,8973242	0,7591026	0,7598995	0,92736	0,800964
Автоматичне зварювання під шаром флюсу									
Результати Монте-Карло	PERLITE	PERLITE	PERLITE	FERRITE	FERRITE	FERRITE	ZONA	ZONA	GRZON
	2	3	4	2	3	4	II	III	
СЕРЕДНЄ спостер. 1-50	0,5291813	0,54835506	0,64534412	0,55944402	0,59398586	0,52781458	0,6008994	0,54789	0,614235
МЕДІАНА спостер. 1-50	0,5535378	0,60806851	0,67662098	0,54846360	0,58434136	0,4946001	0,5474777	0,49955	0,692855
Станд. відх. спостер. 1-50	0,3397647	0,3122065	0,31411826	0,3243918	0,3019202	0,3622169	0,3057236	0,30860	0,327918
№ спостер. 1-50	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000	50,0000	50,00000
СУМА спостер. 1-50	26,45906	27,417753	32,267206	27,972201	29,699293	26,390729	30,044972	27,3945	30,71174
МІН. спостер. 1-50	-0,473608	-0,237282	-0,285071	-0,264812	0,00000	-0,923799	-0,076062	-0,01104	-0,04423
МАКС. спостер. 1-50	1,000000	1,000018	1,000026	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,00000	1,0000
_25 % спостер. 1-50	0,364634	0,337006	0,477272	0,311514	0,316909	0,338478	0,425322	0,29631	0,366649

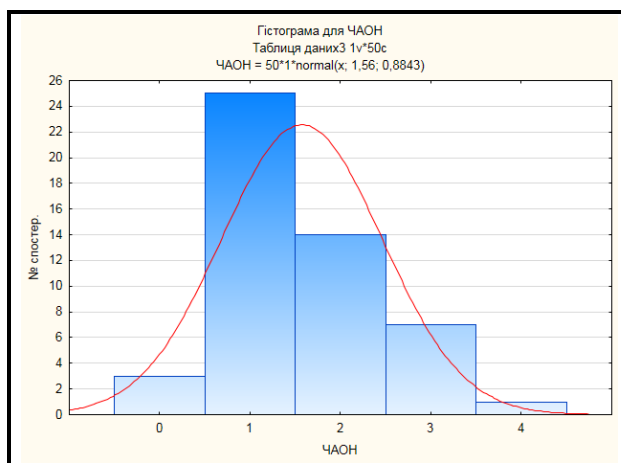
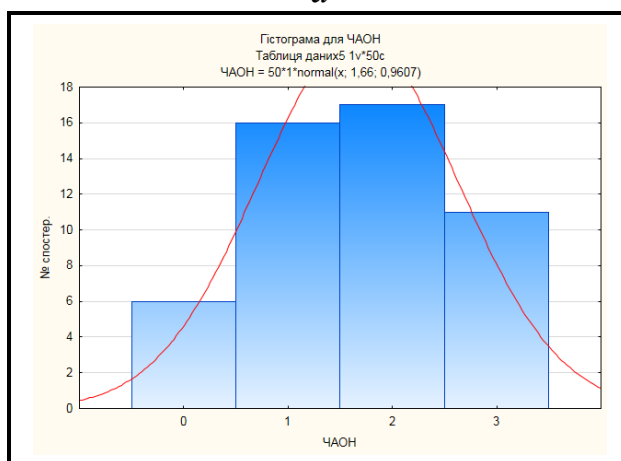
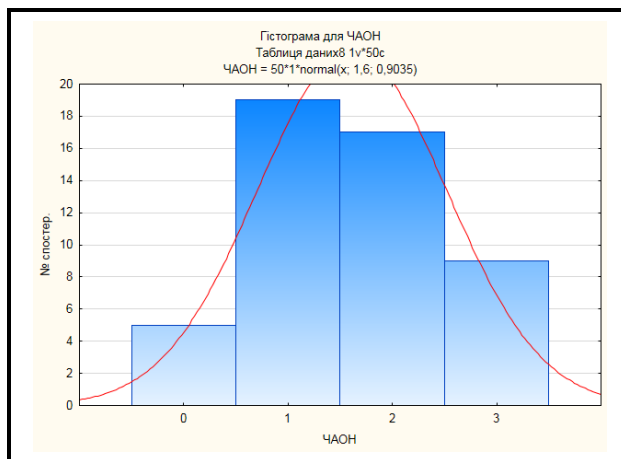
*a**б**в*

Рисунок 5.8 – Гістограма числа граничних умов сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ: *a* – після лазерного зварювання; *б* – після електронно-променевого зварювання; *в* – після автоматичного зварювання під шаром флюсу

5.8. Висновки по розділу 5

У даному розділі було здійснено дослідження процесу зварювання із застосуванням математичного моделювання структурними рівняннями, використовуючи програмний комплекс STATSOFT STATISTICA 10.0.

1. Перший метод – підтверджуючий факторний аналіз. У даному випадку було побудовано діаграму шляхів, де відображено дослідження трьох факторів, а також побудована модель діаграми шляхів у вигляді комп'ютерного мови *PATH1*. В якості змінних використовувались відсотковий вміст структурних складових фериту та перліту, а також геометричні розміри ділянок зварного з'єднання зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ для різних режимів зварювання. Проведено коваріаційний та кореляційний аналіз отриманих даних, де були отримані результати, які аналізують кожен шлях моделі, також були побудовані імовірнісні графіки нормалізованих залишок для всіх досліджувальних сталей при різних режимах зварювання.
2. Другий метод – це моделювання структурними рівняннями. При дослідженні даним методом було побудовано дві діаграми шляхів, де перша діаграма шляхів відображала шляхи без корельованих залишків, друга діаграма відображає корельовані залишки FERRITE2 та PERLITE2, що відображено дисперсією 16. Аналогічно першому методу для кожної діаграми шляхів побудована модель у вигляді комп'ютерного мови *PATH1*, та побудовані імовірнісні графіки нормалізованих залишок.
3. Проаналізувавши два методи дослідження, можемо зазначити, що побудовані моделі є адекватними. Про що свідчить те, що: показники отриманих критеріїв відповідають достовірності, а саме, отримані критерії УУПММ та УИМ приближені до нуля; імовірнісний рівень близький до 1; максимальне значення косинуса залишків приближено до нуля; коефіцієнти між коваріаціями (кореляціями) та вихідні дані

значимі на рівні $p=0$; число ступенів свободи відповідають параметрам, що підтверджує адекватність моделі структурних рівнянь.

4. У процесі моделювання за допомогою методу Монте-Карло було зазначено такі параметри: зімітована модель має всі факторні навантаження рівними 6, всі дисперсії 64, кореляції між факторами дорівнюють нулю. Стандартне відхилення при проведених 50 ітераційних процесів відповідає заданим умовам.
5. Проведений фізико-математичний аналіз взаємозв'язку між параметрами зварювання та критерієм оцінки структурного стану показав, що на якість зварного з'єднання в першу чергу впливає енергія тепло вкладання при зварюванні, яка забезпечує формування різних за геометричними розмірами та структурним станом зон зварного з'єднання, як наслідок, якість зварного з'єднання може забезпечуватися шляхом регулювання енергетичного впливу, тобто, вибором режиму зварювання з урахуванням матеріалу, та конкретних режимів експлуатації готових виробів.

5.9. Список використаних джерел в розділі 5

У розділі 5 використані джерела [136-138, 169]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано нове вирішення наукової задачі кількісного аналізу структурного стану зварювання з'єднань низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, що відображено у висновках:

1. Проведений аналіз літературних джерел показав, що на теперішній час, серед поширених видів з'єднання будівельних металоконструкцій зварювання є одним із найбільш універсальних і дієвих методів отримання нероз'ємних з'єднань. При цьому, якість зварних з'єднань у більшості випадків можливо контролювати в готових виробках шляхом застосування руйнівних і не руйнівних методів контролю. З іншого боку, вирішення складних задач проектування багатопверхових споруд та споруд, відповідного призначення потребує визначення властивостей зварного з'єднання вже на стадії розробки проектних документацій. Одним із можливих шляхів вирішення даної задачі, є імітаційне фізико-математичне моделювання процесів зварювання з урахуванням матеріалів, які для цього використовуються.
2. В роботі використано сучасні методи дослідження структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання, а саме: лазерного зварювання, електронно-променевого зварювання, та автоматичного зварювання під шаром флюсу.
3. З метою аналізу залежностей між параметрами структурного стану та режимами зварювання було використано сучасні методи фізико-математичного моделювання, а саме: факторний аналіз; регресійний аналіз; кореляційний аналіз; моделі структурних рівнянь; підтверджуючий факторний аналіз; аналіз за допомогою методу Монте-Карло.
4. Проведено дослідження структурного стану зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після

лазерного зварювання, електронно-променевого зварювання, та після зварювання під шаром флюсу.

5. Встановлено, що при зварюванні під шаром флюсу на границі між зварним швом та зоною термічного впливу, а також у зоні термічного впливу через підвищену швидкість охолодження для сталей 10ХСНД спостерігається поява відменштетового фериту та дрібних колоній квазієвтектоїду. Для сталі 10Г2ФБ в структурі спостерігається поява бейнітної складової, що обумовлено перерозподілом вуглецю та появи збіднених вуглецем локальних областей аустеніту.
6. Проведено кількісний аналіз структурного стану для всіх досліджувальних марок сталі після різних режимів зварювання. Аналіз отриманих результатів показує, що при лазерному зварюванні для сталей 09Г2С та 10Г2ФБ спостерігається найменша ширина зварного шва, та границя між зварним швом та зоною термічного впливу. Для сталей 10ХСНД найбільші розміри шва та розміри між границею шва та зоною термічного впливу були отримані при електронно-променевому зварюванні. Це свідчить про те, що лазерне та електронно-променеве зварювання стосовно досліджувальних марок сталі характеризуються більш низьким ступенем механічних напружень в зоні зварного з'єднання та зоні термічного впливу, що позитивно впливає на якість з'єднання та механічні властивості всього металу.
7. Кількісний аналіз відсоткового вмісту структурних складових показав, що при зварюванні під шаром флюсу для сталей 09Г2С на границі зварний шов- зона термічного впливу, у зоні термічного впливу та на границі між зоною термічного впливу та основним металом, відсотковий вміст феритної складової становить 60%, зменшення відсоткового вмісту фериту для структурних складових не спостерігається, при цьому, вміст перлітної складової становить 40% для всіх з 2-4 ділянки, при інших режимах зварювання вміст перлітної складової збільшено. При лазерному зварюванні для сталей 10ХСНД та 10Г2ФБ відсотковий вміст феритної

складової в зоні термічного впливу та на границі зони термічного впливу - основний метал збільшується, а вміст перлітної складової зменшується. При електронно-променевому зварюванні та при зварюванні під шаром флюсу навпаки, в досліджувальних ділянках спостерігається відсоткове збільшення перлітної та зменшення феритної складової. Виходячи з цього, слід зазначити, що, при лазерному зварюванні, та при зварюванні під шаром флюсу для відповідних марок сталі, за рахунок збільшення відсоткового вмісту феритної складової, а для сталі 10Г2ФБ ще й бейнітної складової призводить до підвищення міцності, ударної в'язкості та пластичності сталі. При збільшенні відсоткового вмісту перлітної складової спостерігається зменшення пластичності та ударної в'язкості металу.

8. Проведений комплекс досліджень показав, що при зварюванні під шаром флюсу для зразків зі сталі 09Г2С та 10ХСНД на границі між зварним швом та зоною термічного впливу середній розмір феритного зерна буде найменшим, порівняно з іншими режимами зварювання, та починаючи з 2 ділянки розмір феритного зерна зменшується. При лазерному та електронно-променевому зварюванні для сталі 10Г2ФБ на границі зварний шов та зона термічного впливу спостерігається найменший середній розмір феритного зерна, з подальшим його зменшенням в структурних складових. Слід зауважити, зменшення розміру феритної складової призводить до значного підвищення механічних характеристик всього металу.
9. Проведений комплекс металографічних досліджень показав, що в зварних з'єднань в наслідок локального тепло вкладання формується структурний стан, який характеризується елементами, характерними як для литого, так і для рекристалізованого та швидкоохолодженого металопрокату. Як наслідок, найбільш небезпечними зонами (з точки зору зародження дефектів) є приграничні зони зварного з'єднання, а саме: границя шов – зона термічного впливу, та границя зона термічного впливу – основний

метал. В цих зонах спостерігається певна різноструктурність, яка призводить до підвищення рівня внутрішніх мікронапружень, і як наслідок підвищення рівня внутрішньої енергії, і можливого зародження руйнування.

- 10.3 застосуванням математичних апаратів кореляційного, регресійного та факторного аналізу проаналізовано взаємозв'язок між параметрами процесу зварювання та структурним станом матеріалу для зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання;
- 11.В ході виконання роботи запропоновано алгоритм застосування факторного аналізу для вирішення прикладних задач матеріалознавства зокрема аналізу структурного стану для зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання.
- 12.На підставі даних кількісної оцінки, результати металографічних досліджень обрано змінні, які характеризують структурний стан зварного з'єднання досліджувальних марок сталі.
- 13.3 застосуванням математичного апарату факторного аналізу здійснено групування факторів та групування змінних у фактори, та отримано відповідні якісні залежності;
- 14.На підставі критеріїв факторного аналізу виконано скорочену кількість факторів. Дану операцію було проаналізовано з застосуванням методів варімакс, квартімакс, еквімакс.
- 15.В результаті проведеного комплексу досліджень встановлено, що найбільш значущими змінними при аналізі структурного стану зварних з'єднань після різних режимів зварювання є відсотковий розподіл феритної та перлітної структурної складової, геометричні розміри зон зварного з'єднання.
- 16.Здійснено дослідження процесу зварювання із застосуванням математичного моделювання структурними рівняннями, використовуючи програмний комплекс STATSOFT STATISTICA 10.0.

17. Перший метод – підтверджуючий факторний аналіз. У даному випадку було побудовано діаграму шляхів, де відображено дослідження трьох факторів, а також побудована модель діаграми шляхів у вигляді комп'ютерного мови *PATN1*. В якості змінних використовувались відсотковий вміст структурних складових фериту та перліту, а також геометричні розміри ділянок зварного з'єднання зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ для різних режимів зварювання. Проведено коваріаційний та кореляційний аналіз отриманих даних, де були отримані результати, які аналізують кожен шлях моделі, також були побудовані імовірнісні графіки нормалізованих залишок для всіх досліджувальних сталей при різних режимах зварювання.
18. Другий метод – це моделювання структурними рівняннями. При дослідженні даним методом було побудовано дві діаграми шляхів, де перша діаграма шляхів відображала шляхи без корельованих залишків, друга діаграма відображає корельовані залишки FERRITE2 та PERLITE2, що відображено дисперсією 16. Аналогічно першому методу для кожної діаграми шляхів побудована модель у вигляді комп'ютерного мови *PATN1*, та побудовані імовірнісні графіки нормалізованих залишок.
19. Проаналізувавши два методи дослідження, можемо зазначити, що побудовані моделі є адекватними. Про що свідчить те, що: показники отриманих критеріїв відповідають достовірності, а саме, отримані критерії УУПММ та УИМ приближені до нуля; імовірнісний рівень близький до 1; максимальне значення косинуса залишків приближено до нуля; коефіцієнти між коваріаціями (кореляціями) та вихідні дані значимі на рівні $p=0$; число ступенів свободи відповідають параметрам, що підтверджує адекватність моделі структурних рівнянь.
20. У процесі моделювання за допомогою методу Монте-Карло було зазначено такі параметри: зімітована модель має всі факторні навантаження рівними 6, всі дисперсії 64, кореляції між факторами

дорівнюють нулю. Стандартне відхилення при проведених 50 ітераційних процесів відповідає заданим умовам.

21.Проведений фізико-математичний аналіз взаємозв'язку між параметрами зварювання та критерієм оцінки структурного стану показав, що на якість зварного з'єднання в першу чергу впливає енергія тепло вкладання при зварюванні, яка забезпечує формування різних за геометричними розмірами та структурним станом зон зварного з'єднання, як наслідок, якість зварного з'єднання може забезпечуватися шляхом регулювання енергетичного впливу, тобто, вибором режиму зварювання з урахуванням матеріалу, та конкретних режимів експлуатації готових виробів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крохалев В.Г., Чебыкин А.А. Технология изготовления металлических конструкций : учебное пособие / Министерство образования и науки Рос. Федерации, Уральский федеральный университет. Екатеринбург : Изд-во Урал. Ун-та, 2017. 180 с.
2. Дзюбик А.Р., Назар І.Б. Математичне моделювання залишкового напруженого стану в колових швах. *Національний Університет «Львівська політехніка», кафедра зварювального виробництва діагностики та відновлення металоконструкцій*. Львів. 2002. С. 55-58.
3. Трофимов А.И., Трофимов М.А., Егоров Д.А., Талабанов М.Г. Математическое моделирование механизма образования монолитных соединений для оптимизации процесса сварки. *Вестник Российской академии естественных наук. Серия «Инновационные технологии»*. 2014. № 1. С. 24-27.
4. Масленников А.В., Ерофеев В.А. Фізико-математическая модель импульсной орбитальной дуговой сварки вольфрамовым электродом. *Машиностроение и машиноведение*. Россия, Тула, ТулГУ, 2012. С. 107-117.
5. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. Москва : Машиностроение, 1968. 235 с.
6. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев : Наукова думка, 1976. 320 с.
7. Makhnenko V. I., Velikoivanenko E. A., Pochinok V. E. Numerical methods for the prediction of welding stress and distortions. 1999. Vol. 13, № 1. 146 p. (Welding and Surf. Rev.).
8. Кользеев А.А., Шафрай К.А. Основы металлических конструкций: учеб. пособие. Новосибирск : НГАСУ, 2001. 80 с.
9. Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах. *Сборник докладов седьмой*

- международной конференции* / Под редакцией проф. И. В. Кривцуна. Киев : Международная ассоциация «Сварка», 2014. 132 с.
10. Пірумов А.Є., Шевченко М.В., Скачков І.О. Моніторинг якості зварювання за електричними параметрами процесу. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2011. № 5. С. 84-88.
 11. Чвертко Є.П. Моделювання електричних параметрів процесу контактного стикового зварювання безперервним оплавленням. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2011. № 1. С. 172-177.
 12. Пірумов А.Є., Чвертко Є.П., Шевченко М.В. Математична модель дугового зварювання з короткими замиканнями для побудови системи моніторингу якості. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2012. № 2. С. 128-132.
 13. Махненко О. В., Мужиченко А. Ф., Прудкий И. И. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния сварных стрингерных панелей из титанового сплава ВТ20. *Научно-технический раздел. Автоматическая сварка*. 2013. № 2. С. 14-20
 14. Зотов В.Ф. Производство проката. Москва : Интермет Инжиниринг, 2000. 352 с.
 15. ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 23 с. (Інформація та документація).
 16. Челноков Н.М. Технология горячей обработки материалов : учебное пособие для техникумов. Москва : Высшая школа, 1972. 288 с.
 17. Полухин М.И. Федосов Н.М., Королев А.А., Матвеев Ю.М. Прокатное производство. Москва : Металлургия, 1968. 288 с.
 18. Большаков В. И. Субструктурное упрочнение конструкционных сталей. Канада : Базилиан Пресс, 1998. 316 с.
 19. Roberts W., Sandberg A., Siwecki T., Werlefors T. Steels Technology and Applications. *ASM, Metals Park, Ohio*. 1984. P. 67-84.
 20. Слупська Ю.С., Бекетов О.В., Лаухін Д.В., Дадіверіна Л.М., Бабенко Є.О. Загальні характеристики руйнування низьковуглицевих

- мікролегованих сталей. *Інноваційні технології в будівництві, цивільній інженерії та архітектурі* : тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції з нагоди 90-річчя ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (26 листопада 2020 року). Дніпро : ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2020. С. 58-50.
21. Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах. Москва : Металлургия, 1980. 224 с.
22. Коцарь С.Л., Третьяков В.А., Цупров А.Н., Поляков Б.А. Динамика процессов прокатки : учебное пособие. Москва : Металлургия, 1997. 255 с.
23. Погоржельский В. И. Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. Москва : Металлургия, 1986. 151 с.
24. Tither G., Morrow J. W. Strong, tough molybdenum steels for the Arctic. *Metals Eng. quart.* Ohio: American Society for Metals, 1975. Vol. 15. No. 8. P. 42-52.
25. Слупська Ю.С., Іванцов С.В., Тютєреєв І.А., Сінчук Р.Р. Прогноз механічних властивостей виробів із металу. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 1(92). С. 30-40.
26. Woodhead J.H., Webster D. Precipitation reactions in a vanadium – bearing mild steel. *Metals Eng. quart.* Ohio: American Society for Metals, 1969. Vol. 207. No. 6. P. 854-857.
27. Большаков В.И. Упрочнение строительных сталей. Днепропетровск : Січ, 1993. 332 с.
28. Слупська Ю.С., Узлов О.В., Дрожевська Г.В., Пучиков О.В., Шпак О.А. Підвищення ресурсу експлуатації дисків пилок гарячого різання металу шляхом термічної обробки. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 1(88). С. 70-80.

