

Спеціалізованій вченій раді ДФ 08.051.019

при Державному вищому навчальному

закладі «Придніпровська державна

академія будівництва та архітектури»

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, провідного наукового співробітника відділу Фізико-хімічних досліджень матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України **Берднікової Олени Миколаївни** на дисертаційну роботу **Слупської Юлії Сергіївни** на тему: **«Особливості моделювання процесів формування структури в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей»**, яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії у спеціалізованій вченій раді ДФ 08.051.019 з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»

Актуальність теми дисертаційної роботи.

У різних галузях сучасної промисловості, в тому числі будівельній, сільськогосподарській, транспортній, машинобудівній для виготовлення зварних металоконструкцій широко використовують низьковуглецеві низьколеговані сталі. У будівельній промисловості широко використовуються конструкційні низьковуглецеві сталі з феритно-перлітною та бейнітно-феритною структурою. Конструкції, що виготовлені з таких сталей є конструкціями тривалого використання. Виготовлення вищезазначених металоконструкцій здійснюється переважно зі застосуванням дугового механізованого або автоматичного зварювання в середовищі захисних газів. Крім того, у теперішній час впроваджуються технології із застосуванням висококонцентрованих енергетичних джерел, такі як лазерне та електронно-променеве зварювання.

Але вплив багатьох технологічних факторів та умов експлуатації призводять до появи концентраторів внутрішніх напружень та дефектів у металі зварних з'єднань, що не завжди вдається враховувати на виробництві. В цьому контексті актуальним залишається питання контролю якості зварних

з'єднань різноманітними методами контролю. Також особливе значення набувають дослідження процесів формування структури та її впливу на механічні властивості та тріщиностійкість отриманих зварних з'єднань.

Дисертаційна робота Слупської Ю.С. присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі отримання якісних зварних з'єднань низьковуглецевих низьколегованих сталей із застосуванням фізико-математичного аналізу процесів формування структурного стану у різних зонах зварних з'єднань (металі швів, зоні термічного впливу, тощо), отриманих автоматичним зварюванням під шаром флюсу, лазерним та електронно-променевим зварюванням.

У дисертаційній роботі для вирішення даної задачі запропоновано використання імітаційного фізико-математичного моделювання процесів зварювання зі застосуванням статистичної обробки експериментальних даних дослідження структурного стану після різних режимів зварювання, що є конструктивним рішенням моделювання процесу в залежності від матеріалу.

Про актуальність теми дисертаційної роботи свідчить її зв'язок з науковими темами фундаментальних досліджень та науково-дослідних робіт у рамках тем, що виконувались на кафедрі матеріалознавства і обробки матеріалів при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», де здобувач був виконавцем і відповідальним виконавцем.

Таким чином, загальна спрямованість дисертаційної роботи на дослідження особливостей моделювання процесів формування структури у металі зварних з'єднань низьковуглецевих низьколегованих сталей зумовлює її несумлінну наукову та практичну актуальність.

Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації доведено результатами досліджень та аналізом структурно-фазового складу металу низьковуглецевих низьколегованих сталей марок 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання - лазерного, електронно-променевого, автоматичного зварювання під шаром флюсу.

У дисертаційній роботі проведено кількісний аналіз структурних складових, що формуються у зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних режимів зварювання та визначено

геометричні розміри різних ділянок з'єднань (швів, зони термічного впливу, тощо) та критерій оцінки структурного стану. Зі застосуванням кореляційного аналізу, математичного апарату факторного аналізу, імітаційного моделювання методом підтверджуючого факторного аналізу та методом структурних рівнянь, методу статичних вибірок оцінено та проаналізовано взаємозв'язок між критеріями оцінки структурного стану металу зварних з'єднань та технологічними параметрами процесу зварювання.

Достовірність результатів і висновків забезпечуються використанням сучасних методів експериментальних та теоретичних досліджень: методів фізичного металознавства, що включає світлову та скануючу електронну мікроскопію; методів кількісної металографії для визначення параметрів структури; методів статистичної обробки результатів.

У роботі представлено сучасні методи дослідження структурного стану зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей з використанням програмного комплексу STATSOFT STATISTICA 10.0. З використанням факторного аналізу, по отриманим кількісним оцінкам були згруповані фактори з метою отримання більш впливових факторів, та здійснено дослідження для обраних факторів декількома методами.

