УДК000.000.00.00.00 https://doi.org/10.34185/tpm.1.2023.04

В.Ф. Балакін, Т.М. Кадильникова, С.В. Савкін, Балаханова Т.Ю.

Вплив вібрації на мікроструктуру шва зварних труб

V.F. Balakin, T.M. Kadylnikova, S.V. Savkin, Balakhanova T.Yu.

The influence of vibration on the microstructure of the seam of welded pipes

Анотація.У статті розглядаються результати експериментального дослідження мікроструктури металу зварного шва трубних заготовок, схильних до вібраційної обробки в процесі зварювання. Експериментальне дослідження було поділено на такі етапи: зварювання прямошовних заздалегідь сформованих трубних заготовок із застосуванням вібраційної дії; виготовлення шліфів та вивчення їх мікроструктури в зонах зварного шва; обробка отриманих у процесі експерименту даних. Особливу увагу при вивченні мікроструктури було приділено ділянкам перегріву та нормалізації, як найбільш характеризує якість зварного шва ділянкам зони термічного впливу.

Досліджено тенденцію зміни величини зерна металу зварного шва при різних частотах застосовуваної в процесі зварювання вібрації, а також за її відсутності. Важливе місце у дослідженні було відведено дослідженню ступеня різнозернистості структури, що вивчається.

Ключові слова: Вібраційна обробка, зварний шов, зона термічного впливу, мікроструктура, різнозернистість, трубна заготовка.

Abstract. The article examines the results of an experimental study of the microstructure of the weld metal of pipe blanks subject to vibration processing during the welding process. The experimental study was divided into the following stages: welding of straight-seam preformed pipe blanks using vibration action; production of grindings and study of their microstructure in weld zones; processing of the data obtained during the experiment. Special attention was paid to the areas of overheating and normalization during the study of the microstructure, as the quality of the weld most characterizes the areas of the thermally affected zone.

The trend of changes in the weld metal grain size at different frequencies of the vibration applied in the welding process, as well as in its absence, was studied. An important place in the study was given to the study of the degree of heterogeneity of the studied structure.

Key words: Vibration processing, weld seam, heat-affected zone, microstructure, granularity, pipe billet.

Актуальність.Аналіз стану трубного ринку за останні десятиліття показав, що з боку світових споживачів зварних труб постійно зростають вимоги щодо якості та надійності продукції. Особлива увага в цьому питанні приділяється отриманню зварних труб з поліпшеними показниками міцності, що досягається за допомогою поліпшення якості структури зварного шва.

Постановка проблеми.Крупнозерниста структура металу області зварного шва разом із неоднорідністю структури негативно впливають на фізико-механічні властивості трубного вироби загалом. Проведення відпалу після зварювання електрозварних труб в технологічному процесі, що діє, потрібно не тільки для зняття залишкових напруг, але і для подрібнення структури і підвищення її рівномірності.

Однак будь-які термічні складові технологічного процесу пов'язані з великими матеріальними витратами для підприємства, тривалістю процесу нагрівання за часом, а в деяких випадках і неекологічно виконання деяких операцій.

Аналіз публікацій на тему досліджень.Відомі наукові праці [1, 2], в яких наводяться достовірні відомості про позитивний вплив вібрації на подрібнення кристалічної структури злитків зі сталі та сплавів, скорочення або повне усунення зони транскристалізації за рахунок зростання рівноосних кристалів, зниження зональної та дендритної неоднорідності, підвищення механічних та спеціальних властивостей металів та сплавів.

Також, згідно з відомими дослідженнями [3], вібраційна обробка зварних зразків із низьковуглецевої сталі на режимах, що забезпечують протікання пружно-пластичних деформацій, дозволяє зменшити напруги першого роду, виміряні тензотермічним методом, на 50 – 60%, а при термічній обробці зменшення відбувається на 70 % и більше. Напруги другого роду в зоні сплаву, визначені рентгенівським методом, після вібраційної обробки знижуються на 45%, а після термічної обробки – на 65%.

Однак в описаних вище роботах вібраційна обробка використовувалася стосовно кристалізованого металу зварного шва, в якому вже завершено формування повних залишкових напруг, у той час як у роботах [4-11] доведено позитивний вплив вібрації на розплавлений метал у процесі кристалізації.