- 29.Ландер Х., Михелич Дж. Производство молибденовых сталей для магистральных трубопроводов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1977. № 7. С. 47-51.
- 30.Хензель А., Шпиттель Т., Шпиттель М. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации. Москва : Металлургия, 1985. 184 с.
- 31.Murr L. E., *Interfacial Phenomena in Metals and Alloys*. Addison Wesley Press. (Mass.) 1975, 380 p.
- 32.Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Рудченко А.В. Строительная сталь. Москва : ЗАО «Металлургиздат», 2002. 624 с.
- 33.Банников Е. А., Ковалев Н. А. Сварка. Москва : АСТ, 2014. 256 с.
- 34.Roberts W., Sandberg A., Siwecki T., Werlefors T. *Steels Technology and Applications*. ASM, Metals Park, Ohio. 1984. P. 67-84.
- 35.Спеціальні способи зварювання. URL: http://elib.lutsk-ntu.com.ua/book/tf/m_ta_pfkм/2013/13-38/page16.html (дата звернення: 15.03.2020).
- 36.Каракозов Э.С., Мустафаев Р.И. Справочник молодого электросварщика : справочное пособие для ПТУ. Москва : Высшая школа, 1992. 303 с.
- 37.Жербин М.М., Владимирский В. А. Металлические конструкции. Киев: Высшая школа, 1986. 215 с.
- 38.Бекетов А. В., Большаков В. И., Никитюк В. В. Оценка эффективности использования малоуглеродистых сталей, микролегированных V, Nb и Ti при производстве строительных металлических конструкций. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2006. № 1 (32). С. 14-20.
- 39.Krauss G. *Steels. Processing, Structure and Perfomance*. Ohio: ASM International, metals park, 2006. 593 p.
- 40.Бекетов А. В., Большаков В. И., Дейнеко Л. Н., Исследование влияния параметров упрочняющих обработок на структуру и свойства малоуглеродистых низколегированных сталей и изделий из них.

- Строительство, материаловедение, машиностроение.*
Днепропетровск, 2006. Вып. 36. Ч. 1. С. 181-192.
41. Файбишенко В. К. *Металеві конструкції : навчальний посібник для вузів.* Розділ: Побут. Господарство. Будівництво. Техніка. Стройиздат, 1984. URL: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-108-metallokonstrukcii/7.htm> (дата звернення: 15.12.2019).
42. *Основные типы соединений металлоконструкций.* 2016. URL: <http://fccland.ru/proektirovanie-mostov/417-osnovnye-tipy-soedineniy-metallokonstrukciy.html> (дата звернення: 21.12.2019).
43. Самойлов Е.А. *Детали машин и основы конструирования.* Глава 20 *Заклепочные соединения.* 2018. URL: https://studme.org/188273/tehnika/zaklepochnye_soedineniya (дата звернення: 16.01.2020).
44. Джамал В.В. *Прикладна механіка. Заклепувальні з'єднання.* 2014. URL: https://stud.com.ua/72542/tehnika/zaklepuvalni_zyednannya (дата звернення: 25.03.2020).
45. *Фрикционные соединения на высокопрочных болтах.* 2019. URL: <http://kmdrus.ru/news/frikcionnye-soedineniya-na-vysokoprochnyh-boltah> (дата звернення: 11.03.2020).
46. Богданов Т.М. *Соединения металлических конструкций на высокопрочных болтах.* Москва : Трансжелдориздат, 1963. 111 с.
47. *Справочник химика 21. Химия и химическая технология. Соединения на высокопрочных болтах.* URL: <https://chem21.info/info/1887087/> (дата звернення: 26.02.2020).
48. Будур А.И. Белогуров В.Д. *Стальные конструкции.* Справочник конструктора. Киев : Изд-во «Сталь», 2004. 210 с.
49. *Ремонтно-строительные пособия и статьи.* URL: <http://www.remstroyinfo.ru/tom10/tom1025.php> (дата звернення: 26.02.2020).

50. Матюхин В.И., Корытов М.С. Оборудование и технология монтажной сварки мостовых конструкций : курс лекций. Омск : Изд-во СибаДИ, 2006. 80 с.
51. Сварные соединения и их характеристики. 2021. URL: <http://stalevarim.ru/pub/svarnye-soedineniya-i-ih-harakteristiki/> (дата звернення: 20.01.2021).
52. Евсеев Р.Е., Евсеев В.Р. Сварка при производстве электромонтажных работ. Ленинград : Энергия, 1978. 297 с. ил.
53. Ясній П.В. Курс лекцій «Механіка руйнування зварних конструкцій» для студентів спеціальності 7.092301 всіх форм навчання. *Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*. Тернопіль. 2006. 100 с.
54. Виды сварных соединений и швов. URL: http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/dugovaa_svarka/svarnie_soedinenia_i_shvi/vidi_svarnih_soedinenii (дата звернення: 21.02.2020).
55. Смажило Б.В., Котенко Р.В. Технологія зварювання та відновлення деталей судових конструкцій : методичний посібник (конспект лекцій). Одеса, 2016. URL: <https://studfile.net/preview/8055671/> (дата звернення: 20.02.2020).
56. Петров В.Н. Сварка и резка нержавеющей сталей. Ленинград : Судостроение, 1968. 288 с.
57. Види зварних з'єднань і типи зварних швів. URL: <https://studfile.net/preview/5403529/page:95/> (дата звернення: 20.02.2020).
58. Основные виды сварных соединений и швов. URL: <http://ivrus.com.ua/novosti/osnovnye-vidy-svarnyh-soedinenij-i-shvov> (дата звернення: 21.02.2020).
59. Орлик Г.В., Орлик А.Г. Сварочное производство : курс лекций по разделу дисциплины «Технологии конструкционных материалов» /

- Национальный исследовательский университет КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Калуга. 2018. 71 с.
60. Банников Е. А., Ковалев Н. А. Сварка. Москва : АСТ, 2014. 256 с.
61. Забелин А.Л., Савинов Д.Н. Анализ применения лазерно-гибридной сварки в производственной среде. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018. № 1 (62). С. 14-17.
62. Жаткин С.С., Баранов Д.А., Паркин А.А., Попов А.С., Никитин К.В. Влияние термической обработки на структуру и свойства сварного шва при лазерной сварке жаропрочного сплава ЭП693-ЭД, используемого в производстве ГТД. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18, № 4 (6). С. 1106-1113.
63. Тукаев Р.Ф., Сисанбаев А.В., Зорина С.А., Исламова А.В., Файрушин А.М. Применение лазерной сварки при изготовлении нефтегазового оборудования. *Материаловедение и защита от коррозии*. 2016. Т. 14, № 4. С. 162-166.
64. Слободян М. С., Киселев А. С., Елкин М. А. Импульсная лазерная сварка циркониевого сплава Э1108. *Томский политехнический университет*. Томск. 2017. С. 89-91.
65. Кудрявцева А. Лазерная сварка: преимущества, спектр применений, оборудование. *Современные технологии. Современная электроника*. Москва. 2010. № 8. С. 12-13.
66. Технологія конструкційних матеріалів. зварювальне виробництво. *Лазерне зварювання*. URL: https://stud.com.ua/157940/tehnika/lazerne_zvaryuvannya (дата звернення: 27.04.2020).
67. Лазерне зварювання. URL: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=53024 (дата звернення: 17.01.2020).

68. Лазерне зварювання. URL: <https://studfile.net/preview/5370379/page:6/> (дата звернення: 18.01.2020).
69. Тукаев Р.Ф., Ибрагимов И.Г., Файрушин А.М., Сисанбаев А.В. Сравнительный анализ сварных швов в узле «труба – трубная решетка» кожухотрубчатого теплообменного аппарата из жаропрочной стали 15Х5М, полученных различными способами сварки. *Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. Уфа, Российская Федерация*. 2013. № 5. С. 363-375.
70. Игнатов А. Лазерная сварка сталей мощными СО₂-лазерами. *Технологическое оборудование и технологии. Фотоника*. 2009. Ч. 2. № 3. С. 22-24.
71. Лазерная сварка. URL: <https://www.rudetrans.ru/o-svarke/lazernaya-svarka/> (дата звернення: 18.01.2020).
72. Шелягин В. Д., Оришич А. М., Хаскин В. Ю., Маликов А. Г., Чайка А.А. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микро-плазменной сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка. Производственный раздел*. Новосибирск. 2014. № 5. С. 35-41.
73. Деревягина Л.С., Гордиенко А.И., Оришич А.М., Маликов А.Г., Сурикова Н.С. Особенности формирования зон термического влияния лазерного сварного соединения низкоуглеродистой феррито-перлитной стали. *VIII всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 50-летию основания института химии нефти: «Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа» : тезисы докладов*. Томск : Изд-во Дом ТГУ, 2019. Секция 8. С. 611-612.
74. Баранов Д.А., Паркин А.А., Жаткин С.С. Особенности формирования сварного шва жаропрочного сплава ХН45ВМТЮБР в зависимости от режимов лазерной сварки. *Известия Самарского научного центра*

- Российской академии наук. Машиностроение и машиноведение*. 2018. Т. 20, № 4 (2). С. 170-176.
- 75.Игнатов А. Лазерная сварка сталей мощными СО₂-лазерами. *Технологическое оборудование и технологии. Фотоника*. 2008. Ч. 1. № 6. С. 10-17.
- 76.Пантелеенко Ф.И., Девойно О.Г., Лапковский А.С., Луцко Н.И. Особенности процесса лазерной сварки разнородных материалов на железной и медно-никелевой основе. *Наука и техника. Машиностроение и машиноведение*. 2014. № 1. С. 7-11.
- 77.Колубаев А., Сизова О., Колубаев Е., Заикина А., Воронцов А., Денисова Ю., Рубцов В. Особенности структуры сварного шва при лазерной сварке конструкционной стали 09Г2С. *Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)*. 2018. Том 20 № 3. С. 123-133.
- 78.Лукашенко А.Г., Лукашенко Д.А., Зубко И.А., Юпин Р.Е., Лукашенко В.М. Оптимальный метод определения параметров режима лазерной сварки тонкостенных конструкций. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика и материаловедение*. 2011. 6/5 (54). С. 48-51.
- 79.Satyanaarayana G., Narayana K.L., Nageswara Rao V., Слободян М.С., Елкин М.А., Киселев А.С. Численное моделирование процессов формирования сварного шва при импульсной лазерной Nd:YAG-сварке сплава Zr-1% Nb. *Теплоэнергетика*. 2019. № 3. С. 1-11.
- 80.Дмитроченков А.П., Наумович С.А., Казак Н.С., Павленко В.К., Рыжевич А.А., Катранжи Е.Г. Лазерная сварка в ортопедической стоматологии. *Современная стоматология. Новые технологи*. 1998. № 3. С. 36-39.

81. Малащенко А.А., Мезенов А.В. Лазерная сварка металлов / Университет технического прогресса в машиностроении. Москва : «Машиностроение». 1984. 45 с.
82. Шаранов Н.И. Применение электронно-лучевой сварки в турбостроении. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2010. № 3. С. 143-149.
83. Шмельков Д.Ю., Поздышев А.И., Пигалова Е.А., Курников Н.А. Электронно-лучевая сварка как один из видов сварки направленных на снижение сварочных деформаций. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Машиностроение и автоматизация*. 2015. № 1 (108). С. 107-111.
84. Овчинников В.В., Алексеев В.В., Лукин В.И., Магнитов В.С., Растопчин Р.Н. Свойства и структура сварных соединений из сплава В-1963, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Машиностроение и инженерное образование*. 2011. № 3. С. 18-26.
85. Махин И.Д., Николаев В.В., Петровичев П.С. Исследование свариваемости сплавов В-1469 и 01570С с использованием электронно-лучевой сварки применительно к конструкции перспективного пилотируемого корабля. *Космическая техника и технологи*. 2014. № 4 (7). С.68-75.
86. Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Зыков В.В. Вторично-эмиссионный сигнал из зоны электронно-лучевой сварки и его связь с геометрическими параметрами сварного шва. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2011. № 2 (18). С. 214-221.
87. Ольшанская Т.В. Особенности кристаллизации сварных швов из разнородных материалов при электронно-лучевой сварке на примере высокохромистой стали с бронзой. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2014. Т.16, № 3. С. 43-55.
88. Мякишев Ю.В., Богословская М.К. Тепловая эффективность формирования шва при электронно-лучевой и трехфазной сварках.

- Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение.* 2015.
89. Электронно-лучевая сварка. Установка электронно-лучевой сварки. *Раздел: Технология конструкционных материалов.* URL: <http://www.mtomd.info/archives/2061> (дата звернения: 10.04.2020).
90. Технологія конструкційних матеріалів. зварювальне виробництво. *Променеві способи зварювання і різання конструкційних матеріалів.* URL: <https://stud.com.ua/157939/tehnika/> (дата звернення: 17.04.2020).
91. Ластовирия В.Н., Новокрещенов В.В., Родякина Р.В. Использование электронно-лучевой сварки для создания термоэмиссионных преобразователей (тэп) из монокристаллов вольфрама. *Глобальная ядерная безопасность.* 2015. № 3(16). С. 27-35.
92. Григорьев В.В., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Изменение структуры и микротвердости неразъемных соединений силовых титановых конструкций из сплава ВТ23, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2019. № 1 (706). С. 20-28.
93. Терентьев Е.В., Марченков А.Ю., Слива А.П., Гончаров А.Л. Повышение конструкционной прочности разнородных сварных соединений сплава З6НХТЮ и стали ЭП517 за счет оптимизации геометрических параметров шва. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение.* 2018. Т. 20, № 3. С. 63-72.
94. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С., Карасевская О.П. Формирование структуры металла шва при электронно-лучевой сварке монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка. Научно-технический журнал.* 2016. № 8 (755). С. 21-28.
95. Сварка и сварочное оборудование. *Электронно-лучевая сварка – сущность, типы, преимущества.* URL: <http://goodsvarka.ru/metalov/electron-beam/> (дата звернения: 17.04.2020).

96. Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Зыков В.В. Вторично-эмиссионный сигнал из зоны электронно-лучевой сварки и его связь с геометрическими параметрами сварного шва. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2011. № 2. С. 214-221.
97. Позняков В.Д., Шелягин В.Д., Жданов С.Л., Бернацкий А.В., Сиора А.В. Сравнительная оценка свойств сварных соединений высокопрочной стали N-A-XTRA-70, полученных дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сваркой. *Гибридные технологии сварки. Автоматическая сварка*. 2016. № 5-6 (753). С. 124-126.
98. Понятие и применение электронно-лучевой сварки. 2019. URL: <https://fgpip.ru/pravila-i-bezopasnost/ponyatie-i-primenenie-elektronno-luchevoj-svarki.html> (дата звернения: 18.04.2020).
99. Электронно-лучевая сварка. URL: <https://svarkalegko.com/tehonology/elektronno-luchevaya-svarka.html> (дата звернения: 25.04.2020).
100. Станки и инструмент. *Электронно-лучевая сварка – технология, процесс и особенности*. URL: <https://intehstroy-spb.ru/spravochnik/elektronno-luchevaya-svarka.html> (дата звернения: 25.04.2020).
101. Нестеренков В.М., Бондарев А.А. Электронно-лучевая сварка крупногабаритных толстостенных конструкций из сплавов магния. *Автоматическая сварка. Производственный раздел*. 2014. № 2. С. 39-43.
102. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Электронно-лучевая сварка. Технологические особенности и оборудование : учебное пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. 96 с. обл.
103. Овчинников В.В. Сварщик на лазерных и электронно-лучевых сварочных установках : учеб. пособие. Москва : Издательский центр «Академия», 2008. 64 с.

104. Дружинина А.А. Автоматическая компенсация влияния магнитных полей на точность позиционирования по стыку соединения при электронно-лучевой сварке: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2015. 116 с.
105. Саломатова Е.С. Закономерности изменения химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с динамическим воздействием на электронный луч: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Екатеринбург, 2015. 156 с.
106. Вторая международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии»: сборник материалов и докладов. *«Национальный Исследовательский Университет «МЭИ» 14-17 ноября 2017 года.* Москва: Издательство «МЭИ», 2017. 534 с.
107. Деревянных А.Ю., Кокоулин Н.А., Бородулин А.А., Баяндин М.А., Дударев С.Е. Внедрение технологии автоматической сварки под слоем флюса кольцевых и продольных швов сборочных единиц из сталей с толщиной свариваемых кромок от 45 до 70 мм. *Вестник Прем. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение.* 2012. Т. 14, № 3. С. 68-76.
108. Трекин Г.Е., Шевченко О.И. Влияние алюминиевого электроискрового технологического подслоя и температуры отпуска на структуру и свойства низкоуглеродистого, низколегированного сварного шва. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение.* 2015. Т. 17, № 1. С. 22-30.
109. Металлообработка и станки. Сварка под флюсом. URL: <https://stanok.guru/metalloobrabotka/svarka/chto-eto-takoe-svarka-pod-flyusom.html> (дата звернения: 14.03.2020).

110. Ковенский И.М., Кусков К. В., Венедиктова И.А. Усталостное разрушение сварных соединений трубных сталей 09Г2С И 17Г1С-У. *Омський науковий вісник*. 2013. № 2 (120). С. 51-53.
111. Ivanov M.A., Ulanov A.M. The methodology of calculation of the geometric sizes of the welds on the parameters of the mode of automatic arc welding under a layer of flux. *Scientific proceedings ix international congress «Machines, Technologies, Materials»*. 2012. Year XX, Vol. 1. P.86-88.
112. Зварювання під шаром флюсу. URL: <https://penzaelektrod.ru/dugovaya-svarka-pod-flyusom-sushhnost-i-preimushhestva/> (дата звернення: 13.03.2020).
113. Балакин Н.А., Тютёва Н.Д. Автоматическая наплавка резцов быстрорежущей сталью под слоем флюса. *Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова*. 1951. Том 68, вып.1. С. 38-41.
114. Иванов М.А., Уланов А.М., Безганс Ю.В. Теоретический подход к расчету режима трехдуговой сварки под флюсом стыкового соединения деталей тележки рельсового транспорта. *Вестник ЮУрГУ, Серия «Металлург*. 2013. Том 13, № 1. С. 146-149.
115. Судник В А., Ерофеев В.А., Масленников А.В., Цвелёв Р.В. Математическая модель формирования сварочной ванны при дуговой сварке под флюсом и анализ процесса переноса металла. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2015. Вып. 6, Ч. 2. С. 21-31.
116. Захарова И.В., Чичкарев Е.А. Математическое моделирование температурного поля и формы ванны жидкого металла в условиях сварки под флюсом. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2001. Вип. № 11. С. 216-219.
117. Коберник Н.В., Чернышов Г.Г., Линник А.А., Гвоздев П.П. Формирование корневого слоя шва на подкладной ленте при сварке

- под флюсом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2012. № 7. С. 61-66.
118. Обробка дерева і металу. Сутність зварювання під флюсом. URL: <http://obrobka.pp.ua/323-sutnst-zvaryuvannya-pd-flyusom.html> (дата звернення: 13.03.2020).
119. Трекин Г.Е., Шевченко О.И. Формирование заготовки при аддитивном изготовлении наплавкой под флюсом. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2019. Т. 21, № 4. С. 49-56.
120. Яковлев Д.С., Шахматов М.В. Сварка трубных сталей высокой прочности с применением порошковых проволок. *Вестник ЮУрГУ, Серия «Металлургия»*. 2013. Том 13, № 1. С. 218-221.
121. Laukhin D., Beketov O., Rott N., Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291, P. 13-19.
122. Slupska Y., Laukhin D., Beketov O., Babenko E., Rott N., Dytiuk V. 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. P. 88-98.
123. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы. *Справочник*. 1991, Т.1.
124. Глизманенко Д.Л. Сварка и резка металлов : учебное пособие. Изд. 5-е переработанное. Москва : Metallurgy, 1984. 448 с.
125. Ouchi C., Tanaka J., Kozasu I., Tsukada K. *MiCon 78: Optimization of Processing, Properties, and Service Performance Through Microstructural Control*. ASTM. Philadelphia (PA), 1979. P. 105-125.
126. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. Ohio: ASM International, metals park, 2006. 593 p.