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів та висновків підтверджується публікаціями у фахових українських та іноземних виданнях, які включені до наукометричних баз даних (Scopus) та їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі металознавства і обробки матеріалів при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за темами фундаментальних досліджень та науково-дослідних робіт у рамках тем, де здобувач був виконавцем і відповідальним виконавцем: «Дослідження взаємозв'язку між механізмами формування структури та комплексом властивостей будівельних матеріалів» (державна реєстрація №0116U004538); «Металознавчі основи підвищення експлуатаційних властивостей конструкційних матеріалів» (державна реєстрація №0121U109926).

Наукова новизна роботи полягає в експериментально-теоретичному узагальненні та розширенні уявлень про особливості морфологічної будови структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після різних

режимів зварювання – лазерного, електронно-променевого та автоматичного під шаром флюсу. Розроблена концепція базується на кількісному аналізі параметру структурного стану у різних зонах зварних з'єднань та на границях між зонами.

Вперше зі застосуванням для кількісного аналізу математичного апарату коваріаційного, кореляційного, регресійного та факторного аналізу встановлено взаємозв'язок між критеріями оцінки структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей та технологічними параметрами режимів зварювання.

Вперше при використанні математичного апарату підтверджуючого факторного аналізу, а саме: групуванням факторів та їх кількісною оцінкою та отриманням загальних і більш впливових факторів виявлено та проаналізовано залежність між технологічними параметрами зварювання та структурним станом низьковуглецевих низьколегованих сталей.

Вперше отримано та проаналізовано математичні моделі зв'язку між критеріями оцінки структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей та технологічними параметрами зварювання. Дана концепція отримана за допомогою застосування математичного імітаційного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів.

На підставі аналізу процесів формування структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей та геометричних розмірів ділянок зварних з'єднань розроблено та запропоновано критерій оцінки якості зварного з'єднання після різних режимів зварювання.

Для вирішення прикладних задач матеріалознавства, а саме: аналізу впливу технологічних параметрів зварювання на структурний стан з'єднання, і як наслідок, його якості запропоновано алгоритм використання математичного апарату факторного аналізу

Для кількісного аналізу процесів формування структури, які відбуваються під час зварювання за різними режимами низьковуглецевих низьколегованих сталей. В роботі запропоновано методика застосування математичного апарату імітаційного моделювання (розроблено відповідні програми на мові *PATNI* в середовищі *STATSOFT STATISTICA 10.0*).

За результатами, що отримано у дисертаційній роботі впроваджено навчальний процес кафедри Матеріалознавства та обробки матеріалів та кафедри Фундаментальних і природничих дисциплін.

Повнота викладу основних результатів дисертаційної роботи у публікаціях.

Основні наукові положення та основні результати дисертаційної роботи що повністю розкривають зміст, опубліковано в 9 статтях у журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових видань, затверджених МОН України за спеціальністю дисертації, 1 з яких включена до міжнародних наукометричних баз SCOPUS, Web of Science та 2 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та редакційний аналіз.

Дисертаційна робота Слупської Ю.С. має загальний обсяг із 263 сторінки, у тому числі 132 сторінки основного тексту, що містить 56 рисунків та 45 таблиць, включає анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел із 169 найменувань на 21 сторінці та 8 додатків.

Текст дисертації написаний з використанням загальноприйнятої термінології українською мовою. Анотація та текст дисертації оформлено згідно вимог діючого «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167.

Здобувач дотримується вимог академічної доброчесності, у дисертаційній роботі є посилання на відповідні джерела інформації у випадку їх використання, а саме, ідей, результатів, текстів інших авторів та не містить елементів плагіату і запозичень. Автор дотримується норм законодавства про авторське право, надає повну та достовірну інформацію про результати наукової діяльності, а також використані методики досліджень.

Дисертаційна робота задовольняє вимогам п.п. 1, 2, 3, 6, 7 паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство» та містить наукові положення і нові науково-обґрунтовані результати досліджень, які раніше не були захищені.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи. Сформульовано мету, предмет та об'єкт дослідження, а також задачі дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок дисертаційної роботи з науково-дослідною тематикою, подана інформація про апробацію роботи. Вказано особистий внесок здобувача у виконану роботу.