Дані дослідження створюють реальні передумови для експериментального дослідження впливу вібраційної обробки в процесі зварювання заготовки трубної на мікроструктуру металу зварного шва.

Метою цього дослідженняє виявлення закономірностей зміни величини і рівномірності зерен металу зварного шва в ділянках зони термічного впливу (ЗТВ) при різних частотах вібрації, що застосовується в процесі зварювання, а також при її відсутності.

Виклад основного матеріалу.Дослідження зерненої структури зварних зразків проводилося Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України у відділі фізико-технічних проблем процесів прокатки сортового та спеціального прокату.

Для дослідження мікроструктури були представлені 5 зразків зварних труб, представлені в таблиці 1. Хімічний склад і технологія виготовлен-

ня вихідного гарячекатаного штрипсу однакові, відмінності були лише в умовах зварювання, а саме в частоті вібрації, що застосовується до зразків.

Табл. 1. Зразки дослідження мікроструктури.

Номер зразка	1	2	3	4	5
Частота вібрації, Гц	0	25	50	125	200

Вихідна заготівля отримана на підприємстві ПрАТ «ДМЗ КОМІНМЕТ», формування проводилося в трубоелектрозварювальному цеху №2 за допомогою трубопрофілеелектрозварювального агрегату ТПЕСА 20-114. Як вихідну заготовку для проведення експерименту було обрано сформовану трубну заготовку без нанесення зварного шва, вироблену згідно з ТУ 14-236-15-93 «Труби сталеві електрозварні для побутових потреб». Основні характеристики заготівлі для експерименту представлені у таблиці 2.

Таблиця 2. Характеристики вихідної заготівлі

Параметр	Значення
Зовнішній діаметр, мм	89
Товщина стінки, мм	4
Марка сталі	3ПС
Номер плавки	1010610

Слід зазначити, що якість зварних швів, виконаних у лабораторних умовах, у загальній масі не відповідало міжнародним стандартам зварних з'єднань, проте цей факт не вплинув на результати дослідження. Однак зіставляти отримані дані з досвідченими режимами зварювання не буде коректно.

Для оцінки впливу режимів зварювання на якість та зміни мікроструктури виготовлено поперечні шліфи. Вивчення мікроструктури шліфів проводилося після травлення у 4% спиртовому розчині азотної кислоти (ніталі).

Для зварного з'єднання проводилася класифікація за зонами: зона наплавленого металу, зона термічного впливу та зона основного металу. Зона наплавленого металу являє собою стовпчасті кристаліти, що утворилися з наплавленого металу (розплав основного металу і дроту або електрода присади), при цьому напрям зростання кристалів завжди збігається з напрямком тепловідведення. Далі слідує зона термічного впливу, що складається з ділянок неповного розплавлення, перегріву та нормалізації.

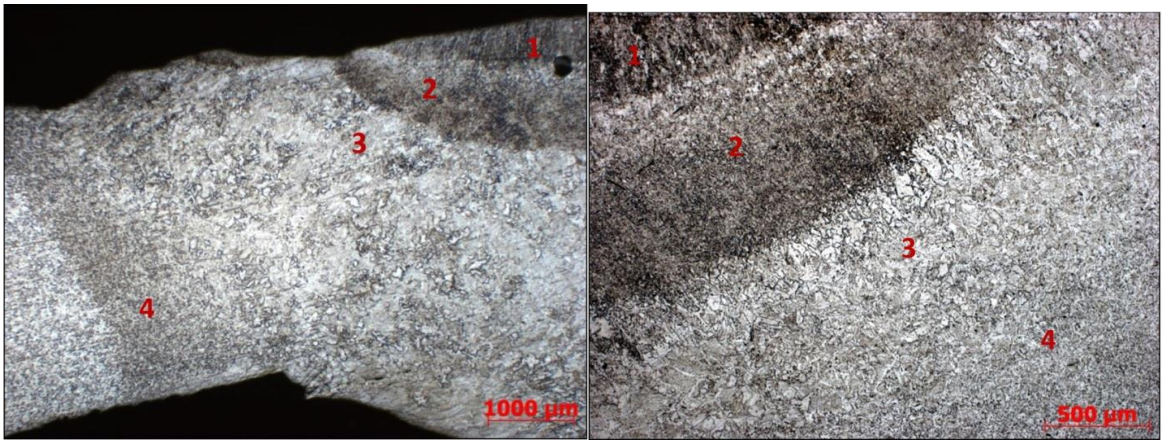
Вивчення впливу режимів зварювання на мікроструктуру проводилося шляхом оцінки з морфології та кількісних характеристик структурних складових найбільш чутливих та характерних зон – наплавлений метал, перегрів та нормалізації.