127. Бернштейн М.Л. Высокопрочные строительные стали. *Металловедение и термическая обработка*. Москва : Металлургия, 1977. Т. 2, 368 с.
128. Каверинский В.В., Троцан А.И., Баглюк Г.А., Сухенко З.П. Математическое моделирование структурообразования в зоне термического влияния сварного шва низкоуглеродистой среднелегированной стали. *Материаловедение. Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 5. С. 51-56.
129. Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Рудченко А.В. Строительная сталь. Москва : ЗАО «Металлургиздат», 2002. 624 с.
130. Васильев В.И., Ильященко Д.П., Павлов Н.В. Введение в основы сварки : учебное пособие / Юргинский технологический институт. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 317 с.
131. Литовченко С.В., Кириченко В.Г., Доценко Е.А., Кочетова С.Ю. Приготовление образцов для металлографического исследования микроструктуры: методические материалы к выполнению лабораторных работ по металлографии. Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 18с.
132. Михайленко Ю. В. Изготовление прозрачных и полированных шлифов : метод. указания. Ухта : УГТУ, 2012. 43 с.
133. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография (стереология металлических материалов): Учебное пособие. Москва: Металлургия, 1976. 270 с.
134. Растрова электронна мікроскопія. URL: <https://mipt.ru/upload/medialibrary/a90/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B>

- 8%D0%B7%20%20%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%203%20SEM .pdf (дата звернення: 18.08.2020).
135. Теоретические основы растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа наноматериалов : учебное пособие / [Д.А. Полонянкин и др.]; Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Издательство ОмГТУ, 2019. 116 с.
136. Электронный учебник по статистике. StatSoft Statistica. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm/> (дата звернення 28.03.2021).
137. Вуколов Э.Л. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операции с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL : учебное пособие. Москва : ФОРУМ, 2008. 464 с.
138. Руководство пользователя STATISTICA.doc. URL: <https://www.twirpx.com/file/193355/> (дата звернення 28.03.2021).
139. Введение в факторный анализ в Python. URL: <https://ichi.pro/ru/vvedenie-v-faktornyj-analiz-v-python-116625965253739/> (дата звернення 28.03.2021).
140. Линейный регрессионный анализ. URL: <https://www.statmethods.ru/statistics-metody/regressionnyj-analiz/> (дата звернення 22.06.2020).
141. Основы регрессионного анализа. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/regression-analysis-basics.htm> (дата звернення 22.06.2020).
142. Корреляционный анализ. URL: <https://www.statmethods.ru/statistics-metody/korrelyatsionnyj-analiz/> (дата звернення 08.08.2020).
143. Корреляция, корреляционная зависимость. URL: <https://statpsy.ru/correlation/correlation/> (дата звернення 08.08.2020).
144. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. Санкт-Петербург : Питер, 2003. 688 с.

145. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей. Москва : Госстатиздат, 1958. 267 с.
146. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. Москва: Мир, 1982. 488 с.
147. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений : учебное пособие. Москва: Изд-во МИФИ, 2005. 40 с.
148. Боровков Л.Л. Математическая статистика. Москва : Наука, 1984. 472 с.
149. Лазарева А.И., Копцева Н.В., Горленко Д.А., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А., Голубчик Э.М. Исследование влияния термической обработки на качество сварных соединений в условиях агрегатов второй очереди листопрокатного цеха № 11 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия «Машиностроение, материаловедение»*. 2016. Т. 18. № 4. С. 60-73.
150. Структура зоны термического влияния при сварке. *Онлайн справочник о сварке*. URL: <http://osvarke.net/soedineniya/zona-termicheskogo-vliyaniya/> (дата звернення 20.05.2020).
151. Алексеев Е. К., Алексеев К.Е., Мельник В.И. Сварочное дело. Москва: Госстройиздат, 1959. 326 с.
152. Соколов Е.В. Справочник по сварке. Москва : Машгиз, 1962. 556 с.
153. Троицкий В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. Киев : Феникс, 2006. 320 с.
154. Слупська Ю.С., Бекетов О.В., Лаухін Д.В., Ротт Н.О. Дослідження структурного стану зварних з'єднань низьковуглицевих мікролегованих сталей. *Досягнення і перспективи науки, освіти та виробництва: I Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція (м. Київ, 23 грудня 2020 року)*. Київ, 2020. С. 245-246.
155. Слупська Ю.С., Дадіверіна Л.М., Чашин Д.Ю., Торопченков Г.О., Пико М.О. Вплив границь зерен на розвиток деформації в

- низьковуглецевих низьколегованих сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 2(93). С. 55-63.
156. Томас К.И., Ильященко Д.П. Технология сварочного производства : учебное пособие / Томский политехнический университет. Томск : Юргинский технологический институт, 2011. 247 с.
157. Slupska Y., Laukhin D., Poznyakov V., Kostin V., Beketov O., Rott N., Dadiverina L., Liubymova-Zinchenko O. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. *Materials science. East-ern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 3 (12 (111)). P. 25-31
158. Гуляев А.П. Металловедение : учебное пособие. Изд. 5-е переработанное. Москва: Металлургия, 1978. 643 с.
159. Бекетов А.В., Большаков В.И., Куксенко В.И., Сухомлин Г.Д., Лаухин Д. В., Семенов Т.В. Образование и рост перлитных колоний. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 1. С. 29-35.
160. Слупська Ю.С., Лаухін Д.В., Бекетов О.В., Тютєреєв І.А., Ротт Н.О., Чашин Д.Ю., Торопченєв Г.О., Пико М.О. Металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після автоматичного зварювання під шаром флюсу. *Modern engineering and innovative technofogies*. April 2021. № 16. Part 1. С. 105-113.
161. Слупська Ю.С., Лаухін Д.В., Бекетов О.В., Тютєреєв І.А., Ротт Н.О. Застосування методів факторного аналізу у дослідженні структурного стану зварного з'єднання після лазерного зварювання. *Український журнал будівництва та архітектури. Науково-практичний журнал*. 2021. № 3 (003). С. 91-100.
162. Математические методы психологического исследования. Факторный анализ. URL: https://gymnasium42.ru/stat/Book/Frame-struct/page_2_8-frame.htm / (дата звернення 22.03.2021).

163. Факторный анализ: этапы, требования и область применения. *Лекции.doc*. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj10eqaxOnvAhXl-yoKHaloDOAQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fbpmstu.ru%2Fps%2F~krasnikovskiy%2Ffileman%2Fdownload%2F%25D0%259C%25D0%259D%25D0%259E%25D0%2593%25D0%259E%25D0%259C%25D0%2595%25D0%25A0%25D0%259D%25D0%25AB%25D0%2599%2520%25D0%2590%25D0%259D%25D0%2590%25D0%259B%25D0%2598%25D0%2597%2520%25D0%2594%25D0%2590%25D0%259D%25D0%259D%25D0%25AB%25D0%25A5%2F%25D0%25A4%25D0%25B0%25D0%25BA%25D0%2590%25D0%25BD%25D0%25B0%25D0%25BB%25D0%25B8%25D0%25B7%2520%25D0%25A2%25D1%2580%25D0%25B5%25D0%25B1_%25D0%259E%25D0%25B1%25D0%25BB%2520%25D0%25BF%25D1%2580%25D0%25B8%25D0%25BC%25D0%25B5%25D0%25BD_%25D0%2594%25D0%25B5%25D0%25B9%25D1%2581%25D1%2582%25D0%25B2%25D0%25B8%25D1%258F.pdf&usg=AOvVaw1TruD91jpsx2Ai4sioBWo / (дата звернення 22.03.2021).
164. Как используется факторный анализ. Как сделать факторный анализ в статистике 6. *Mebelsotis*. URL: <https://mebelsotis.ru/kak-ispolzuetnya-faktornyi-analiz-faktornyi-analiz-vyruchki-v-excel-eto> / (дата звернення 28.03.2021).
165. Брандт З. Статистические методы анализа наблюдений. Москва: Мир, 1975. 313 с.
166. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. Москва: Мир, 1973. 957 с.
167. Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере : учебное пособие. Москва : Финансы и статистика, 2000. 384 с.

168. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ», 2004. 257 с.
169. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. Москва : Высшая школа, 1972. 368 с.

ДОДАТОК А
КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ

Таблиця А.1 – Кореляційна матриця взаємозв'язку між геометричними розмірами зон зварного з'єднання

	Лазерне зварювання											
	09Г2С				10ХСНД				10Г2ФБ			
	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал
Зона I	1,0000 00	0,327327	0,39736 0	0,39736 0	1,0000 00	0,114708	0,05763 9	0,31330 4	1,0000 00	0,767988	0,98691 2	0,99042 9
Зона II	0,3273 27	1,000000	0,99717 6	0,73704 3	0,1147 08	1,000000	0,99835 9	0,90744 6	0,7679 88	1,000000	0,65465 4	0,86602 5
Зона III	0,3973 60	0,997176	1,00000 0	0,68421 1	0,0576 39	0,998359	1,00000 0	0,93001 5	0,9869 12	0,944911	1,00000 0	0,65465 4
Зона IV	0,3973 60	0,737043	0,68421 1	1,00000 0	0,3133 04	0,907446	0,93001 5	1,00000 0	0,9940 07	0,998625	0,69337 5	1,00000 0

Продовження таблиці А.1

	Електронно-променеє зварювання											
	09Г2С				10ХСНД				10Г2ФБ			
	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал
Зона I	1,00000 0	0,65465 4	0,21677 7	0,99717 6	1,00000 0	0,79808 2	0,79808 2	0,59965 5	1,00000 0	0,78872 3	0,89068 7	0,99042 9
Зона II	0,65465 4	1,00000 0	0,59604 0	0,59604 0	0,79808 2	1,00000 0	1,00000 0	0,96076 9	0,78872 3	1,00000 0	0,98198 1	0,86602 5
Зона III	0,21677 7	0,59604 0	1,00000 0	0,28947 4	0,79808 2	1,00000 0	1,00000 0	0,96076 9	0,89068 7	0,98198 1	1,00000 0	0,94491 1
Зона IV	0,99717 6	0,59604 0	0,28947 4	1,00000 0	0,59965 5	0,96076 9	0,96076 9	1,00000 0	0,99042 9	0,86602 5	0,94491 1	1,00000 0

Продовження таблиці А.1

	Автоматичне зварювання під шаром флюсу											
	09Г2С				10ХСНД				10Г2ФБ			
	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал	Зварний шов	Границя зварний шов – зона термічного впливу.	Зона термічного впливу	Границя зони термічного впливу-основний метал
Зона I	1,00000 0	0,99778 8	0,9949 57	0,253837	1,00000 0	0,96501 6	0,9833 03	0,898078	1,0000 00	0,997406	0,53 6695	0,827788
Зона II	0,99778 8	1,00000 0	0,9994 24	0,188982	0,96501 6	1,00000 0	0,9966 16	0,981981	0,9974 06	1,000000	0,59 6040	0,866025
Зона III	0,99495 7	0,99942 4	1,0000 00	0,155543	0,98330 3	0,99661 6	1,0000 00	0,963123	0,5366 95	0,596040	1,00 0000	0,917663
Зона IV	0,25383 7	0,18898 2	0,1555 43	1,000000	0,89807 8	0,98198 1	0,9631 23	1,000000	0,8277 88	0,866025	0,91 7663	1,000000

ДОДАТОК А

Таблиця А.2 – Кореляційна матриця взаємозв'язку між відсотковим вмістом структурних складових та геометричним розміром зон зварного з'єднання

Лазерне зварювання							
Зони зварного з'єднання	Марка сталі						
	09Г2С		10ХСНД		10Г2ФБ		
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Бейніт
Границя зварний шов – зона термічного впливу.	0,970725	0,891042	0,993399	0,989036	0,981981	0,981981	-
Зона термічного впливу	0,853750	0,853750	0,978352	0,991241	0,944911	0,327327	-
Границя зони термічного впливу-основний метал	0,553134	0,349957	0,999966	0,873332	0,984111	0,817057	0,606143
Електронно-променеве зварювання							
Зони зварного з'єднання	Марка сталі						
	09Г2С		10ХСНД		10Г2ФБ		
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Бейніт
Границя зварний шов – зона термічного впливу.	0,155543	0,993399	1,000000	0,634285	0,240192	0,5000000	-
Зона термічного впливу	0,041204	0,041204	0,997949	1,000000	0,052414	0,654654	-

Продовження таблиці А.2

Електронно-променеве зварювання							
Зони зварного з'єднання	Марка сталі						
	09Г2С		10ХСНД		10Г2ФБ		
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Бейніт
Границя зони термічного впливу-основний метал	0,953821	0,986241	0,795356	0,960769	0,277350	0,866025	-
Автоматичне зварювання під шаром флюсу							
Зони зварного з'єднання	Марка сталі						
	09Г2С		10ХСНД		10Г2ФБ		
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Бейніт
Границя зварний шов – зона термічного впливу.	0,981981	0,500000	0,997949	0,240192	0,960769	0,500000	-
Зона термічного впливу	0,987829	0,000000	0,999834	0,996616	0,993399	0,953821	-
Границя зони термічного впливу-основний метал	0,277350	0,944911	0,967868	0,981981	0,866025	0,866025	-

ДОДАТОК Б

ФАКТОРНІ НАВАНТАЖЕННЯ

Таблиця Б.1 – Співвідношення факторних навантажень відносно структурних складових сталі 09Г2С для різних типів зварювання

Лазерне зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	0,174927	0,842799	0,471510	0,123812	-0,146423
ЗТВ	0,679167	-0,533909	0,440381	-0,238823	0,051985
Границя ЗТВ-основний метал	-0,916297	-0,360473	-0,125167	-0,084668	0,087312
Ферит 2	-0,213748	0,790914	-0,017387	-0,409240	0,401233
Ферит 3	-0,594912	-0,305237	0,530064	0,407228	0,325743
Ферит 4	-0,734406	-0,431171	0,243507	-0,452363	-0,103975
Перліт 2	-0,918422	-0,004307	-0,344317	0,185860	0,058179
Перліт 3	-0,945617	0,115206	0,222715	-0,052933	-0,200329
Перліт 4	-0,906486	0,374324	0,122924	-0,006815	-0,151685
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,829835</i>	<i>2,183341</i>	<i>0,955756</i>	<i>0,654871</i>	<i>0,376197</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,536648</i>	<i>0,242593</i>	<i>0,106195</i>	<i>0,072763</i>	<i>0,041800</i>
Електронно-променеве зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	0,550410	-0,707325	0,307586	-0,098002	0,304182
ЗТВ	-0,730437	-0,372358	-0,564258	-0,062086	-0,074627
Границя ЗТВ-основний метал	0,762295	-0,313506	-0,535256	-0,141720	-0,118478
Ферит 2	-0,633567	-0,429149	0,508089	0,386283	-0,083995
Ферит 3	-0,758104	0,453049	0,417606	-0,197862	-0,080505
Ферит 4	-0,488342	-0,859884	0,135213	0,046837	-0,040560
Перліт 2	0,837270	-0,326485	0,044236	0,393651	-0,188333
Перліт 3	-0,572725	0,255111	-0,561253	0,503060	0,197053
Перліт 4	0,719827	0,593795	0,239803	0,267780	0,006762

Продовження таблиці Б.1

Електронно-променеве зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
<i>Загальна дисперсія</i>	4,179374	2,390334	1,524795	0,703839	0,201659
<i>Доля дисперсії</i>	0,464375	0,265593	0,169422	0,078204	0,022407
Автоматичне зварювання під шаром флюсу					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	0,453263	-0,714145	-0,148856	0,501942	0,102209
ЗТВ	0,343278	0,628835	-0,465702	0,259961	0,449743
Границя ЗТВ-основний метал	0,325857	-0,649208	0,094919	-0,673725	0,097118
Ферит 2	0,939172	0,169703	-0,264724	0,051074	0,128337
Ферит 3	0,150148	0,818918	0,241886	-0,044103	-0,496361
Ферит 4	-0,843320	0,110113	0,262907	0,263256	0,371837
Перліт 2	-0,781644	0,153725	-0,294060	-0,399404	0,345551
Перліт 3	-0,638071	-0,395365	-0,302686	0,455364	-0,370914
Перліт 4	-0,233545	0,009469	-0,888214	-0,264678	-0,293919
<i>Загальна дисперсія</i>	3,117890	2,218494	1,412769	1,284221	0,966626
<i>Доля дисперсії</i>	0,346432	0,246499	0,156974	0,142691	0,107403

Таблиця Б.2 – Факторні навантаження різними методами обертання сталі
09Г2С

Лазерне зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,18119	-0,84147	-0,17736	0,84228	-0,17736	-0,84228
ЗТВ	-0,67517	0,53894 6	-0,67762	-0,53587	-0,67762	0,535877 1
Границя ЗТВ-основний метал	0,91895	0,35364	0,91733	-0,35782	0,91733	0,357821
Ферит 2	0,20785	-0,79248	0,21145	0,79152	0,21145	-0,79152

Продовження таблиці Б.2

Лазерне зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Ферит 3	0,59716	0,30080	0,59579	-0,30351	0,59579	0,303514
Ферит 4	0,73759	0,42569	0,73565	-0,42904	0,73565	0,429045
Перліт 2	0,91842	-0,00252	0,91843	-0,00165	0,91843	0,001650
Перліт 3	0,94473	-0,12223	0,94528	0,11794	0,94528	-0,11791
Перліт 4	0,90367	-0,3810	0,90539	0,37694	0,90539	-0,37944
<i>Загальна дисперсія</i>	4,82968	2,18348	4,82981	2,18336	4,82981	2,183363
<i>Доля дисперсії</i>	0,53663	0,24261	0,53664	0,24259	0,53664	0,242596
Електронно-променеве зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,87090	0,21161	0,86781	0,22396	-0,86781	0,223963
ЗТВ	0,34044	0,74584	-0,35100	0,74093	0,35100	0,74093
Границя ЗТВ-основний метал	-0,79192	-0,22858	0,79589	0,21728	-0,79508	-0,21728
Феррит 2	0,22926	0,73007	-0,23961	0,72674	0,23961	0,72747
Ферит 3	0,87542	0,11667	0,87699	0,10422	0,87699	0,104228
Ферит 4	-0,15233	0,97707	0,13843	0,97913	-0,13843	0,979139
Перліт 2	-0,85870	-0,26502	0,86238	-0,25279	-0,86238	-0,25275
Перліт 3	0,60715	0,15639	-0,60315	0,14775	0,60931	0,147754
Перліт 4	-0,19442	-0,91257	0,20736	-0,90980	-0,20736	-0,90980
<i>Загальна дисперсія</i>	3,48746	3,08224	3,51213	3,05757	3,51213	3,057576
<i>Доля дисперсії</i>	0,38749	0,34247	0,39023	0,33973	0,39023	0,339731
Автоматичне зварювання під шаром флюсу						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов	-0,38619	-0,75253	0,39176	-0,74964	-0,39176	-0,74964
ЗТВ	-0,39923	0,59488	0,39481	0,59782	-0,39481	0,597825

Продовження таблиці Б.2

Автоматичне зварювання під шаром флюсу						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя ЗТВ-основний метал	-0,26524	-0,67623	0,27025	-0,67425	-0,27025	-0,67425
Феррит 2	-0,95074	0,08328	0,95009	0,09032	-0,95009	0,090326
Ферит 3	-0,22425	0,80179	0,21830	0,80343	-0,21831	0,803438
Ферит 4	0,82975	0,18661	-0,83111	0,18046	0,83111	0,180464
Перліт 2	0,76435	0,22442	-0,76599	0,21874	0,76599	0,218748
Перліт 3	0,67149	-0,33548	-0,66898	-0,34045	0,66898	-0,34045
Перліт 4	0,23170	0,03074	0,23192	0,02902	0,23192	0,029026
Загальна дисперсія	3,11039	2,22598	3,11156	2,22482	3,11156	2,224822
Доля дисперсії	0,34560	0,24733	0,34572	0,24720	0,34572	0,247202

Таблиця Б.3 – Співвідношення факторних навантажень відносно структурних складових сталі 10ХСНД для різних типів зварювання