У **першому розділі** автор обґрунтував проблему одержання зварних металевих конструкцій для будівництва, проаналізував літературні дані щодо: фізико-математичних моделей проектування та експлуатації зварних конструкцій; технології виробництва матеріалів для будівельних металевих конструкцій, їх структури та властивостей; технологічних схем виробництва та з'єднання; технологічних схем зварювання, які застосовуються при виробництві будівельних металоконструкцій. Значну увагу приділено технологічному процесу зварювання, від якого залежить надійність конструкцій та їх з'єднання, які повинні відповідати всім експлуатаційним вимогам, а також проаналізовані різноманітні методи моделювання процесів зварювання. За результатами проведеного аналізу автор обґрунтував мету та визначив задачі роботи.

Другий розділ присвячено загальній методології проведення досліджень. Приведено хімічний склад та механічні властивості зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ. Наведено методи та методики, які були використані під час проведення експериментальних досліджень, а також методики побудови математичних моделей, а саме: факторний аналіз, регресійний аналіз, кореляційний аналіз, моделі структурних рівнянь; підтверджуючий факторний аналіз, та аналіз за допомогою методу Монте-Карло. Також зазначено, що у процесі дослідження було використано лазерне зварювання, електронно-променеве, зварювання під шаром флюсу та наведено режими зварювання.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням, які спрямовані на металографічні дослідження зварних з'єднань, отриманих автоматичним зварюванням під шаром флюсу, лазерним та електронно-променевим зварюванням. З точки зору морфологічних особливостей будови зварних з'єднань, було детально вивчено мікроструктуру у наступних зонах: основний метал, метал швів; лінія сплавлення, ділянка крупного зерна (перегріву); неповної перекристалізації; рекристалізації. З метою узагальнення отриманих даних мікроструктурних досліджень побудовано загальні картини для зварних з'єднань для кожного із режимів зварювання для всіх досліджуваних марок сталей. Подальше було проведено кількісний аналіз отриманих даних, а саме експериментальне вимірювання: геометричних розмірів зон зварного з'єднання; відсоткового співвідношення структурних складових по зонам зварного з'єднання; розмірів зерен фериту.

Дослідженнями показано, що лінійний розмір границь розділу між зонами зварного з'єднання змінюється в залежності як від вибору марки сталі, так і від обраного режиму зварювання. Найменші розміри границі шов - зона термічного впливу та границі зона термічного впливу - основний метал при всіх типах зварювання має сталь 10Г2ФБ. Встановлено, що при збільшенні відсоткового вмісту перлітної складової спостерігається зменшення пластичності та ударної в'язкості металу.

У **четвертому розділі** представлені результати розрахунків величини енерговкладання, виконано аналіз структурного стану із використанням програми STATSOFT STATISTICA 10.0, де було виконано факторний, регресійний, коваріаційний та кореляційний аналіз, в наслідок чого було досліджено взаємозв'язок між параметрами процесу зварювання та структурним станом матеріалу для зразків зі сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після різних режимів зварювання. Для аналізу структурного стану зразків зварних з'єднань запропоновано алгоритм застосування факторного аналізу, при застосуванні математичного апарату здійснено групування факторів та групування змінних у фактори та отримано відповідні якісні залежності. Показано, що найбільш значущими змінними при аналізі структурного стану зварних з'єднань після різних режимів зварювання є відсоткова частка феритної та перлітної структурних складових та геометричні розміри зон зварного з'єднання.

У **п'ятому розділі** представлені результати дослідження імітаційного моделювання методом підтверджуючого факторного аналізу, та методом Монте-Карло, проведено коваріаційний та кореляційний аналіз, в результаті чого були отримані відповідні критерії оцінки. При використанні підтверджуючого факторного аналізу побудовано діаграму шляхів, де відображено дослідження трьох факторів, а також написано модель діаграми шляхів на математичній мові *RATH1*. 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. Методом моделювання структурними рівняннями побудовано діаграми шляхів, Для кожної діаграми шляхів побудована модель у вигляді комп'ютерного язика *RATH1*, та побудовані графіки нормалізованих залишок. Фізико-математичним аналізом взаємозв'язку між параметрами зварювання та критерієм оцінки структурного

стану показано, що на якість зварного з'єднання при зварюванні впливає енергія тепловкладання, яка забезпечує формування різних за геометричними розмірами та структурним станом зон зварного з'єднання.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. У першому пункті наукової новизни зазначено: «...Розроблена концепція базується на кількісному аналізі **параметру структурного стану** в окремих зонах зварного з'єднання, а також на границях між зонами», але не вказано, аналіз яких конкретно параметрів та у яких окремих зонах зварного з'єднання.