Розміри кристаллітів наплавленого металу у всіх зразках мають схожий розмір зерна, тому надалі в роботі докладно не розглядатимуться. Основний метал має класичну ферито-перлітну структуру гарячекатаного металу (рис. 1). Середній розмір зерна фериту становить 17 мкм.

Мал. 1 – Структура гарячекатаної заготовки для виготовлення зварних труб, сталь марки 3ПС

Результати досліджень.Далі будуть проаналізовані кожен із представлених для аналізу

зразків. Зразок №1 було отримано без застосування вібраційної обробки. Зони зварного з'єднання даного зразка наочно представлені малюнку 2.

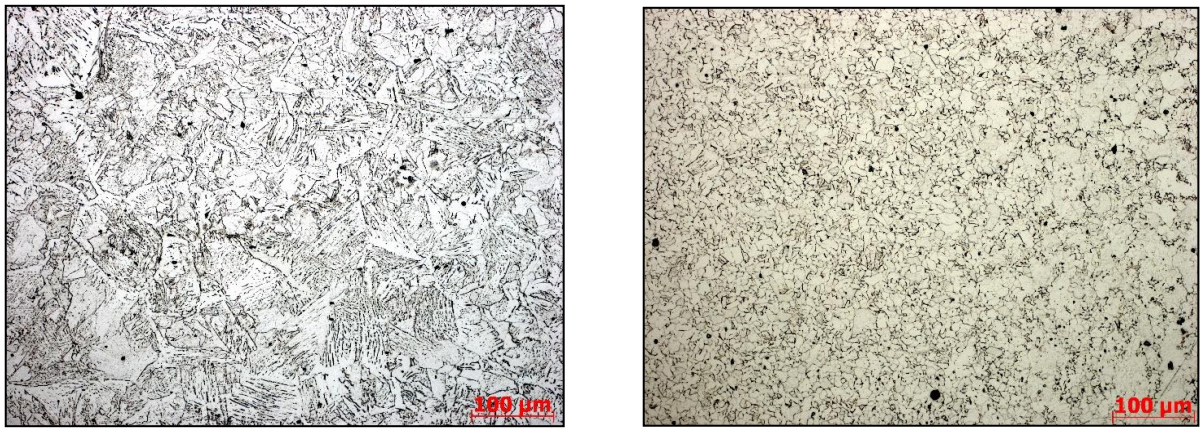


Мал. 2 – Будова зварного шва, зразок №1: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка із наддрібним зерном, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації

Структура з'єднання має характерний вид зварного шва, проте привертає увагу наявність у ділянці, відповідному зоні неповного розплавлення, вкрай дрібнозернистої структури (розмір зерна фериту не перевищує 8 мкм, при цьому середній розмір зерна становить 3,2 мкм), замикає її обрамлення з великих зерен фериту, витягнутих у бік відведення тепла. Наявність феритного обрамлення в структурі зварного шва, як правило, характерна для середньо-і маловуглецевих сталей при правильно виконаних зварювальних роботах. Слід зазначити, що подібна особливість зварного шва виявлена тільки в першому зразку, в інших зразках ділянка наддрібного зерна під шаром металу розплавленого відсутня.

Після феритного обрамлення слід ділянку перегріву, що має вигляд голчастої структури, що переходить у ділянку нормалізації. Середній розмір пакетів відманштет становить 93 мкм. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 2-3.