Лазерне зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	0,901556	0,016248	-0,030249	-0,406329	-0,144617
ЗТВ	0,609320	0,738172	0,234301	0,137746	-0,099798
Границя ЗТВ-основний метал	0,828849	-0,383881	0,371434	-0,068477	0,151634
Ферит 2	-0,831455	0,437750	-0,291099	0,164227	0,073132
Ферит 3	-0,336034	-0,861731	0,094137	0,291545	-0,225035
Ферит 4	0,055241	-0,987155	0,078951	0,023744	0,125203
Перліт 2	-0,489432	0,384616	0,779060	0,052127	0,053610
Перліт 3	-0,878841	-0,072695	-0,118088	-0,455913	0,023488
Перліт 4	-0,864753	-0,123775	0,417001	-0,228037	-0,104838
Загальна дисперсія	4,438056	2,769743	1,088379	0,563874	0,139948
Доля дисперсії	0,493117	0,307749	0,120931	0,062653	0,015550

Продовження таблиці Б.3

Електронно-променеве зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,297020	0,782421	-0,469644	0,275256	-0,057145
ЗТВ	0,100372	-0,965510	-0,211783	-0,113325	-0,004579
Границя ЗТВ-основний метал	0,709882	-0,337308	-0,579077	-0,194100	-0,096361
Ферит 2	-0,946941	-0,202532	0,166328	-0,081387	-0,167314
Ферит 3	-0,913127	-0,323352	0,191761	0,128546	-0,091357
Ферит 4	-0,893714	0,248229	-0,260929	-0,267510	-0,003544
Перліт 2	-0,679250	-0,719896	0,064751	0,044184	0,119265
Перліт 3	-0,705382	-0,377928	-0,563624	0,190847	0,074247
Перліт 4	-0,675682	0,668985	-0,057219	-0,291238	0,088430
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,546941</i>	<i>2,973983</i>	<i>1,058407</i>	<i>0,344187</i>	<i>0,076481</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,505216</i>	<i>0,330443</i>	<i>0,117601</i>	<i>0,038243</i>	<i>0,008498</i>
Автоматичне зварювання під шаром флюсу					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,792933	-0,397375	-0,229872	-0,308762	0,255295
ЗТВ	0,933627	-0,095213	0,212584	0,272093	-0,006962
Границя ЗТВ-основний метал	0,565164	-0,765632	0,209037	-0,047826	0,220030
Ферит 2	-0,460557	0,219831	-0,811211	0,279432	0,058444
Ферит 3	-0,484979	-0,657635	0,120414	0,563721	0,005555
Ферит 4	-0,084298	0,802668	0,489297	0,169072	0,283937
Перліт 2	-0,917851	-0,053553	0,309293	0,097693	-0,222430
Перліт 3	-0,955348	0,090657	0,147659	0,197000	0,135936
Перліт 4	-0,870688	-0,107884	0,399570	-0,255406	-0,073314
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,787475</i>	<i>1,900976</i>	<i>1,330826</i>	<i>0,709690</i>	<i>0,271033</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,531942</i>	<i>0,211220</i>	<i>0,147870</i>	<i>0,078854</i>	<i>0,030115</i>

Таблиця Б.4 – Факторні навантаження різними методами обертання сталі
10ХСНД

Лазерне зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,86882	-0,24126	0,87544	0,21520	-0,87544	0,21582
ЗТВ	-0,40528	-0,86713	0,43040	0,85499	-0,43040	0,85493
Границя ЗТВ-основний метал	-0,89858	0,16432	0,893351	-0,19049	-0,89331	0,19049
Ферит 2	0,914527	-0,21583	-0,90781	0,24248	0,90784	0,24241
Ферит 3	0,109775	0,91839	-0,136520	-0,91480	0,136520	0,91480
Ферит 4	-0,300436	0,94194	0,272829	-0,95031	-0,272829	0,95031
Перліт 2	0,570078	-0,24994	-0,56253	0,26643	0,562557	0,26647
Перліт 3	0,832716	0,29023	-0,840824	-0,26582	0,840828	0,26582
Перліт 4	0,806293	0,33617	-0,815756	-0,31250	0,815756	0,31250
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,333649</i>	<i>2,87415</i>	<i>4,355973</i>	<i>2,851826</i>	<i>4,355973</i>	<i>2,85182</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>-0,481517</i>	<i>0,31935</i>	<i>0,483997</i>	<i>0,316870</i>	<i>0,483997</i>	<i>0,31687</i>
Електронно-променеве зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,063449	-0,8449	-0,07660	0,83444	-0,02660	0,83644
ЗТВ	0,31924	0,91671	0,279700	0,929544	0,27970	0,92954
Границя ЗТВ-основний метал	-0,49938	0,60689	-0,52491	-0,58959	-0,524912	0,58495
Ферит 2	0,94399	0,21887	0,95180	0,178281	0,951805	0,17828
Ферит 3	0,964006	0,09512	0,967195	0,053765	0,967195	0,03765
Ферит 4	0,703646	-0,60338	0,728876	0,573656	0,728876	0,57365
Перліт 2	0,920713	0,36320	0,904317	0,402296	0,904317	0,40229

Продовження таблиці Б.4

Електронно-променеє зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Перліт 3	0,799115	0,04252	0,796562	0,076698	0,796562	0,07669
Перліт 4	0,327539	-0,89263	0,36549	0,877796	0,365459	0,87779
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,263144</i>	<i>3,2577</i>	<i>4,313051</i>	<i>3,207874</i>	<i>4,313051</i>	<i>3,20787</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,473683</i>	<i>0,36197</i>	<i>0,479228</i>	<i>0,356430</i>	<i>0,479228</i>	<i>0,35643</i>
Автоматичне зварювання під шаром флюсу						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	0,70167	0,44599	0,75407	0,438221	0,75407	0,43822
ЗТВ	-0,74982	0,01549	-0,833784	-0,02769	-0,83374	0,02749
Границя ЗТВ-основний метал	-0,29943	0,62884	-0,39893	0,642217	-0,398939	0,64221
Феррит 2	0,070362	0,11080	0,216300	0,092064	0,216300	0,09206
Феррит 3	0,601181	0,55151	0,575866	-0,55386	0,57586	0,55386
Ферит 4	0,122679	-0,93130	0,104104	0,929333	0,104104	0,92933
Перліт 2	0,96048	0,08345	0,96250	0,08579	0,95250	-0,0856
Перліт 3	0,90768	-0,15306	0,94397	0,15922	0,94397	0,15922
Перліт 4	0,961595	0,06836	0,948739	0,068344	0,948739	0,06834
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,196753</i>	<i>1,81347</i>	<i>4,535111</i>	<i>1,821505</i>	<i>4,535111</i>	<i>1,82150</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,466306</i>	<i>0,20149</i>	<i>0,503901</i>	<i>0,202389</i>	<i>0,503901</i>	<i>0,20238</i>

Таблиця Б.5 – Співвідношення факторних навантажень відносно структурних складових сталі 10Г2ФБ для різних типів зварювання

Лазерне зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	0,843572	0,352248	0,141377	-0,352627	0,141330
ЗТВ	0,505288	0,417251	-0,468685	0,573759	-0,147379

Продовження таблиці Б.5

Лазерне зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя ЗТВ- основний метал	-0,087888	0,689691	0,499764	0,504838	0,109433
Ферит 2	-0,751211	-0,379532	0,533931	0,034149	0,073409
Ферит 3	-0,790468	0,396656	0,126276	-0,366200	-0,260339
Ферит 4	-0,942708	0,204975	-0,115236	0,054592	0,230276
Перліт 2	-0,729156	0,056358	-0,640779	-0,035129	0,230918
Перліт 3	-0,833336	-0,484766	-0,173610	0,114462	-0,165259
Перліт 4	-0,737225	0,626210	0,111421	0,213957	-0,078541
Бейніт 4	0,147205	-0,862188	0,163036	0,455655	0,027583
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,843798</i>	<i>2,490927</i>	<i>1,283459</i>	<i>1,114390</i>	<i>0,267426</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,484380</i>	<i>0,249093</i>	<i>0,128346</i>	<i>0,111439</i>	<i>0,026743</i>
Електронно-променеве зварювання					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	0,555594	-0,442670	-0,701755	-0,053845	0,000199
ЗТВ	0,516615	0,729839	0,194040	-0,394573	-0,084294
Границя ЗТВ- основний метал	0,631307	-0,253008	-0,720874	0,069521	-0,113782
Ферит 2	-0,773136	-0,494994	0,366900	0,113757	-0,098408
Ферит 3	-0,907715	-0,174655	-0,243893	-0,292996	-0,014799
Ферит 4	-0,503130	-0,793868	-0,056847	-0,334563	0,038329
Перліт 2	-0,950346	0,176747	-0,175907	0,150379	-0,109754
Перліт 3	-0,628144	0,673112	-0,384192	-0,058811	-0,035959
Перліт 4	-0,687981	0,466944	-0,537683	0,073398	0,118979
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,419991</i>	<i>2,400740</i>	<i>1,714751</i>	<i>0,405599</i>	<i>0,058919</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,491110</i>	<i>0,266749</i>	<i>0,190528</i>	<i>0,045067</i>	<i>0,006547</i>
Автоматичне зварювання під шаром флюсу					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,643732	0,671529	0,113467	-0,133112	0,322590

Продовження таблиці Б.5

Автоматичне зварювання під шаром флюсу					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
ЗТВ	-0,011988	-0,890220	0,221543	-0,258318	0,302580
Границя ЗТВ- основний метал	-0,995040	0,069911	0,006947	0,044666	-0,054455
Ферит 2	0,841856	-0,025904	0,353070	0,383377	0,137733
Ферит 3	0,850011	-0,034544	0,238185	-0,326668	-0,335922
Ферит 4	0,865807	0,207536	0,328219	0,280876	0,143836
Перліт 2	0,515433	0,740390	0,195418	-0,380318	0,057626
Перліт 3	-0,762517	0,142040	0,511774	0,306240	-0,206633
Перліт 4	-0,499276	-0,178954	0,824688	-0,194161	-0,029829
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,681881</i>	<i>1,893643</i>	<i>1,331335</i>	<i>0,695146</i>	<i>0,397995</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,520209</i>	<i>0,210405</i>	<i>0,147926</i>	<i>0,077238</i>	<i>0,044222</i>

Таблиця Б.6 – Факторні навантаження різними методами обертання сталі
10Г2ФБ

Лазерне зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,89799	-0,17110	-0,91167	-0,067455	-0,911670	-0,067455
ЗТВ	-0,651594	0,069563	-0,639382	0,143544	-0,639382	0,143544
Границя ЗТВ- основний метал	-0,306888	0,623873	-0,233609	0,654847	-0,233609	0,654847
Ферит 2	0,835979	0,097479	0,841642	0,001341	0,841642	0,001341
Ферит 3	0,440832	0,766709	0,525533	0,711330	0,525533	0,711330
Ферит 4	0,673520	0,690713	0,748016	0,609250	0,748016	0,609250
Перліт 2	0,577279	0,448992	0,624792	0,380106	0,624792	0,380106
Перліт 3	0,962511	0,054955	0,962488	-0,055359	0,962488	-0,055359
Перліт 4	0,269861	0,928878	0,374207	0,891969	0,374207	0,891969

Продовження таблиці Б.6

Лазерне зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Бейніг 4	0,352494	0,800499	0,258740	-0,835518	0,258740	-0,835518
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>4,128730</i>	<i>3,205995</i>	<i>4,362323</i>	<i>2,972401</i>	<i>4,362323</i>	<i>2,972401</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,412873</i>	<i>0,320599</i>	<i>0,436232</i>	<i>0,297240</i>	<i>0,436232</i>	<i>0,297240</i>
Електронно-променеве зварювання						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	-0,710325	0,008866	-0,709782	0,029150	-0,709782	0,029150
ЗТВ	0,039601	-0,89330	0,014071	-0,894068	0,014071	-0,894068
Границя ЗТВ-основний метал	-0,653799	0,187371	-0,658884	-0,168621	-0,658884	-0,168621
Ферит 2	0,307044	0,865149	0,331629	0,856027	0,331629	0,856027
Ферит 3	0,609812	0,694679	0,629405	0,676979	0,629405	0,676979
Ферит 4	-0,089523	0,935603	-0,062764	0,937778	-0,062764	0,937778
Перліт 2	0,859010	0,443281	0,871321	0,418565	0,871321	0,418565
Перліт 3	0,908966	-0,14677	0,904414	-0,172278	0,904414	-0,172278
Перліт 4	0,829776	0,053160	0,830956	0,029438	0,830956	0,029438
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>3,660391</i>	<i>3,160340</i>	<i>3,715837</i>	<i>3,104894</i>	<i>3,715837</i>	<i>3,104894</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,406710</i>	<i>0,351149</i>	<i>0,412871</i>	<i>0,344988</i>	<i>0,412871</i>	<i>0,344988</i>
Автоматичне зварювання під шаром флюсу						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя зварний шов – ЗТВ	0,475530	0,697030	0,562411	-0,683197	-0,562411	0,683197
ЗТВ	-0,041157	0,895802	-0,051741	0,887203	0,051741	-0,887203

Продовження таблиці Б.6

Автоматичне зварювання під шаром флюсу						
	метод варімакс		метод квартімакс		метод еквімакс	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Границя ЗТВ- основний метал	0,870256	-0,11686	0,936010	-0,086136	-0,936010	0,086136
Ферит 2	-0,906106	0,078156	-0,910879	0,035356	0,910879	-0,035357
Ферит 3	-0,859061	0,083177	-0,880522	0,045498	0,880522	-0,045498
Ферит 4	-0,929213	-0,15463	-0,927930	-0,197351	0,927930	0,197350
Перліт 2	-0,589145	-0,70780	-0,559447	-0,734202	0,559448	0,734202
Перліт 3	0,424861	-0,16026	0,548958	-0,160495	-0,548958	0,160495
Перліт 4	0,065049	0,183557	0,200793	0,160976	-0,200793	-0,160976
<i>Загальна дисперсія</i>	<i>3,939448</i>	<i>1,899268</i>	<i>4,315826</i>	<i>1,894298</i>	<i>4,315825</i>	<i>1,894298</i>
<i>Доля дисперсії</i>	<i>0,437716</i>	<i>0,211030</i>	<i>0,479536</i>	<i>0,210478</i>	<i>0,479536</i>	<i>0,210478</i>

ДОДАТОК В
РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ

Таблиця В.1 – Коефіцієнти рівняння регресії для власних значень для четвертого фактору

Фактор 4	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Сталь 09Г2С							
Лазерне зварювання		0,1957	-	-	0,0091	0,0021	-
		55	0,0323	0,0166	20	78	
Електронно-променевого зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,6281	0,0092	-	-	-	-
		33	92	0,0115	0,0046	0,0651	
Зварювання під шаром флюсу		0,2170	-	0,0060	-	-	-
		89	0,0016	56	0,0060	0,0010	
Сталь 10ХСНД							
Лазерне зварювання		-	-	0,0099	0,0249	-	-
		0,0033	0,0054	34	99	0,0184	
Електронно-променевого зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,4435	0,0041	0,0250	-	-	-
		90	72	83	0,0225	0,0335	
Зварювання під шаром флюсу		0,2222	0,0406	0,0006	-	0,0146	-
		17	81	55	0,0525	16	
Сталь 10Г2ФБ							
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4 + B_5 \cdot X_5$	0,6149	-	0,0020	0,0357	-	-
		50	0,0512	41	85	0,0245	0,07403
			10			92	9

Продовження таблиці В.1

Фактор 4	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		В ₀	В ₁	В ₂	В ₃	В ₄	В ₅
Сталь 10Г2ФБ							
Електронно-променевого зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4 + V_5 \cdot X_5$	-	-	0,0602	0,0579	-	-
		0,3540	0,0446	41	07	0,0245	
		55	41			92	
Зварювання під шаром флюсу	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	0,0530	-	-	-	0,0470	-
		03	0,0087	0,0096	0,0324	35	
			32	73	38		

Таблиця В.2 – Коефіцієнти рівняння регресії для загального відсотка дисперсії четвертого фактору

Фактор 4	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		В ₀	В ₁	В ₂	В ₃	В ₄	В ₅
Сталь 09Г2С							
Лазерне зварювання		1,1967	-	-	-	0,1458	-
		81	0,0240	0,0582	0,0427	37	
			52	21	72		
Електронно-променевого зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	15,374	-	-	-	-	-
		14	0,1530	0,5101	0,0146	1,1363	
			8	1	3	1	
Зварювання під шаром флюсу		4,7556	-	-	-	-	-
		14	0,0860	0,0499	0,0185	0,1357	
			92	37	44	55	
Сталь 10ХСНД							
Лазерне зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	1,5066	-	0,0366	0,1742	-	-
		79	0,1235	26	48	0,0944	
			45			61	

Продовження таблиці В.2

Фактор 4	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Сталь 10ХСНД							
Електронно-променевого зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,4435	0,0041	0,0250	-	-	-
		90	72	83	0,0225	0,0335	
Зварювання під шаром флюсу		3,6225	0,0608	-	-	0,0776	-
		50	62	0,0573	0,3121	04	
Сталь 10Г2ФБ							
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4 + B_5 \cdot X_5$	3,4367	-	0,2408	-	-	0,12968
		94	0,0207	16	0,4168	0,1423	7
			17		49	59	
Електронно-променевого зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	-	-	0,8319	0,5961	-	-
		5,6743	0,5969	9	6	0,0876	
Зварювання під шаром флюсу		2	9			0	
		0,2192	-	-	-	0,3735	-
		68	0,0103	0,2029	0,1287	98	
			06	03	42		

Таблиця В.3 – Коефіцієнти рівняння регресії для власних значень для п'ятого фактору

Фактор 5	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Сталь 09Г2С							
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,1567	0,0086	0,0084	-	-	-
		79	71	77	0,0709	0,3687	
					17	02	

Продовження таблиці В.3

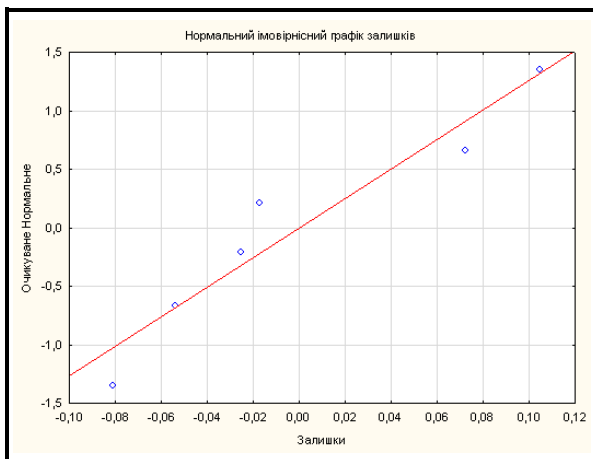
Фактор 5	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
Сталь 09Г2С							
Електронно-променевого зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	-	0,0056	0,0063	0,0375	0,1082	-
		0,1446	87	66	32	47	-
Зварювання під шаром флюсу	$X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	1,2343	-	-	-	-	-
		6	0,0257	0,0674	0,1435	2,4348	-
		0	0	5	2		
Сталь 10ХСНД							
Лазерне зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	0,1538	-	-	-	-	-
		15	0,0028	0,0081	0,0340	0,0939	-
Електронно-променевого зварювання	$X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	85	75	91	22	-	
		0,0307	-	0,0001	0,0158	-	-
Зварювання під шаром флюсу	$X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	65	0,0025	65	41	0,0311	-
		81	-	0,0061	0,0101	0,1841	-
		-	-	00	05	43	-
		0,0007	0,0082	15			
		70					
Сталь 10Г2ФБ							
Лазерне зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4 + V_5 \cdot X_5$	0,3197	-	0,0431	-	0,0559	-
		16	0,0404	44	0,0468	81	0,07332
Електронно-променевого зварювання	$X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	67	88			0	
		0,0083	-	0,0006	-	0,0303	-
Зварювання під шаром флюсу	$X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	76	0,0006	55	0,0030	32	-
		92	92	25			
		0,0240	0,0045	-	0,0130	0,4478	-
		92	77	0,0050	53	12	-
				38			

Таблиця В.4 – Коефіцієнти рівняння регресії для загального відсотка дисперсії п'ятого фактору

