

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 з 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 10ХСНД (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 $\sim 0.78\% \text{ C}$.

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), 10ХСНД (10KhHSND), 10Г2ФБ (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., 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., 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.