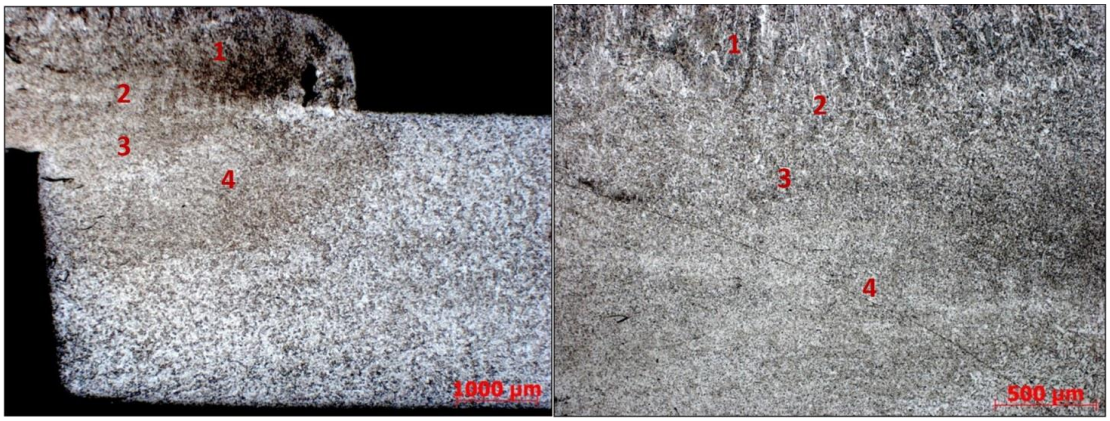
Середній розмір нормалізованих зерен становить 8 мкм. Згідно з загальновідомими літературними даними, ділянка нормалізації характеризується найменшим зерном фериту при зварюванні маловуглецевих сталей, проте тут структура помітно більша за розглянуту вище дрібнозернисту структуру. Ступінь разнозернистости ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,44. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 3.



а б

Мал. 3 – Структура зварного шва, зразок №1: а – ділянка перегріву, б – ділянка нормалізації

Зразок №2був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 25 Гц. Структурні зони, характерні для будови даного зварного шва наведені малюнку 4. Структура зон зварного шва характеризується найменшою протяжністю зони термічного впливу порівняно з іншими зразками, представленими для аналізу.

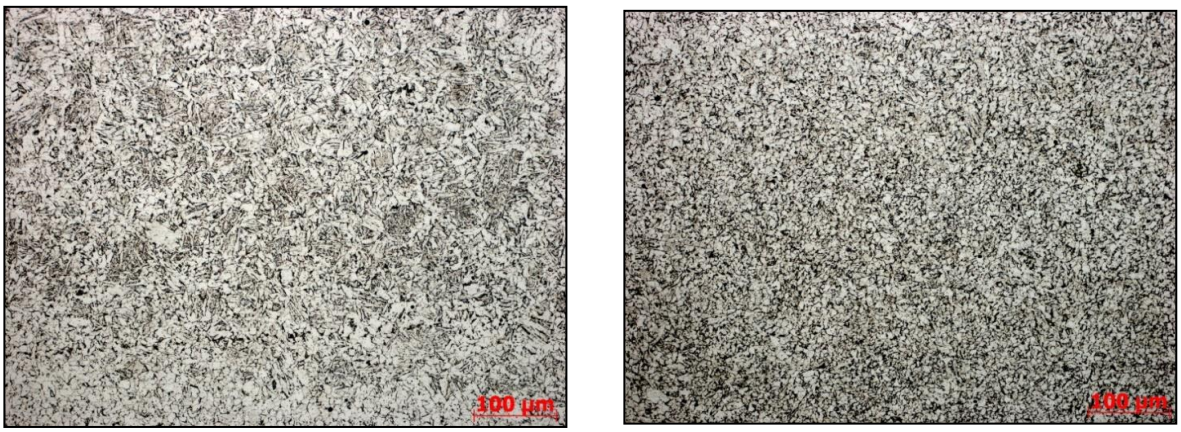


Мал. 4 – Будова зварного шва, зразок №2: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