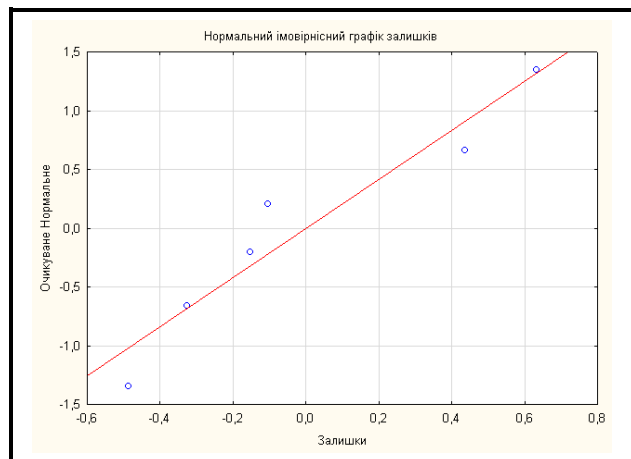
Фактор 5	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		В ₀	В ₁	В ₂	В ₃	В ₄	В ₅
Сталь 09Г2С							
Лазерне зварювання		1,4569	0,0254	-	-	0,8590	-
		9	0	0,0988	1,0619	2	
Електронно-променевого зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,9660	-	-	-	0,3434	-
		48	0,0196	0,0565	0,1392	74	
Зварювання під шаром флюсу		5,2537	-	-	-	-	-
		8	0,1092	0,2453	0,4148	3,1883	
Сталь 10ХСНД							
Лазерне зварювання		1,6697	-	-	-	-	-
		02	0,0604	0,0430	0,7542	0,5293	
Електронно-променевого зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4$	0,0307	-	0,0001	0,0158	-	-
		65	0,0025	65	41	0,0311	
Зварювання під шаром флюсу		3,2384	0,1325	-	-	-	-
		0	3	0,2648	0,4641	2,1237	
Сталь 10Г2ФБ							
Лазерне зварювання	$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4 + B_5 \cdot X_5$	-	0,1550	-	1,5034	-	0,43705
	$X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_4 \cdot X_4 + B_5 \cdot X_5$	2,2398	4	0,1397	6	0,0612	
		2		2		6	

Продовження таблиці В.4

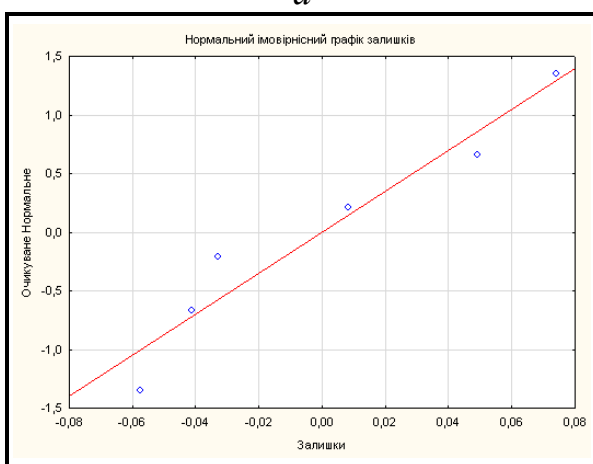
Фактор 5	Зовнішній вид рівняння	Коефіцієнти рівняння					
		V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
Сталь 10Г2ФБ							
Електронно-променевого зварювання	$y = V_0 + V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3 + V_4 \cdot X_4$	0,1161	0,0022	-	0,0168	0,5167	-
		01	69	0,0098	59	08	
Зварювання під шаром флюсу		-	0,1082	-	0,0614	11,446	-
		0,5462	3	0,0460	7	42	
		3		0			



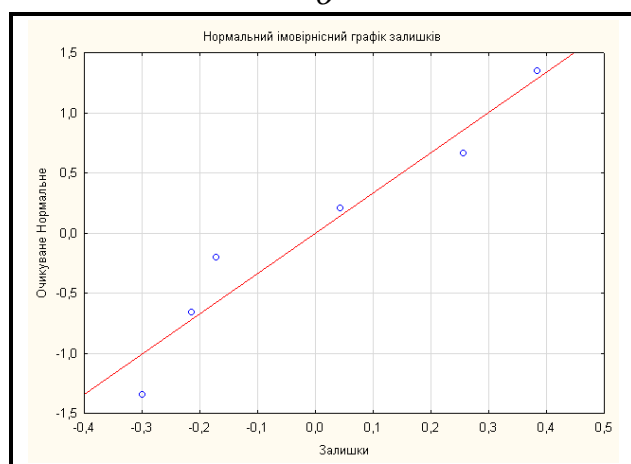
а



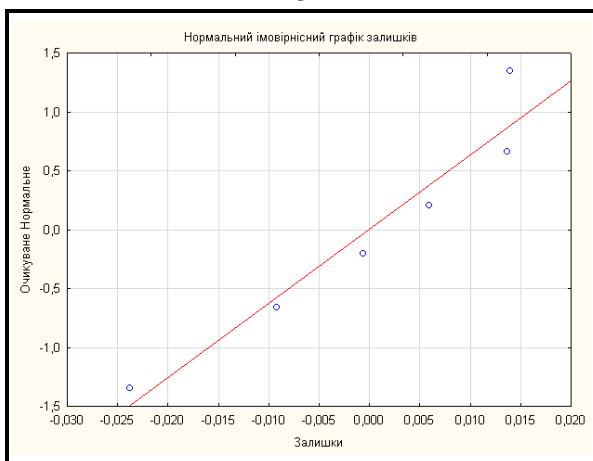
б



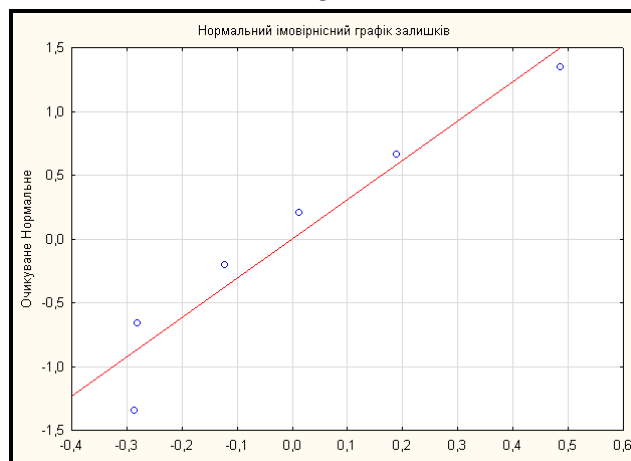
в



г

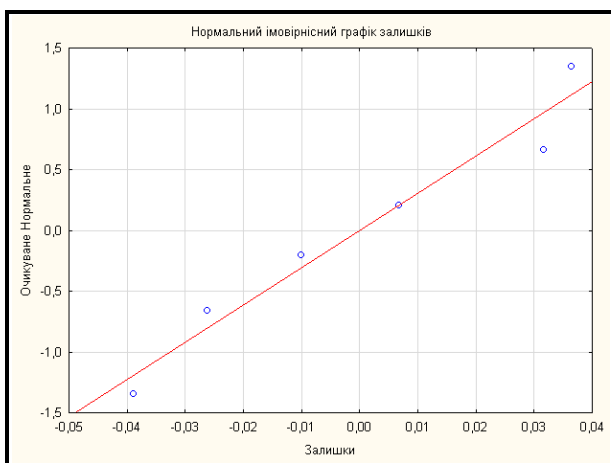


д

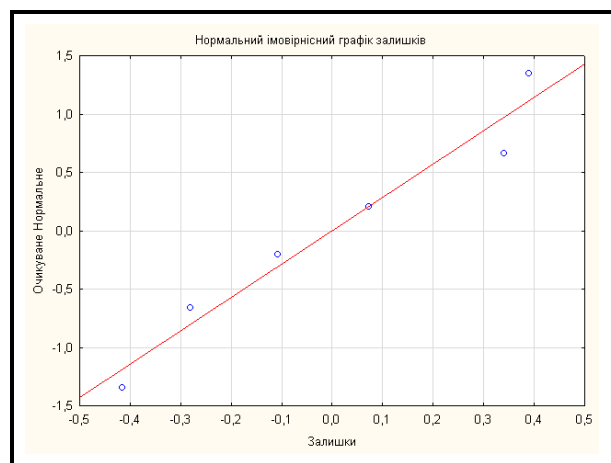


е

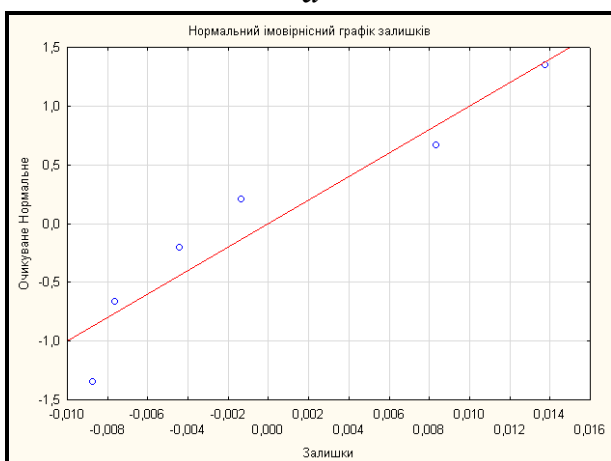
Рисунок В.1 – Нормальний імовірнісний графік залишків четвертого фактору сталі 09Г2С



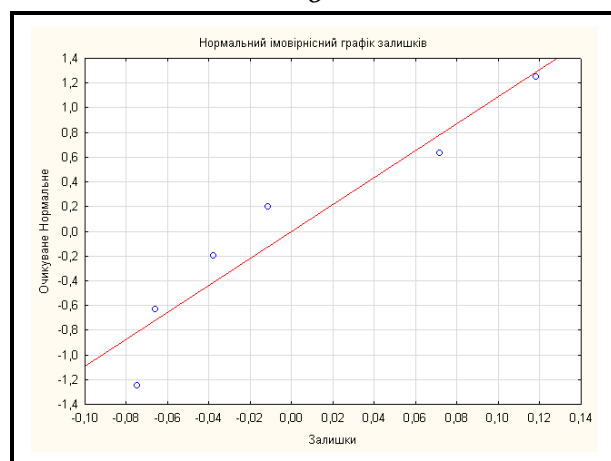
а



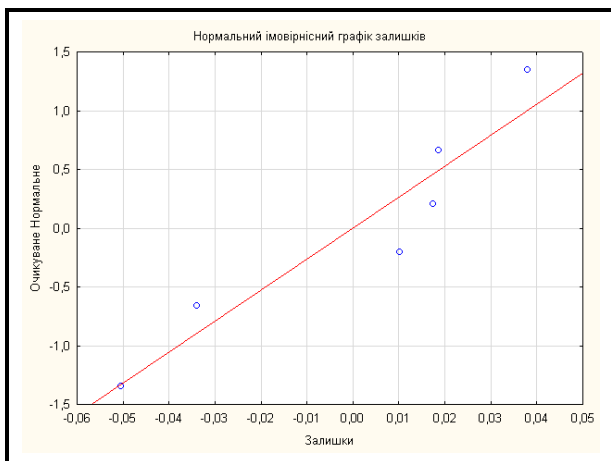
б



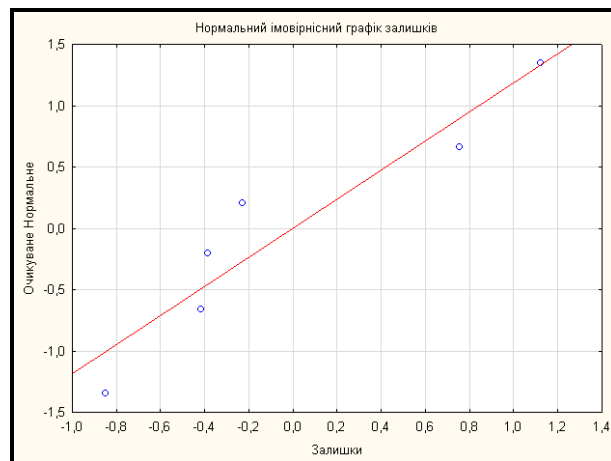
в



г

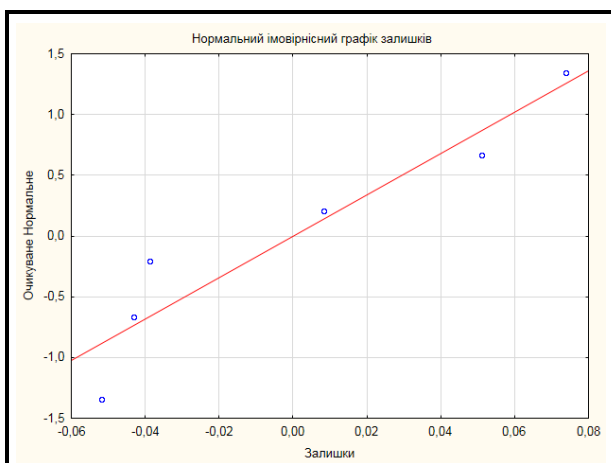


д

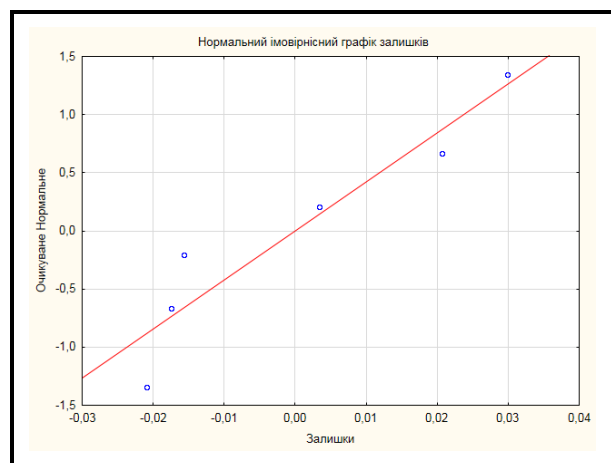


е

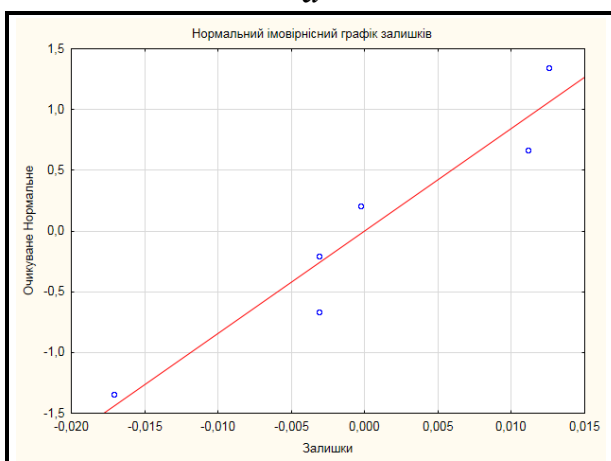
Рисунок В.2 – Нормальний імовірнісний графік залишків четвертого фактору сталі 10XCHD



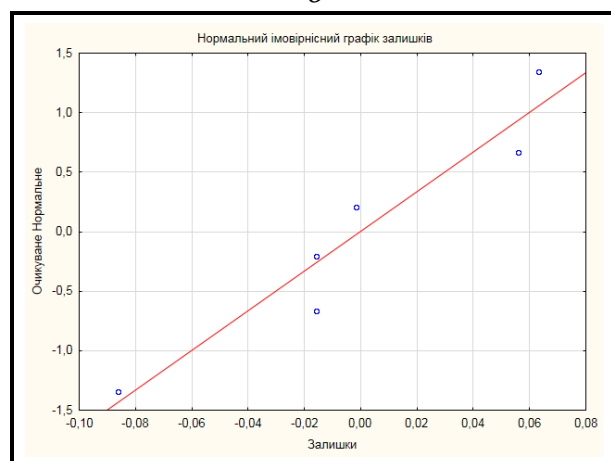
а



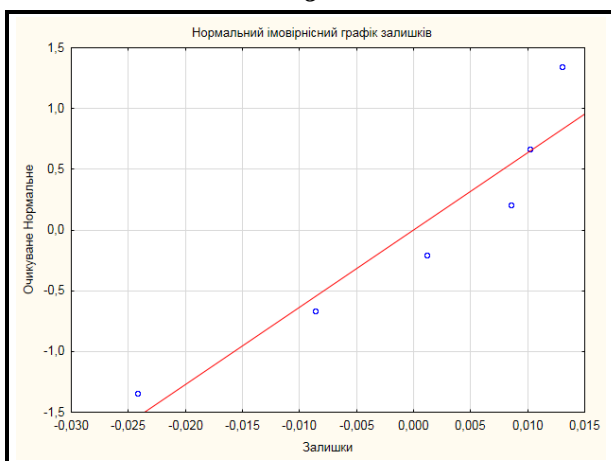
б



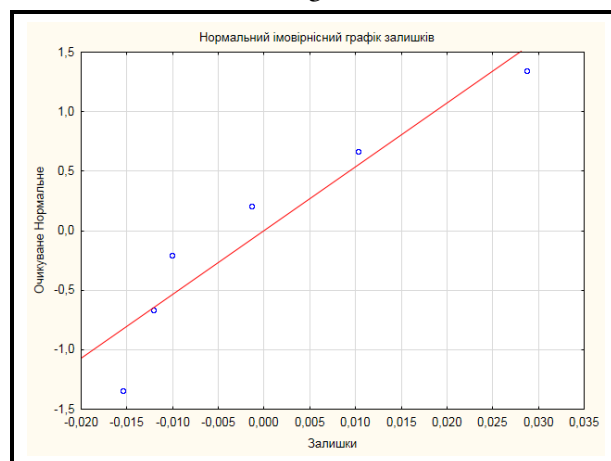
в



г

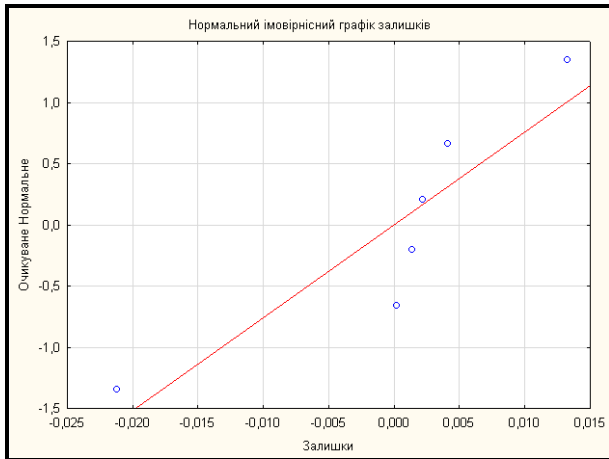


д

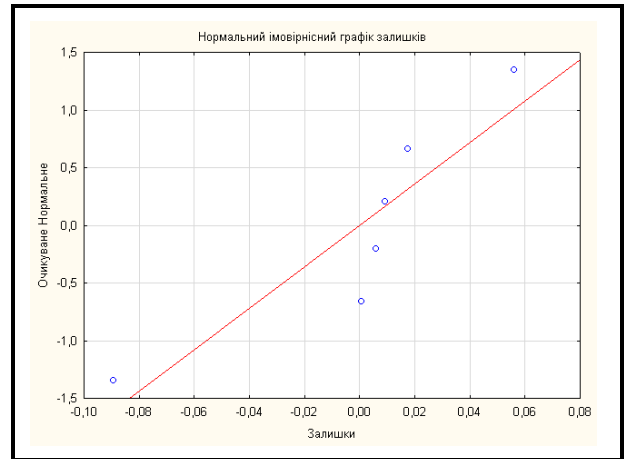


е

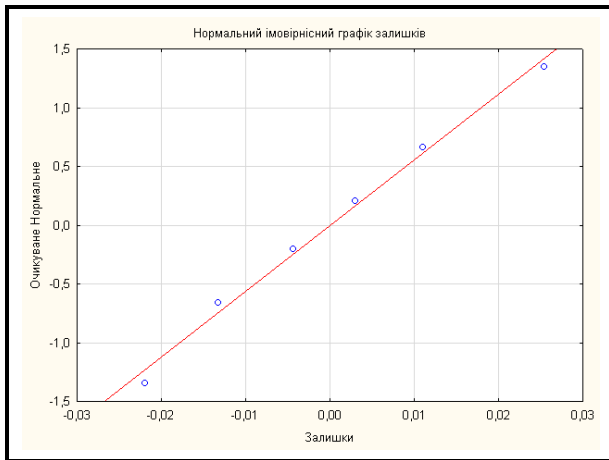
Рисунок В.3 – Нормальний імовірнісний графік залишків четвертого фактору сталі 10Г2ФБ