2. У другому пункті наукової новизни вказано: «Встановлено взаємозв'язок між **критеріями оцінки структурного стану** низьковуглецевих низьколегованих сталей та **технологічними параметрами режимів зварювання**...», але це формулювання має досить загальний зміст. Не ясно, що мається на увазі під критеріями оцінки структурного стану та які саме технологічні параметри режимів зварювання розглянуто у даній роботі.

3. Що стосується **ключових слів** до дисертаційної роботи, ключові слова не повністю відображають зміст дисертаційної роботи. На мою думку, необхідно було їх доповнити такими термінами: низьколеговані сталі, зварні з'єднання, структура або мікроструктура.

4. У першому розділі наведено інформацію про загальні концепції проектування зварних металевих конструкцій для будівництва, у тому числі аналіз технологічних схем зварювання, які застосовуються при виробництві будівельних металоконструкцій, але нема пояснення, чому автор розглядає саме лазерне, електронно-променеве та електродугове зварювання.

5. У другому розділі (методики проведення зварювальних робіт) доцільно було параметр швидкості зварювання при лазерному, електронно-променевому та електродуговому режимах навести у однакових одиницях вимірювання та згідно правилам оформлення дисертацій. У першу чергу це необхідно для зрозуміння при різних технологіях зварювання великої різниці по швидкості зварювання, яка має вплив на швидкості нагріву та охолодження, й, відповідно на формування структури у зварних з'єднаннях.

6. У третьому розділі зображення мікроструктури на рис. 3.3, б, г, е не відповідають мікроструктурі ділянки 2 зварного з'єднання, що отримано

при лазерному зварюванні. Подальше немає пояснення в якій саме зоні вимірювались геометричні розміри ділянок зварних з'єднань, мається на увазі на якій відстані від верху, або кореню шва.

7. З тексту дисертації не зрозуміло, чому для проведення статистичної обробки масивів експериментальних даних було обрано коваріаційний, кореляційний та факторний аналіз.

8. З тексту дисертаційної роботи (розділ 4) не дуже зрозуміло чому для подальшого математичного моделювання було використано і рівняння регресії для власних значень і рівняння регресії для загального відсотка дисперсії отриманих факторів.

9. В дисертаційній роботі доцільно було б проаналізувати, при яких саме режимах зварювання та для яких сталей загальні показники критеріїв оцінки були отримані кращі.

10. В оформленні дисертації мають місце деякі неточності, стилістичні та орфографічні помилки.

Наведені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, її наукової та практичної цінності.

Загальний висновок та оцінка роботи.

Дисертаційна робота Слупської Юлії Сергіївни на тему «Особливості моделювання процесів формування структури в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій із застосуванням фізико-математичного аналізу процесів формування структурного стану металу зварних з'єднань низьковуглецевих низьколегованих сталей вирішується проблема отримання якісних зварних з'єднань, отриманих автоматичним зварюванням під шаром флюсу, лазерним та електронно-променевим зварюванням.

Дисертаційна робота достатньо проілюстрована рисунками та таблицями, що повною мірою відображають отримані наукові та практичні результати. Усі сформульовані у дисертації висновки надійні та обґрунтовані, відповідають завданням дослідження роботи та змісту дисертації.

За актуальністю розглянутих задач, обсягом досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів, дисертаційна робота **Слупської Юлії Сергіївни на тему «Особливості моделювання процесів формування**

структури в зварних з'єднаннях низьковуглецевих низьколегованих сталей» повністю відповідає галузі знань 13 – «Механічна інженерія» та спеціальності 132 – «Матеріалознавство» та всім вимогам вимогам Наказу Міністрів освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій», «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою №608 Кабінету Міністрів України від 9 червня 2021 р., а її автор - **Слупська Юлія Сергіївна** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Офіційний опонент
провідний науковий співробітник
відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



Олена БЕРДНІКОВА

Підпис д.т.н. О.М. Берднікової засвідчую:
Вчений секретар ІЕЗ ім. Є. О. Патона

10.01.2022 р.



Ілля КЛОЧКОВ