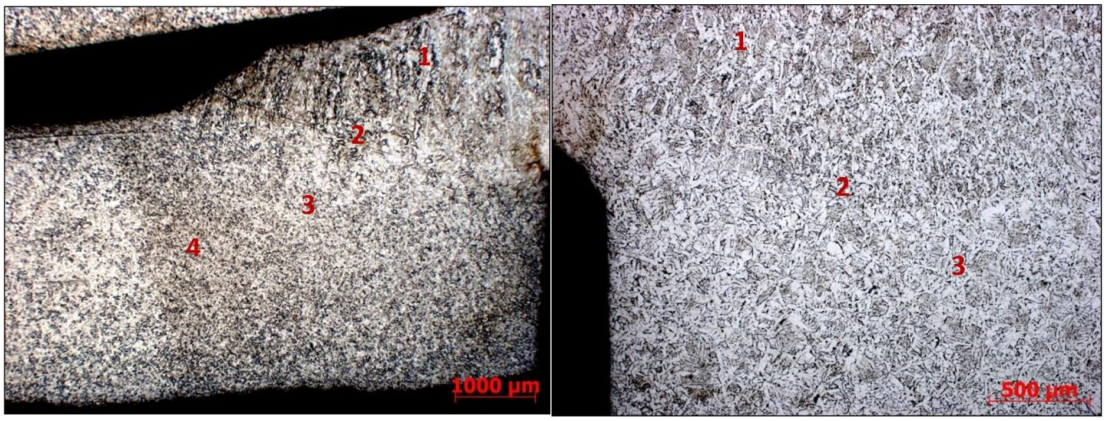
Кристаліти мають розмір, що відповідає розміру всього наплавленого металу. На ділянці перегріву спостерігається структура відманштету, розмір зерен становить 40 мкм, максимальний розмір не перевищує 57 мкм. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 1-2.

У нормалізованій ділянці відбулося подрібнення гарячекатаної зеренної структури (середній розмір зерна становить 6 мкм). Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,41. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 5.

Зразок №3був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 50 Гц. Характерна мікроструктура у загальному вигляді представлена малюнку 6. Структура зварного шва близька за характеристиками до з'єднання Зразка №2, проте відрізняється дещо більшою протяжністю зони термічного впливу.



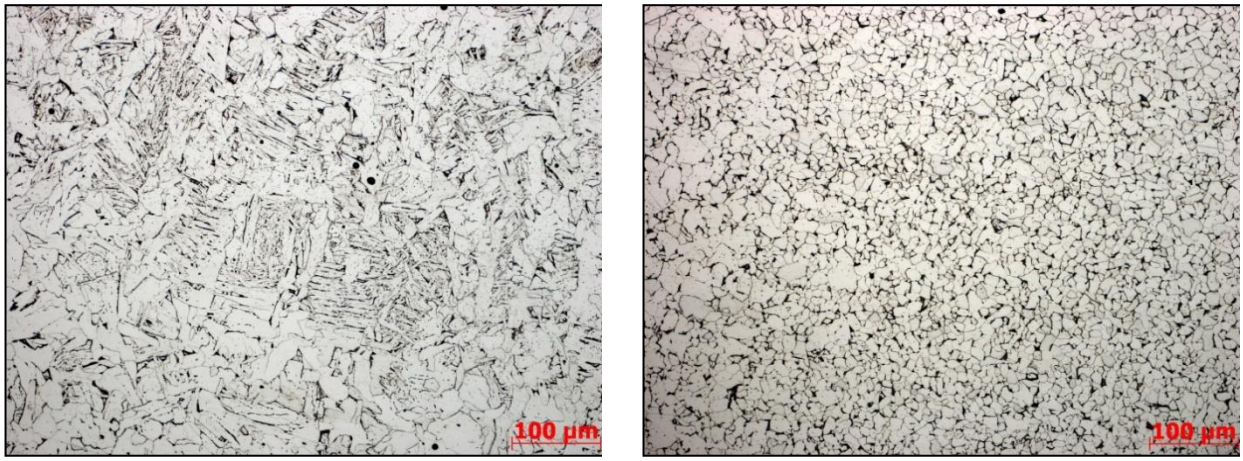
Мал. 5 – Структура зварного шва, зразок №2: а – ділянка перегріву, б – ділянка нормалізації



Мал. 6 – Будова зварного шва, зразок №3: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

Зерна видманштетта більша порівняно із зернами зразка №2. Середній розмір зерна на ділянці становить 68,5 мкм. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 2.

У ділянці нормалізації середній розмір зерна фериту становить 11 мкм. Незважаючи на те, що середній розмір зерен трохи збільшився, структура набула більшої рівномірності. Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,37. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 7.