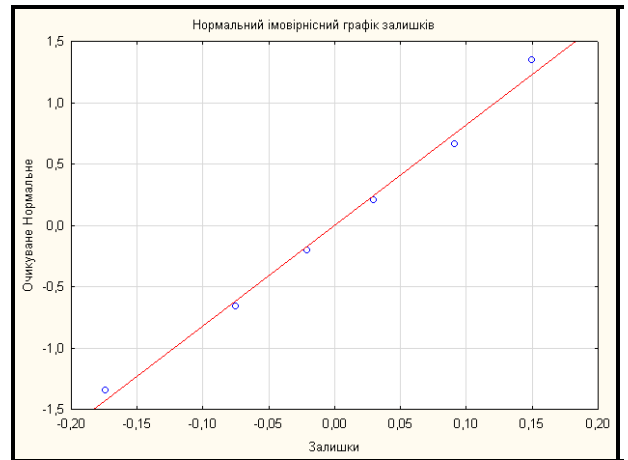
a



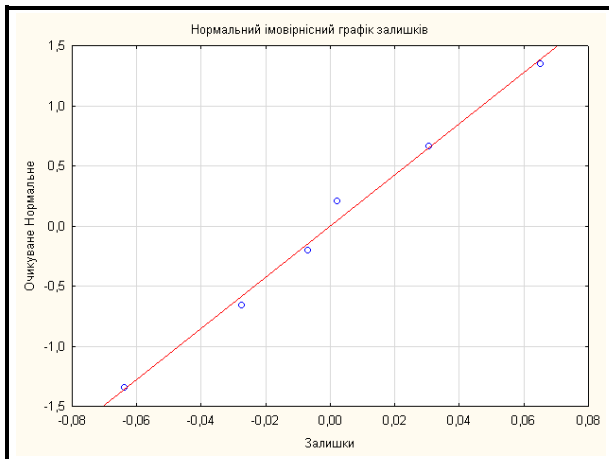
б



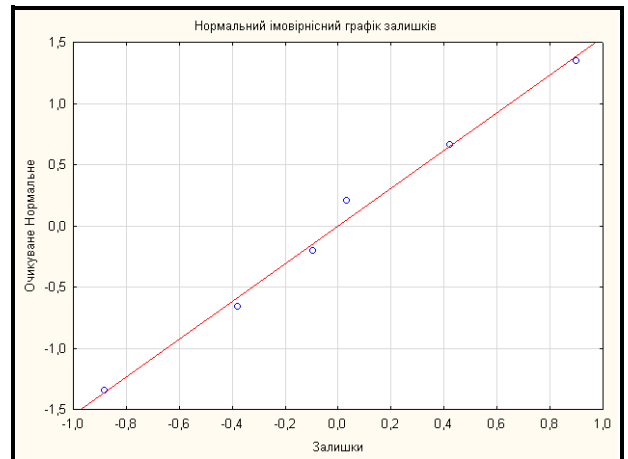
в



г



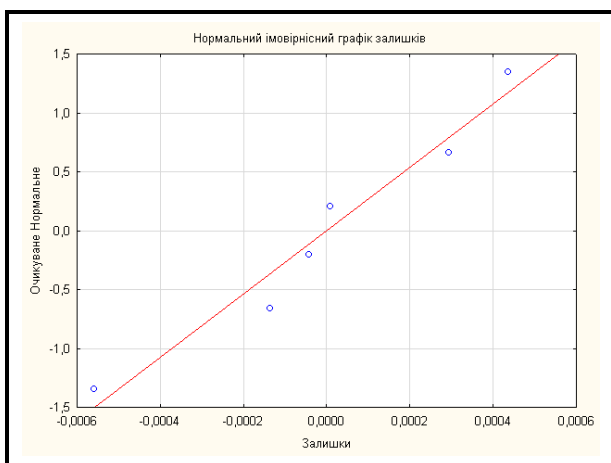
д



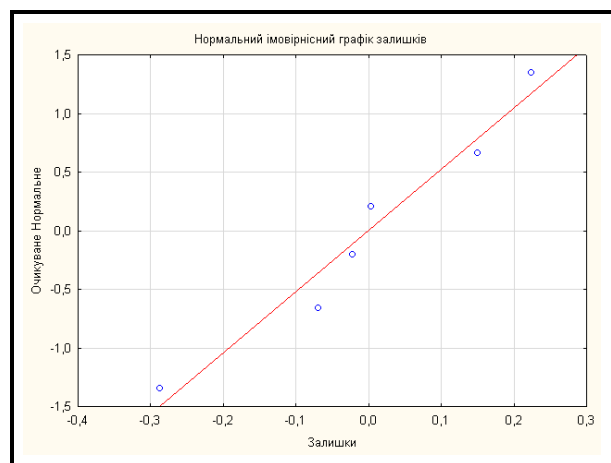
е

Рисунок В.4 – Нормальний імовірнісний графік залишків п'ятого фактору сталі

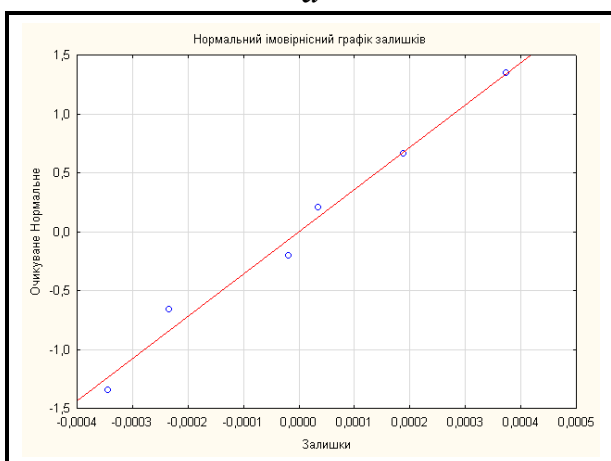
09Г2С



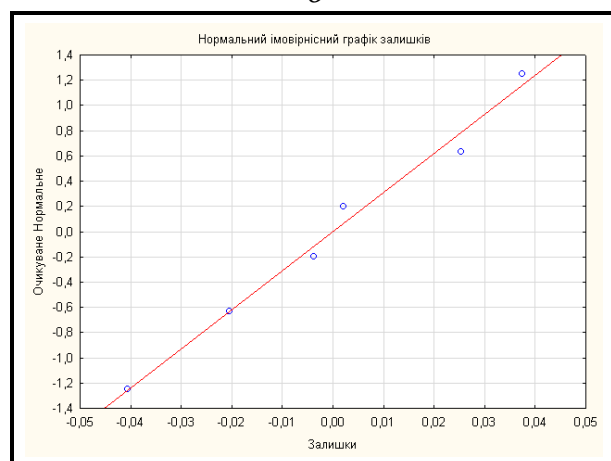
а



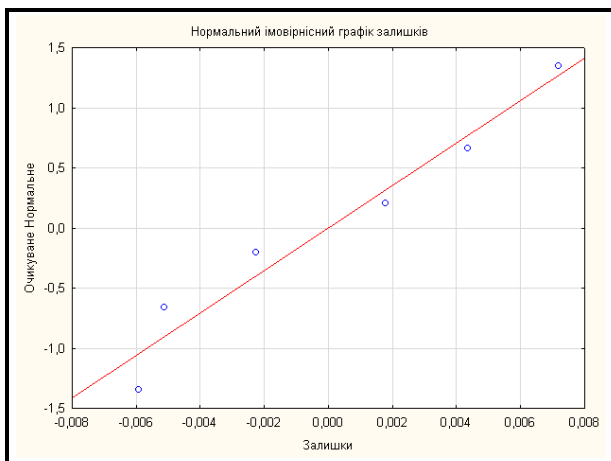
б



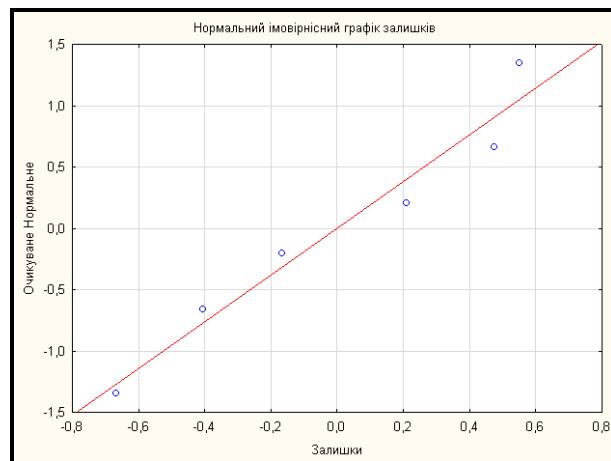
в



г

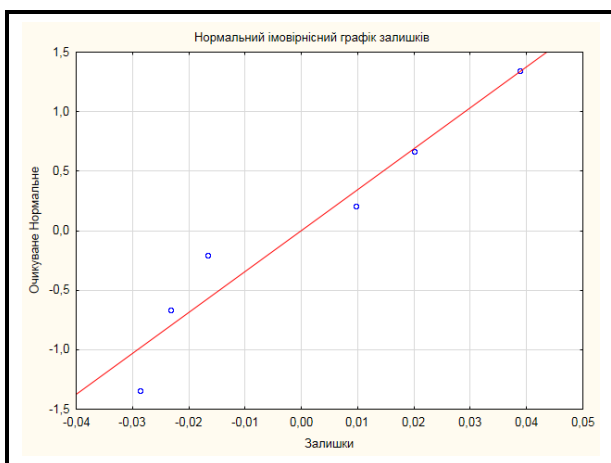


д

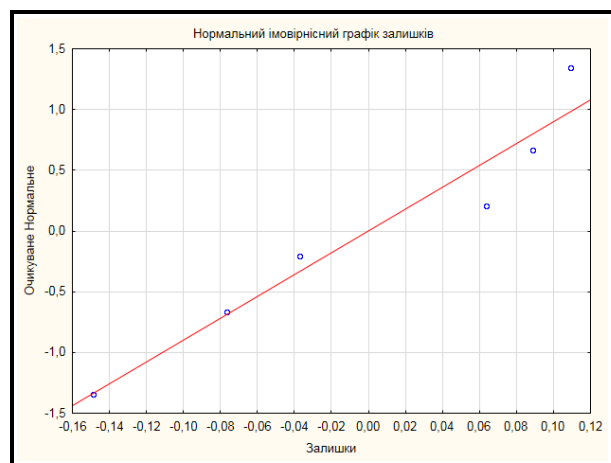


е

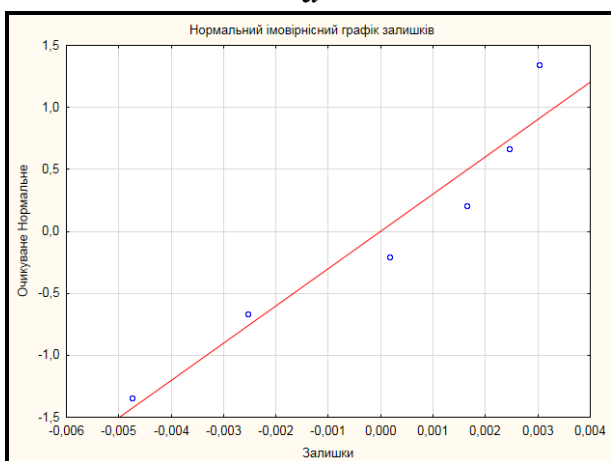
Рисунок В.5 – Нормальний імовірнісний графік залишків п'ятого фактору сталі 10XСНД



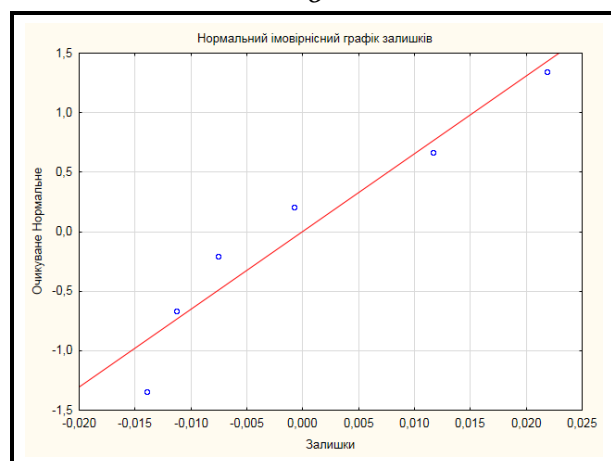
а



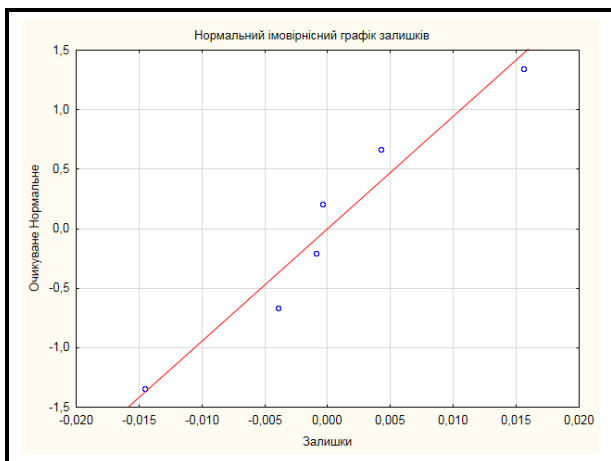
б



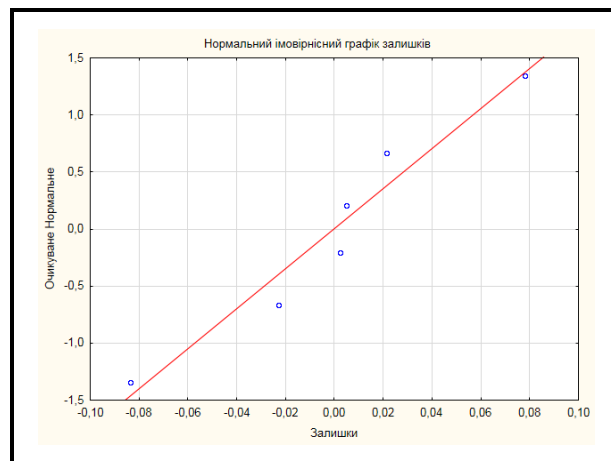
в



г



д



е

Рисунок В.6 – Нормальний імовірнісний графік залишків п'ятого фактору сталі 10Г2ФБ

ДОДАТОК Г

МОДЕЛЬ ПІДТВЕРДЖУЮЧОГО ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ

(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	(U7)-->[ZONAI]
-2->[FERRITE3]	(U8)-->[ZONAI]
-3->[FERRITE4]	(U9)-->[GRZON]
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	(U1)-11-(U1)
-5->[PERLITE3]	(U2)-12-(U2)
-6->[PERLITE4]	(U3)-13-(U3)
-7->[ZONAI]	(U4)-14-(U4)
(GEOMETRY) -8->[ZONAI]	(U5)-15-(U5)
-9->[ZONAI]	(U6)-16-(U6)
-10->[GRZON]	(U7)-17-(U7)
(U1)-->[FERRITE2]	(U8)-18-(U8)
(U2)-->[FERRITE3]	(U9)-19-(U9)
(U3)-->[FERRITE4]	(STRUCTURE1)-20-(STRUCTURE2)
(U4)-->[PERLITE2]	(STRUCTURE2)-21-(GEOMETRY)
(U5)-->[PERLITE3]	(STRUCTURE1)-22-(GEOMETRY)
(U6)-->[PERLITE4]	

Таблиця Г.1 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу після коваріаційного аналізу для сталі 09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	0,07	0,17	0,45	0,66
-2->[FERRITE3]	0,60	0,15	3,96	0,01
-3->[FERRITE4]	0,82	0,14	5,93	0,06
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,80	0,14	5,68	0,01
-5->[PERLITE3]	0,98	0,12	8,02	0,01
-6->[PERLITE4]	0,98	0,12	8,00	0,04
-7->[ZONAI]	1,27	0,16	7,95	0,03
(GEOMETRY) -8->[ZONAI]	-1,51	0,19	-7,95	0,03
-9->[ZONAI]	-0,46	0,16	-2,88	0,01
-10->[GRZON]	1,00	0,12	8,37	0,00
(U1)-11-(U1)	0,99	0,24	4,18	0,01
(U2)-12-(U2)	0,64	0,15	4,22	0,06
(U3)-13-(U3)	0,33	0,08	4,22	0,00
(U4)-14-(U4)	0,37	0,09	4,14	0,00
(U5)-15-(U5)	0,04	0,01	3,26	0,00
(U6)-16-(U6)	0,04	0,01	3,32	0,06
(U7)-17-(U7)	0,01	0,01	0,93	0,35
(U8)-18-(U8)	0,79	0,19	4,18	0,00
(U9)-19-(U9)	0,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,85	0,08	10,26	0,00
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	1,00	0,00	-	-

Продовження таблиці Г.1

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	1,05	0,21	4,93	0,00
-2->[FERRITE3]	0,13	0,78	0,17	0,87
-3->[FERRITE4]	1,31	0,17	7,62	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,72	0,24	3,04	0,00
-5->[PERLITE3]	-0,97	0,68	-1,42	0,16
-6->[PERLITE4]	1,12	0,15	7,62	0,00
-7->[ZONAI]	-0,66	0,15	-4,27	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	-0,71	0,15	-4,65	0,00
-9->[ZONAI]	0,27	0,04	6,90	0,00
-10->[GRZON]	-0,15	0,08	-1,86	0,06
(U1)-11-(U1)	0,76	0,20	3,81	0,00
(U2)-12-(U2)	17,80	4,67	3,81	0,00
(U3)-13-(U3)	0,00	0,00	-	-
(U4)-14-(U4)	1,36	0,36	3,81	0,00
(U5)-15-(U5)	13,08	3,43	3,81	0,00
(U6)-16-(U6)	0,00	0,00	-	-
(U7)-17-(U7)	0,00	0,00	-	-
(U8)-18-(U8)	0,01	0,00	3,81	0,00
(U9)-19-(U9)	0,19	0,05	3,81	0,00
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	-0,82	0,06	-13,27	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	-0,94	0,03	-32,24	0,00
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	0,64	0,12	5,52	0,00

Продовження таблиці Г.1

Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,31	0,05	6,24	0,00
-2->[FERRITE3]	-0,04	1,61	-0,02	0,98
-3->[FERRITE4]	0,21	0,03	6,79	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,35	1,00	0,35	0,72
-5->[PERLITE3]	0,34	0,12	2,86	0,00
-6->[PERLITE4]	0,35	0,09	3,93	0,00
-7->[ZONAI]	0,50	0,26	1,90	0,06
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,50	0,22	2,28	0,02
-9->[ZONAI]	0,35	0,21	1,66	0,10
-10->[GRZON]	0,30	0,10	3,02	0,00
(U1)-11-(U1)	0,00	0,01	0,00	1,00
(U2)-12-(U2)	8,64	8,93	0,97	0,33
(U3)-13-(U3)	0,00	0,00	0,00	1,00
(U4)-14-(U4)	0,00	1,08	0,00	1,00
(U5)-15-(U5)	4,53	0,03	171,89	0,00
(U6)-16-(U6)	0,00	0,01	0,00	1,00
(U7)-17-(U7)	0,00	0,08	0,00	1,00
(U8)-18-(U8)	0,80	0,10	7,70	0,00
(U9)-19-(U9)	0,38	0,03	14,48	0,00
(STRUCTURE1)-20-(STRUCTURE2)	0,49	0,08	6,25	0,00
(STRUCTURE2)-21-(GEOMETRY)	0,50	0,16	3,12	0,00
(STRUCTURE1)-22-(GEOMETRY)	0,62	0,04	14,99	0,00

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця Г.2 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу після коваріаційного аналізу для сталі 10XCHД після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	-0,49	0,16	-3,08	0,00
-2->[FERRITE3]	0,82	0,14	5,94	0,00
-3->[FERRITE4]	1,00	0,12	8,37	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,71	0,15	4,76	0,00
-5->[PERLITE3]	0,86	0,14	6,11	0,00
-6->[PERLITE4]	1,04	0,12	8,43	0,00
-7->[ZONAI]	3,65	0,15	4,24	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	4,44	0,00	-	-
-9->[ZONAI]	0,59	0,16	3,80	0,00
-10->[GRZON]	0,62	0,15	4,04	0,00
(U1)-11-(U1)	0,76	0,18	4,18	0,00
(U2)-12-(U2)	0,33	0,08	4,18	0,00
(U3)-13-(U3)	0,00	0,00	-	-
(U4)-14-(U4)	0,53	0,13	4,18	0,00
(U5)-15-(U5)	0,33	0,08	4,18	0,00
(U6)-16-(U6)	-0,00	0,00	-	-
(U7)-17-(U7)	0,00	0,00	-	-
(U8)-18-(U8)	0,68	0,16	4,18	0,00
(U9)-19-(U9)	0,64	0,15	4,18	0,00
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,09	0,17	0,54	0,59
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	-0,99	0,00	-2,75	0,00
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,08	0,17	-0,45	0,65

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,97	0,11	9,08	0,00
-2->[FERRITE3]	1,00	0,10	9,70	0,00
-3->[FERRITE4]	0,65	0,13	5,03	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	1,00	0,10	9,70	0,00
-5->[PERLITE3]	0,73	0,12	5,87	0,00
-6->[PERLITE4]	-0,03	0,15	-0,20	0,84
-7->[ZONAI]	-0,37	0,13	-2,95	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	-0,57	0,12	-4,70	0,00
-9->[ZONAI]	0,69	0,13	5,40	0,00
-10->[GRZON]	0,76	0,13	6,01	0,00
(U1)-11-(U1)	0,07	0,01	4,85	0,00
(U2)-12-(U2)	0,00	0,00	-	-
(U3)-13-(U3)	0,58	0,12	4,85	0,00
(U4)-14-(U4)	0,00	0,00	-	-
(U5)-15-(U5)	0,46	0,10	4,85	0,00
(U6)-16-(U6)	1,00	0,21	4,85	0,00
(U7)-17-(U7)	0,53	0,11	4,87	0,00
(U8)-18-(U8)	0,52	0,11	4,72	0,00
(U9)-19-(U9)	0,43	0,10	4,48	0,00
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,86	0,04	2,68	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	0,03	0,18	0,16	0,87
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,51	0,14	-3,67	0,00

Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,15	0,17	0,90	0,37
-2->[FERRITE3]	1,08	0,12	9,11	0,00
-3->[FERRITE4]	-0,36	0,16	-2,18	0,03
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,95	0,13	7,61	0,00
-5->[PERLITE3]	0,96	0,12	7,69	0,00
-6->[PERLITE4]	0,88	0,13	6,58	0,00
-7->[ZONAI]	1,52	0,41	3,70	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,82	0,37	2,22	0,03
-9->[ZONAI]	0,86	0,13	6,45	0,00
-10->[GRZON]	0,47	0,15	3,22	0,00
(U1)-11-(U1)	0,98	0,23	4,18	0,00
(U2)-12-(U2)	0,00	0,00	-	-
(U3)-13-(U3)	0,89	0,21	4,18	0,00
(U4)-14-(U4)	0,09	0,03	3,01	0,00
(U5)-15-(U5)	0,08	0,03	2,82	0,00
(U6)-16-(U6)	0,23	0,06	3,81	0,00
(U7)-17-(U7)	0,51	0,13	4,04	0,00
(U8)-18-(U8)	0,25	0,06	4,06	0,00
(U9)-19-(U9)	0,78	0,18	4,42	0,00
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,50	0,13	3,96	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	-1,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,15	0,18	-0,86	0,39

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця Г.3 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу після коваріаційного аналізу для сталі 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	0,68	0,1	4,55	0,00
-2->[FERRITE3]	0,77	0,9	6,30	0,00
-3->[FERRITE4]	0,92	0,33	1,94	0,00
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,83	0,44	5,32	0,00
-5->[PERLITE3]	0,30	0,10	5,21	0,00
-6->[PERLITE4]	0,92	0,11	10,09	0,00
-7->[ZONAI]	-0,48	0,01	1,41	0,12
(GEOMETRY) -8->[ZONAI]	0,38	0,10	-4,60	0,00
-9->[ZONAI]	1,22	0,17	0,12	0,3
-10->[GRZON]	0,35	0,9	14,10	0,00
(U1)-11-(U1)	0,52	0,16	2,25	0,00
(U2)-12-(U2)	0,39	0,01	-	-
(U3)-13-(U3)	0,14	0,44	2,33	0,00
(U4)-14-(U4)	0,31	0,05	1,3	0,00
(U5)-15-(U5)	0,94	0,02	3,29	0,00
(U6)-16-(U6)	0,15	0,09	0,25	0,44
(U7)-17-(U7)	0,69	0,11	6,15	0,00
(U8)-18-(U8)	0,00	0,15	3,15	0,00
(U9)-19-(U9)	0,92	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-20-(STRUCTURE2)	1,00	0,02	6,74	0,00
(STRUCTURE2)-21-(GEOMETRY)	0,07	0,12	-2,51	0,11
(STRUCTURE1)-22-(GEOMETRY)	-0,40	0,13	8,09	0,00

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,67	0,12	5,51	0,00
-2->[FERRITE3]	1,00	0,10	10,30	0,00
-3->[FERRITE4]	0,71	0,12	5,94	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,83	0,11	7,46	0,00
-5->[PERLITE3]	0,95	0,10	9,21	0,00
-6->[PERLITE4]	1,00	0,10	10,13	0,00
-7->[ZONAI]	-0,05	0,04	-1,41	0,16
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,96	0,10	9,60	0,00
-9->[ZONAI]	-0,02	0,14	-0,12	0,91
-10->[GRZON]	1,00	0,10	10,30	0,00
(U1)-11-(U1)	0,56	0,11	5,15	0,00
(U2)-12-(U2)	0,00	0,00	-	-
(U3)-13-(U3)	0,50	0,10	5,15	0,00
(U4)-14-(U4)	0,31	0,06	4,90	0,00
(U5)-15-(U5)	0,10	0,03	3,29	0,00
(U6)-16-(U6)	0,01	0,03	0,25	0,81
(U7)-17-(U7)	0,07	0,01	5,15	0,00
(U8)-18-(U8)	1,00	0,19	5,15	0,00
(U9)-19-(U9)	0,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,65	0,08	8,24	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	-0,19	0,13	-1,41	0,16
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,37	0,12	-3,14	0,00

Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,98	0,11	9,33	0,00
-2->[FERRITE3]	0,71	0,13	5,59	0,00
-3->[FERRITE4]	0,98	0,11	9,31	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	-0,32	0,14	-2,22	0,03
-5->[PERLITE3]	1,00	0,10	9,70	0,00
-6->[PERLITE4]	0,72	0,13	5,78	0,00
-7->[ZONAI]	0,02	0,18	0,11	0,92
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,65	0,19	3,37	0,00
-9->[ZONAI]	-0,08	0,15	-0,53	0,60
-10->[GRZON]	1,00	0,10	9,70	0,00
(U1)-11-(U1)	0,04	0,01	2,79	0,01
(U2)-12-(U2)	0,50	0,10	4,78	0,00
(U3)-13-(U3)	0,04	0,01	2,91	0,00
(U4)-14-(U4)	0,90	0,19	4,85	0,00
(U5)-15-(U5)	0,00	0,00	-	-
(U6)-16-(U6)	0,48	0,10	4,85	0,00
(U7)-17-(U7)	0,56	0,12	4,85	0,00
(U8)-18-(U8)	0,99	0,21	4,85	0,00
(U9)-19-(U9)	0,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	-0,41	0,12	-3,30	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	0,80	0,05	14,99	0,00
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,86	0,04	-21,26	0,00

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця Г.4 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу після кореляційного аналізу для сталі 09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	0,07	0,17	0,45	0,65
-2->[FERRITE3]	0,60	0,11	5,66	0,00
-3->[FERRITE4]	0,82	0,06	14,63	0,00
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,80	0,06	12,69	0,00
-5->[PERLITE3]	0,98	0,01	118,75	0,00
-6->[PERLITE4]	0,98	0,01	114,39	0,00
-7->[ZONAI]	1,27	0,22	5,88	0,00
(GEOMETRY) -8->[ZONAI]	-1,51	0,22	-6,93	0,00
-9->[ZONAI]	-0,46	0,13	-3,45	0,00
-10->[GRZON]	1,00	0,00	-	-
(U1)-11-(U1)	0,99	0,02	40,21	0,00
(U2)-12-(U2)	0,64	0,13	4,98	0,00
(U3)-13-(U3)	0,33	0,09	3,65	0,00
(U4)-14-(U4)	0,37	0,10	3,69	0,00
(U5)-15-(U5)	0,04	0,02	2,61	0,01
(U6)-16-(U6)	0,04	0,02	2,65	0,01
(U7)-17-(U7)	0,01	0,01	0,91	0,37
(U8)-18-(U8)	0,79	0,12	6,43	0,00
(U9)-19-(U9)	0,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-20-(STRUCTURE2)	0,85	0,08	10,25	0,00
(STRUCTURE2)-21-(GEOMETRY)	0,76	0,07	10,20	0,00
(STRUCTURE1)-22-(GEOMETRY)	1,00	0,00	-	-

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	1,11	0,12	0,35	0,21
-2->[FERRITE3]	-0,00	0,21	2,12	0,28
-3->[FERRITE4]	0,89	0,1	12,13	0,16
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,74	0,04	10,33	0,12
-5->[PERLITE3]	-0,57	0,02	16,75	0,19
-6->[PERLITE4]	0,42	0,09	14,66	0,28
-7->[ZONAI]	-0,28	0,4	3,11	0,55
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,91	0,11	5,13	0,21
-9->[ZONAI]	-0,18	0,09	1,55	0,11
-10->[GRZON]	0,31	0,07	0,03	0,07
(U1)-11-(U1)	0,13	0,11	4,81	0,23
(U2)-12-(U2)	1,28	0,15	8,32	0,55
(U3)-13-(U3)	0,33	0,05	4,75	0,04
(U4)-14-(U4)	0,50	0,18	1,39	0,01
(U5)-15-(U5)	1,57	0,06	6,25	0,08
(U6)-16-(U6)	0,84	0,02	1,84	0,06
(U7)-17-(U7)	0,46	0,09	0,68	0,37
(U8)-18-(U8)	1,27	0,88	5,88	0,40
(U9)-19-(U9)	0,94	0,01	0,05	0,12
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	-0,69	0,05	9,92	0,05
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	1,00	0,03	9,56	0,33
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,40	0,01	0,75	0,01

Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,57	0,41	5,55	0,00
-2->[FERRITE3]	-0,39	0,16	1,07	0,31
-3->[FERRITE4]	-1,02	0,20	-8,36	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,40	0,12	8,67	0,00
-5->[PERLITE3]	0,98	0,16	1,29	0,19
-6->[PERLITE4]	1,03	0,60	2,84	0,05
-7->[ZONAI]	-0,20	0,91	1,97	0,46
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,84	0,69	2,77	0,06
-9->[ZONAI]	-0,13	0,16	-1,55	0,11
-10->[GRZON]	0,14	0,15	4,54	0,03
(U1)-11-(U1)	0,73	0,09	4,83	0,09
(U2)-12-(U2)	0,99	0,23	4,13	0,04
(U3)-13-(U3)	3,35	0,00	2,54	0,43
(U4)-14-(U4)	1,37	0,00	3,90	0,11
(U5)-15-(U5)	0,13	0,22	4,13	0,50
(U6)-16-(U6)	0,11	0,19	4,18	0,12
(U7)-17-(U7)	0,00	0,00	1,43	0,51
(U8)-18-(U8)	1,36	0,22	4,13	0,22
(U9)-19-(U9)	1,11	0,48	4,83	0,07
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	-1,00	0,14	-6,00	0,01
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	-0,72	0,14	-7,50	0,04
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	1,00	0,75	9,93	0,05

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця Г.5 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу після кореляційного аналізу для сталі 10ХСНД після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	-0,49	0,13	-3,78	0,00
-2->[FERRITE3]	0,82	0,06	1,46	0,00
-3->[FERRITE4]	1,00	0,00	-	-
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,68	0,09	7,57	0,00
-5->[PERLITE3]	0,82	0,06	1,49	0,00
-6->[PERLITE4]	1,00	0,00	2,24	0,00
-7->[ZONAI]	0,23	0,26	8,96	0,37
(GEOMETRY) -8->[ZONAI]	1,17	0,20	5,81	0,00
-9->[ZONAI]	0,54	0,12	4,58	0,00
-10->[GRZON]	0,73	0,08	9,24	0,00
(U1)-11-(U1)	0,76	0,13	6,06	0,00
(U2)-12-(U2)	0,33	0,09	3,61	0,00
(U3)-13-(U3)	0,00	0,00	-	-
(U4)-14-(U4)	0,53	0,12	4,33	0,00
(U5)-15-(U5)	0,33	0,09	3,60	0,00
(U6)-16-(U6)	0,00	0,00	-	-
(U7)-17-(U7)	0,00	0,00	-	-
(U8)-18-(U8)	0,70	0,13	5,43	0,00
(U9)-19-(U9)	0,47	0,12	4,05	0,00
(STRUCTURE1)-20-(STRUCTURE2)	0,09	0,17	5,29	0,60
(STRUCTURE2)-21-(GEOMETRY)	-0,78	0,11	-7,35	0,00
(STRUCTURE1)-22-(GEOMETRY)	-0,01	0,17	-8,42	0,93

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,97	0,01	1,01	0,00
-2->[FERRITE3]	1,00	0,00	-	-
-3->[FERRITE4]	0,65	0,08	7,76	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	1,00	0,00	5,20	0,00
-5->[PERLITE3]	0,73	0,07	1,08	0,00
-6->[PERLITE4]	-0,03	0,15	-1,96	0,84
-7->[ZONAI]	-0,37	0,12	-3,17	0,34
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	-0,57	0,09	-6,16	0,76
-9->[ZONAI]	0,69	0,08	8,91	0,21
-10->[GRZON]	0,76	0,07	1,12	0,00
(U1)-11-(U1)	0,07	0,02	3,54	0,00
(U2)-12-(U2)	0,00	0,00	-	-
(U3)-13-(U3)	0,58	0,11	5,25	0,00
(U4)-14-(U4)	0,00	0,00	-	-
(U5)-15-(U5)	0,46	0,10	4,68	0,00
(U6)-16-(U6)	1,00	0,01	1,19	0,00
(U7)-17-(U7)	0,53	0,11	5,02	0,00
(U8)-18-(U8)	0,52	0,11	4,81	0,00
(U9)-19-(U9)	0,43	0,10	4,22	0,01
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,86	0,04	2,26	0,08
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	0,03	0,18	1,61	0,87
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,51	0,14	-3,66	0,11

Продовження таблиці Г.5

Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,15	0,17	0,91	0,36
-2->[FERRITE3]	1,00	0,00	-	-
-3->[FERRITE4]	-0,36	0,15	-2,42	0,02
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,95	0,02	50,42	0,00
-5->[PERLITE3]	0,96	0,02	55,27	0,00
-6->[PERLITE4]	0,88	0,04	21,23	0,00
-7->[ZONAI]	1,52	0,32	4,76	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,82	0,34	2,39	0,02
-9->[ZONAI]	0,86	0,04	19,85	0,00
-10->[GRZON]	0,47	0,12	4,09	0,00
(U1)-11-(U1)	0,98	0,05	19,69	0,00
(U2)-12-(U2)	0,00	0,00	-	-
(U3)-13-(U3)	0,87	0,10	8,36	0,00
(U4)-14-(U4)	0,09	0,04	2,52	0,01
(U5)-15-(U5)	0,08	0,03	2,40	0,02
(U6)-16-(U6)	0,23	0,07	3,16	0,00
(U7)-17-(U7)	0,51	0,12	4,06	0,00
(U8)-18-(U8)	0,25	0,08	3,35	0,00
(U9)-19-(U9)	0,78	0,11	7,20	0,00
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,50	0,13	3,96	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	-1,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,15	0,18	-0,86	0,39

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

Таблиця Г.6 – Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу після кореляційного аналізу для сталі 10Г2ФБ після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,73	0,06	11,83	0,00
-2->[FERRITE3]	0,81	0,05	16,74	0,00
-3->[FERRITE4]	0,86	0,04	23,54	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,72	0,06	11,57	0,00
-5->[PERLITE3]	0,44	0,08	5,42	0,00
-6->[PERLITE4]	0,90	0,03	32,41	0,00
-7->[ZONAI]	-0,39	0,08	-4,64	0,00
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,32	0,13	2,39	0,02
-9->[ZONAI]	0,99	0,02	47,76	0,00
-10->[GRZON]	0,32	0,15	2,18	0,03
(U1)-11-(U1)	0,46	0,09	5,12	0,00
(U2)-12-(U2)	0,35	0,08	4,45	0,00
(U3)-13-(U3)	0,26	0,06	4,07	0,00
(U4)-14-(U4)	0,48	0,09	5,32	0,00
(U5)-15-(U5)	0,81	0,07	11,25	0,00
(U6)-16-(U6)	0,20	0,05	3,99	0,00
(U7)-17-(U7)	0,75	0,09	8,68	0,00
(U8)-18-(U8)	0,02	0,04	0,52	0,60
(U9)-19-(U9)	0,90	0,10	9,30	0,00
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	1,00	0,00	-	-
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	0,04	0,09	0,48	0,63
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,53	0,00	-	-

Продовження таблиці Г.6

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,67	0,08	8,74	0,00
-2->[FERRITE3]	1,00	0,00	-	-
-3->[FERRITE4]	0,71	0,07	10,28	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	0,83	0,04	19,09	0,00
-5->[PERLITE3]	0,95	0,02	49,73	0,00
-6->[PERLITE4]	1,00	0,01	74,34	0,00
-7->[ZONAI]	-0,05	0,04	-1,40	0,16
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,96	0,01	67,54	0,00
-9->[ZONAI]	-0,02	0,14	-0,12	0,91
-10->[GRZON]	1,00	0,00	9,77	0,00
(U1)-11-(U1)	0,56	0,10	5,46	0,00
(U2)-12-(U2)	0,00	0,00	-	-
(U3)-13-(U3)	0,50	0,10	5,15	0,00
(U4)-14-(U4)	0,31	0,07	4,21	0,00
(U5)-15-(U5)	0,10	0,04	2,86	0,00
(U6)-16-(U6)	0,01	0,03	0,25	0,81
(U7)-17-(U7)	0,07	0,02	3,77	0,00
(U8)-18-(U8)	1,00	0,00	4,27	0,00
(U9)-19-(U9)	0,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	0,65	0,08	8,24	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	-0,19	0,13	-1,41	0,16
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,37	0,12	-3,14	0,00

Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.1)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(STRUCTURE1)-1- >[FERRITE2]	0,98	0,01	1,26	0,00
-2->[FERRITE3]	0,71	0,07	9,61	0,00
-3->[FERRITE4]	0,98	0,01	1,22	0,00
(STRUCTURE2)-4- >[PERLITE2]	-0,32	0,13	-2,48	0,02
-5->[PERLITE3]	1,00	0,00	-	-
-6->[PERLITE4]	0,72	0,07	1,04	0,00
-7->[ZONAI]	0,02	0,18	1,05	0,92
(GEOMETRY) -8- >[ZONAI]	0,65	0,17	3,91	0,00
-9->[ZONAI]	-0,08	0,15	-5,29	0,60
-10->[GRZON]	1,00	0,00	3,68	0,00
(U1)-11-(U1)	0,04	0,02	2,44	0,01
(U2)-12-(U2)	0,50	0,10	4,76	0,00
(U3)-13-(U3)	0,04	0,02	2,52	0,01
(U4)-14-(U4)	0,90	0,08	1,08	0,00
(U5)-15-(U5)	0,00	0,00	-	-
(U6)-16-(U6)	0,48	0,10	4,73	0,00
(U7)-17-(U7)	0,56	0,11	5,15	0,00
(U8)-18-(U8)	0,99	0,02	4,46	0,00
(U9)-19-(U9)	0,00	0,00	-	-
(STRUCTURE1)-20- (STRUCTURE2)	-0,41	0,12	-3,29	0,00
(STRUCTURE2)-21- (GEOMETRY)	0,80	0,05	1,49	0,00
(STRUCTURE1)-22- (GEOMETRY)	-0,86	0,04	-2,12	0,00

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.1.