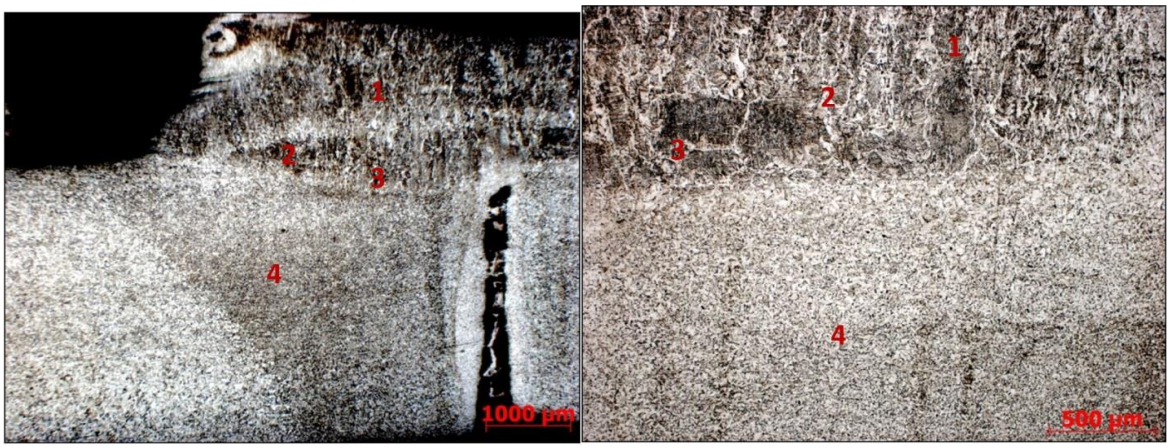
а б

Мал. 7 – Структура зварного шва, зразок №3: а – ділянка перегріву, б – ділянка нормалізації

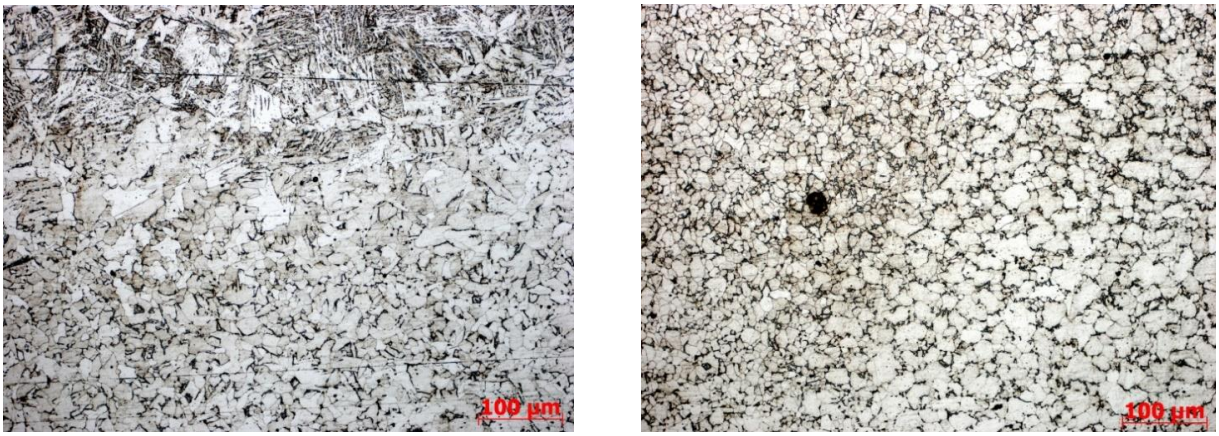
Зразок №4був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 125 Гц. Цікавим у плані дослідження виявився зразок 4. Зварний шов характеризується малою протяжністю. Ділянка неповного розплавлення практично зливається із ділянкою перегріву. Є великі зерна з видманштеттовою будовою. Зерна оточені чітким феритним обрамленням. Розмір їх вкрай нерівномірний і сягає 395 мкм (середній розмір 125 мкм). При цьому голки видманштетта мають дрібнішу будову в порівнянні з іншими зразками. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 4.

Безпосередньо під аномально великими зернами розташовується дрібнозерниста структура. Зона нормалізації має невелику протяжність, середній розмір зерна фериту становить 10 мкм. Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,43. Характерні фото загального виду зварного шва представлені малюнку 8. Фото мікроструктури ділянок перегріву і нормалізації представлені малюнку 9.