ДОДАТОК Д

МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

(FACTOR3)-1->[ZONAIИ]	(FACTOR3)-1->[ZONAIИ]
(FACTOR3)-2->[ZONAIИИ]	(FACTOR3)-2->[ZONAIИИ]
(DELTA1)-->[ZONAIИ]	(DELTA1)-->[ZONAIИ]
(DELTA2)-->[ZONAIИИИ]	(DELTA2)-->[ZONAIИИИ]
(DELTA1)-3-(DELTA1)	(DELTA1)-3-(DELTA1)
(DELTA2)-4-(DELTA2)	(DELTA2)-4-(DELTA2)
(FACTOR1)-->[FERRITE2]	(FACTOR1)-->[FERRITE2]
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	(FACTOR1)-5->[FERRITE3]
(FACTOR2)-->[PERLITE2]	(FACTOR2)-->[PERLITE2]
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	(FACTOR2)-6->[PERLITE3]
(EPSILON1)-->[FERRITE2]	(EPSILON1)-->[FERRITE2]
(EPSILON2)-->[FERRITE3]	(EPSILON2)-->[FERRITE3]
(EPSILON3)-->[PERLITE2]	(EPSILON3)-->[PERLITE2]
(EPSILON4)-->[PERLITE3]	(EPSILON4)-->[PERLITE3]
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	(EPSILON1)-7-(EPSILON1)
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	(EPSILON2)-8-(EPSILON2)
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	(EPSILON3)-9-(EPSILON3)
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	(EPSILON4)-10-(EPSILON4)
(ZETA1)-->(FACTOR1)	(ZETA1)-->(FACTOR1)
(ZETA2)-->(FACTOR2)	(ZETA2)-->(FACTOR2)
(ZETA1)-11-(ZETA1)	(ZETA1)-11-(ZETA1)
(ZETA2)-12-(ZETA2)	(ZETA2)-12-(ZETA2)
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	(FACTOR3)-13->(FACTOR1)
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	(FACTOR3)-14->(FACTOR2)
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	(FACTOR1)-15->(FACTOR2)
Модель корелюючих залишків	<u>(EPSILON1) -16- (EPSILON3)</u>

Таблиця Д.1 – Оцінка моделі діаграми шляхів структурними рівняннями для сталі 09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,030	0,082	-0,362	0,718
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,436	0,138	3,162	0,002
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,033	0,021	1,581	0,114
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	45,392	14,352	3,163	0,002
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,980	0,738	2,682	0,007
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	18,730	11,846	1,581	0,114
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,919	1,416	0,649	0,516
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	16,586	11,648	1,424	0,154
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,012	0,000	-	-
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,782	1,383	0,565	0,572
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,010	0,050	-0,196	0,844
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-2,280	0,923	-2,469	0,014
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	11,662	6,256	1,864	0,062
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,256	0,081	3,162	0,002
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,101	0,133	-0,756	0,450
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,000	0,000	-	-
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,084	0,053	1,581	0,114
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-0,934	0,800	-1,167	0,243
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,435	0,557	0,781	0,435

Продовження таблиці Д.1

Електронно-променеє зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	6,605	4,177	1,581	0,114
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	1,806	1,142	1,581	0,114
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	3,565	2,255	1,581	0,114
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,000	0,000	-	-
(ZETA2)-12-(ZETA2)	2,299	1,454	1,581	0,114
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,537	1,248	1,232	0,218
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	5,000	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-3,269	2,688	-1,216	0,224
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,185	0,058	-3,162	0,002
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,035	0,324	0,107	0,915
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,000	0,000	-	-
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,526	0,333	1,581	0,114
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,192	0,162	1,187	0,235
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,400	0,805	0,497	0,619
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	1,066	0,674	1,581	0,114
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	8,640	5,464	1,581	0,114
(ZETA1)-11-(ZETA1)	7,833	4,954	1,581	0,114
(ZETA2)-12-(ZETA2)	1,086	0,687	1,581	0,114
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,577	1,265	-0,456	0,648
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	1,124	0,594	1,893	0,058
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,292	0,167	1,752	0,080

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.4.

Таблиця Д.2 – Оцінка моделі діаграми шляхів структурними рівняннями для сталі після різних 10XCHД режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,095	0,069	1,383	0,167
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,244	0,141	1,733	0,083
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,017	0,011	1,492	0,136
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,061	0,043	1,399	0,162
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-2,525	2,324	-1,086	0,277
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	3,258	2,795	1,166	0,244
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	2,636	1,725	1,528	0,127
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	4,260	3,214	1,326	0,185
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	1,927	1,262	1,527	0,127
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	0,975	2,005	0,486	0,627
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,000	0,000	-	-
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,929	0,819	-1,135	0,256
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,292	1,111	0,262	0,793
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	1,174	0,000	-	-
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,085	0,046	-1,859	0,063
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,374	0,118	3,162	0,002
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,007	0,004	1,581	0,114
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,476	0,099	4,811	0,000
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	-0,112	1,277	-0,087	0,930
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	2,540	1,606	1,581	0,114
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	0,000	0,000	-	-

Продовження таблиці Д.2

Електронно-променеє зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	4,453	2,817	1,581	0,114
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	10,650	6,736	1,581	0,114
(ZETA1)-11-(ZETA1)	9,625	7,285	1,321	0,186
(ZETA2)-12-(ZETA2)	-0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,461	1,494	0,978	0,328
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,060	1,041	0,057	0,954
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,341	0,312	-1,093	0,274
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,075	0,032	-2,322	0,020
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,828	0,262	3,162	0,002
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,002	0,002	1,581	0,114
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	1,043	0,261	3,993	0,000
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,202	0,663	1,814	0,070
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	-0,000	0,000	-	-
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	1,591	1,007	1,581	0,114
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	2,191	1,386	1,581	0,114
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	3,809	2,409	1,581	0,114
(ZETA1)-11-(ZETA1)	3,341	2,113	1,581	0,114
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,151	0,895	1,287	0,198
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,058	0,579	0,100	0,921
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,810	0,336	2,413	0,016

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.4.

Таблиця Д.3 – Оцінка моделі діаграми шляхів структурними рівняннями для сталі після різних 10Г2ФБ режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,116	0,040	2,935	0,003
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,078	0,069	1,128	0,259
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,001	0,001	1,546	0,122
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,021	0,013	1,581	0,114
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,437	0,397	1,103	0,270
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,734	0,385	1,909	0,056
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	3,387	8,560	0,396	0,692
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	5,936	4,075	1,457	0,145
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	11,952	7,559	1,581	0,114
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	0,000	0,000	-	-
(ZETA1)-11-(ZETA1)	4,040	8,751	0,462	0,644
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-2,973	1,575	-1,888	0,059
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-3,167	2,112	-1,499	0,134
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,074	0,287	-0,256	0,798
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,100	0,018	-5,511	0,000
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,085	0,226	0,375	0,708
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,000	0,000	-	-
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,254	0,161	1,581	0,114
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,138	0,906	0,152	0,879
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,105	0,152	7,268	0,000
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	0,100	0,073	1,365	0,172
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	16,236	10,268	1,581	0,114

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,796	0,682	1,167	0,243
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	0,042	0,562	0,075	0,940
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,714	0,502	1,420	0,155
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-1,802	0,493	-3,652	0,000
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	6,661	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	3,524	0,637	5,537	0,000
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.4)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,103	0,043	2,381	0,017
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,011	0,397	-0,028	0,978
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,004	0,003	1,581	0,114
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,787	0,497	1,581	0,114
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	1,284	0,513	2,506	0,012
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,400	1,496	0,936	0,349
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	6,325	4,000	1,581	0,114
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	4,092	2,588	1,581	0,114
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	13,326	8,428	1,581	0,114
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,000	0,000	-	-
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,818	1,435	1,964	0,050
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,453	1,172	-0,386	0,699
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,651	0,000	-	-

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.4.

Таблиця Д.4 – Оцінка моделі діаграми шляхів кореляючих залишків для сталі
09Г2С після різних режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,030	0,082	-0,362	0,718
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,436	0,138	3,162	0,002
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,033	0,021	1,581	0,114
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	26,491	0,000	-	-
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,790	0,680	2,630	0,009
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	18,705	11,835	1,581	0,114
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	11,911	11,131	1,070	0,285
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,649	1,476	0,440	0,660
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	18,165	12,249	1,483	0,138
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,018	0,022	0,788	0,430
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,019	0,083	-0,224	0,823
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-2,487	1,059	-2,348	0,019
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	10,959	8,470	1,294	0,196
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-2,427	2,610	-0,930	0,352
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,189	0,098	1,918	0,055
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,243	0,114	-2,128	0,033
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,031	0,019	1,581	0,114
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,036	0,023	1,581	0,114
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-3,977	1,881	-2,114	0,035
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	4,210	5,561	0,757	0,449
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	9,144	5,783	1,581	0,114

Продовження таблиці Д.4

Електронно-променеове зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	2,051	1,297	1,581	0,114
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	0,000	0,000	-	-
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,000	0,000	-	-
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,057	0,155	0,368	0,713
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	0,498	0,218	2,288	0,022
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,896	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	2,627	0,000	-	-
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-0,126	1,937	-0,065	0,948
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,090	0,037	2,412	0,016
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,176	0,120	1,465	0,143
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,026	0,010	2,523	0,012
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,498	0,295	1,690	0,091
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,024	0,042	0,557	0,578
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,441	0,275	1,604	0,109
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	1,371	0,864	1,586	0,113
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	8,283	4,793	1,728	0,084
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,000	0,000	-	-
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,812	0,000	-	-
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-24,623	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	8,096	0,079	102,834	0,000
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	6,909	0,000	-	-

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.5.

Таблиця Д.5 – Оцінка моделі діаграми шляхів кореляючих залишків для сталі
10ХСНД режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,106	0,068	1,559	0,119
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,299	0,135	2,217	0,027
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,015	0,011	1,404	0,160
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,031	0,039	0,794	0,427
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-15,191	59,093	-0,257	0,797
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,466	0,672	2,182	0,029
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	3,451	2,182	1,581	0,114
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	1,072	0,759	1,412	0,158
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	2,936	1,967	1,493	0,136
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,032	0,253	0,128	0,898
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-0,098	0,393	-0,249	0,803
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,753	0,391	-1,929	0,054
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	4,782	20,474	0,234	0,815
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-1,720	1,185	-1,452	0,147
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,104	0,042	-2,493	0,013
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,304	0,138	2,212	0,027
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,003	0,002	1,373	0,170
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,047	0,031	1,503	0,133
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,476	0,099	4,816	0,000
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	-0,098	0,120	-0,818	0,413
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	2,560	0,268	9,552	0,000

Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	10,476	6,519	1,607	0,108
(ZETA1)-11-(ZETA1)	10,255	7,911	1,296	0,195
(ZETA2)-12-(ZETA2)	7,375	1,915	3,852	0,000
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,234	1,631	0,757	0,449
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-3,606	1,056	-3,415	0,001
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,045	0,425	0,105	0,916
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-4,742	0,000	-	-
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,080	0,029	-2,723	0,006
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,790	0,253	3,126	0,002
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,002	0,001	1,491	0,136
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,071	0,059	1,202	0,229
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,731	0,000	-	-
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	2,397	0,000	-	-
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	5,156	0,106	48,631	0,000
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	4,050	0,019	208,276	0,000
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	2,246	0,024	93,711	0,000
(ZETA1)-11-(ZETA1)	3,682	0,050	73,652	0,000
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	1,052	0,073	14,490	0,000
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	0,227	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,402	0,000	-	-
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	1,813	0,000	-	-

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.5.

Таблиця Д.6 – Оцінка моделі діаграми шляхів кореляючих залишків для сталі
10Г2ФБ режимів зварювання

Лазерне зварювання				
Умовні позначення (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,117	0,040	2,949	0,003
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,072	0,070	1,035	0,301
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,001	0,001	0,908	0,364
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,021	0,014	1,577	0,115
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	0,457	0,448	1,020	0,308
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,725	0,380	1,907	0,056
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	7,901	5,063	1,561	0,119
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	6,655	4,220	1,577	0,115
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	11,816	7,539	1,567	0,117
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	0,053	0,295	0,180	0,857
(ZETA1)-11-(ZETA1)	0,000	0,000	-	-
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	-2,892	1,561	-1,853	0,064
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	-0,410	0,000	-	-
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	0,887	0,805	1,101	0,271
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-4,938	4,886	-1,011	0,312
Електронно-променеве зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	-0,014	0,040	-0,340	0,734
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	0,510	0,161	3,162	0,002
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,008	0,005	1,581	0,114
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	-1,522	0,546	-2,790	0,005

Електронно-променеє зварювання				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	1,015	0,079	12,811	0,000
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	7,220	4,991	1,447	0,148
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	2,751	2,610	1,054	0,292
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	0,928	0,587	1,581	0,114
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	0,000	0,000	-	-
(ZETA1)-11-(ZETA1)	1,481	1,251	1,184	0,237
(ZETA2)-12-(ZETA2)	2,121	1,551	1,367	0,172
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,089	1,072	1,949	0,051
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	3,866	1,891	2,044	0,041
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,482	0,660	-0,731	0,465
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	2,516	1,649	1,526	0,127
Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(FACTOR3)-1->[ZONAII]	0,121	0,038	3,162	0,002
(FACTOR3)-2->[ZONAIII]	-0,384	0,378	-1,017	0,309
(DELTA1)-3-(DELTA1)	0,000	0,000	-	-
(DELTA2)-4-(DELTA2)	0,639	0,404	1,581	0,114
(FACTOR1)-5->[FERRITE3]	1,289	0,516	2,498	0,012
(FACTOR2)-6->[PERLITE3]	0,974	0,771	1,263	0,206
(EPSILON1)-7-(EPSILON1)	6,325	4,000	1,581	0,114
(EPSILON2)-8-(EPSILON2)	0,000	0,000	-	-
(EPSILON3)-9-(EPSILON3)	1,212	0,766	1,581	0,114
(EPSILON4)-10-(EPSILON4)	12,659	8,006	1,581	0,114
(ZETA1)-11-(ZETA1)	2,181	2,226	0,980	0,327

Продовження таблиці Д.6

Автоматичне зварювання під шаром флюсу				
Аналіз шляхів (рисунок 5.5)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
(ZETA2)-12-(ZETA2)	0,000	0,000	-	-
(FACTOR3)-13->(FACTOR1)	2,389	1,386	1,723	0,085
(FACTOR3)-14->(FACTOR2)	3,062	1,333	2,297	0,022
(FACTOR1)-15->(FACTOR2)	-0,418	0,355	-1,177	0,239
(EPSILON1) -16- (EPSILON3)	-0,225	1,242	-0,181	0,856

*Примітка : аналіз шляхів згідно рисунку 5.5.

ДОДАТОК Е

МОДЕЛЬ МОНТЕ-КАРЛО

(STRUCTURE2)-1{.6}->[PERLITE2]	(EPS2)-11{.64}-(EPS2)
(STRUCTURE2)-2{.6}->[PERLITE3]	(EPS3)-12{.64}-(EPS3)
(STRUCTURE2)-3{.6}->[PERLITE4]	(EPS4)-13{.64}-(EPS4)
(STRUCTURE1)-4{.6}->[FERRITE2]	(EPS5)-14{.64}-(EPS5)
(STRUCTURE1)-5{.6}->[FERRITE3]	(EPS6)-15{.64}-(EPS6)
(STRUCTURE1)-6{.6}->[FERRITE4]	(EPS7)-16{.64}-(EPS7)
(GEOMETRY)-7{.6}->[ZONAI]	(EPS8)-17{.64}-(EPS8)
(GEOMETRY)-8{.6}->[ZONAI]	(EPS9)-18{.64}-(EPS9)
(GEOMETRY)-9{.6}->[GRZON]	(STRUCTURE1)-19{0.}-
(EPS1)-->[PERLITE2]	(GEOMETRY)
(EPS2)-->[PERLITE3]	(STRUCTURE2)-20{0.}-
(EPS3)-->[PERLITE4]	(GEOMETRY)
(EPS4)-->[FERRITE2]	(STRUCTURE2)-21{0.}-
(EPS5)-->[FERRITE3]	(STRUCTURE1)
(EPS6)-->[FERRITE4]	(GEOMETRY)-{1.}-(GEOMETRY)
(EPS7)-->[ZONAI]	(STRUCTURE1)-{1.}-
(EPS8)-->[ZONAI]	(STRUCTURE1)
(EPS9)-->[GRZON]	(STRUCTURE2)-{1.}-
(EPS1)-10{.64}-(EPS1)	(STRUCTURE2)

ДОДАТОК Є.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
РЕКТОР ДЕРЖАВНОГО ВИЩОГО
НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА
АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА
АРХІТЕКТУРИ»
доктор технічних наук, професор

Микола САВИЦЬКИЙ
« 20 » р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
НАЧАЛЬНИК ФІЛІЇ ТОВ «МЕТІНВЕСТ
ІНЖИНІРИНГ» у. м. Дніпро
КОРОЛЬ В.М.
« 20 » р.



АКТ

впровадження в практику наукових розробок по дисертаційної роботі
Слупської Юлії Сергіївни на тему: «Особливості моделювання процесів формування структури в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей»

Основні наукові результати, отримані під час виконання дисертаційної роботи які впроваджено в практику ТОВ «МЕТІНВЕСТ ІНЖИНІРИНГ»:

1. Методика визначення взаємозв'язку між кількісним аналізом параметрів структурного стану в окремих зонах зварного з'єднання (враховуючі границі між зонами) та технологічними параметрами зварювання.
2. Методика використання математичного апарату коваріаційного, кореляційного, регресійного та факторного аналізу для кількісного аналізу впливу технологічних параметрів зварювання на металографічну якість зварних з'єднань.
3. Методика застосування математичного апарату імітаційного моделювання на стадії розробки та проектування зварних з'єднань будівельних конструкцій, у тому числі відповідального призначення.

Зазначені результати використано при розробці конструктивних схем для споруд металургійного комплексу з застосуванням низьковуглецевих мікролегованих сталей з підвищеним рівнем механічних властивостей, а саме при обліку нелінійного впливу процесів теплообміну на параметри розрахунків при інтенсивних теплових навантаженнях, їх взаємодію та взаємовплив.

Використання такого металопрокату в будівельній галузі дозволить значно розширити область застосування прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва, насамперед при виробництві металопрокату для зварних будівельних металевих конструкцій.

Цим актом підтверджується впровадження в практику ТОВ «МЕТІНВЕСТ ІНЖИНІРИНГ» науково-практичних розробок по даній роботі.

Експерт по будівництву ТОВ МП

Дійсний член Академії будівництва України

 Гезенцевей Ю.І.

ДОДАТОК Ж.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Список публікацій здобувача

1. **Slupska Y.**, Laukhin D., Poznyakov V., Kostin V., Beketov O., Rott N., Dadiverina L., Liubymova-Zinchenko O. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. *Materials science. East-ern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, № 12 (111). P. 25-31.
2. **Slupska Y.**, Laukhin D., Beketov O., Babenko E., Rott N., Dytiuk V. 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. P. 88-98.
3. **Слупська Ю.С.**, Лаухін Д.В., Бекетов О.В., Тютєрєв І.А., Ротт Н.О., Чашин Д.Ю., Торопченєв Г.О., Пико М.О. Металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після автоматичного зварювання під шаром флюсу. *Modern engineering and innovative technofogies*. April 2021. №16, Part 1. С. 105-113.
4. **Слупська Ю.С.**, Узлов О.В., Дрожевська Г.В., Пучиков О.В., Шпак О.А. Підвищення ресурсу експлуатації дисків пилок горячого різання металу шляхом термічної обробки. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 1 (88). С. 70-80.
5. **Слупська Ю.С.**, Іванцов С.В., Тютєрєв І.А., Сінчук Р.Р. Прогноз механічних властивостей виробів із металу. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 1 (92). С. 30-40.
6. **Слупська Ю.С.**, Дадіверіна Л.М., Чашин Д.Ю., Торопченєв Г.О., Пико М.О. Вплив границь зерен на розвиток деформації в низьковуглецевих

низьколегованих сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 2 (93). С. 55-63.

7. Слупська Ю.С., Лаухін Д. В., Бекетов О. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О. Застосування методів факторного аналізу у дослідженні структурного стану зварного з'єднання після лазерного зварювання. *Український журнал будівництва та архітектури. Науково-практичний журнал*. 2021. № 3 (003). С. 91-100.

Роботи апробаційного характеру:

8. Слупська Ю.С., Бекетов О.В., Лаухін Д.В., Ротт Н.О. Дослідження структурного стану зварних з'єднань низьковуглицевих мікролегованих сталей. Досягнення і перспективи науки, освіти та виробництва : матеріали І Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції (м. Київ, 23 грудня 2020 року). Київ, 2020. С. 245-246.
9. Слупська Ю.С., Бекетов О.В., Лаухін Д.В., Дадіверіна Л.М., Бабенко Є.О. Загальні характеристики руйнування низьковуглицевих мікролегованих сталей: тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції з нагоди 90-річчя ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». «Інноваційні технології в будівництві, цивільній інженерії та архітектурі» (26 листопада 2020 року). Дніпро: ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2020. С. 48-50.