Зразок №5був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 200 Гц. Зварний шов суцільний, стовпчасті кристали заповнюють весь переріз зони наплавленого металу. Будова зварного шва представлена малюнку 10.

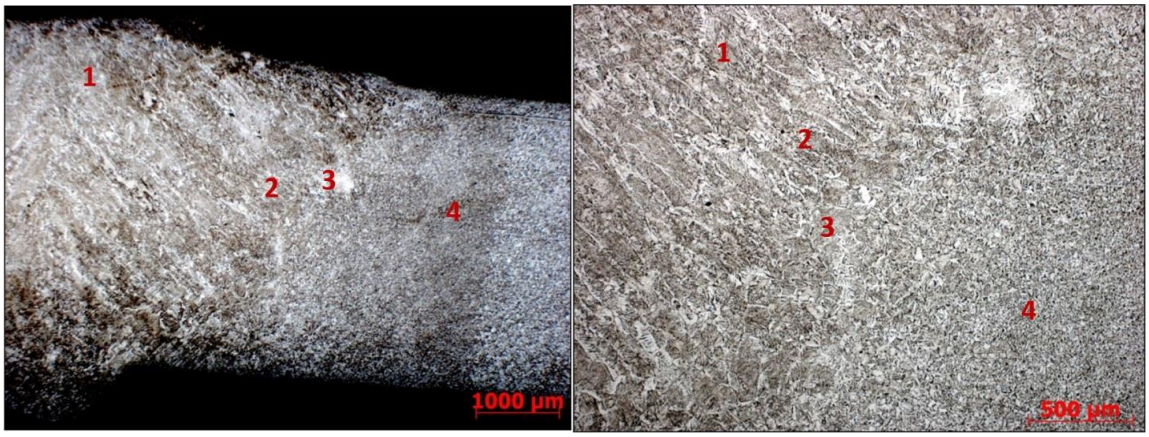


Мал. 8 – Будова зварного шва, зразок №4: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації



а б

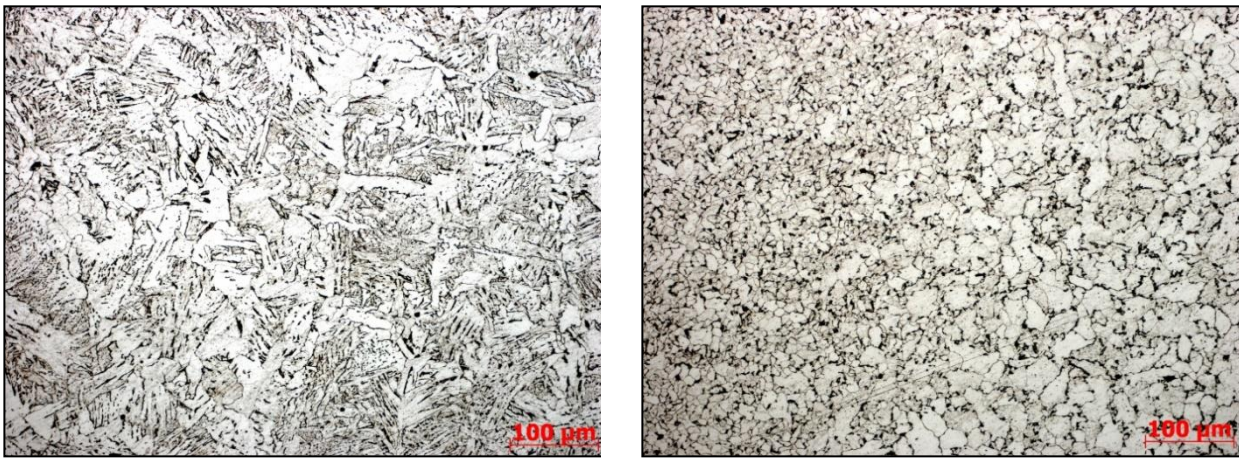
Мал. 9 – Структура зварного шва, зразок №4: а – перехід від ділянки перегріву до зони нормалізації, б – перехід нормалізованої структури в основний метал



Мал. 10 – Будова зварного шва, зразок №5: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації

Розмір великих пакетів відманштет становить 120-240 мкм. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 4.

У ділянці нормалізації розмір зерен фериту становить 105 мкм. Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,49. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 11.

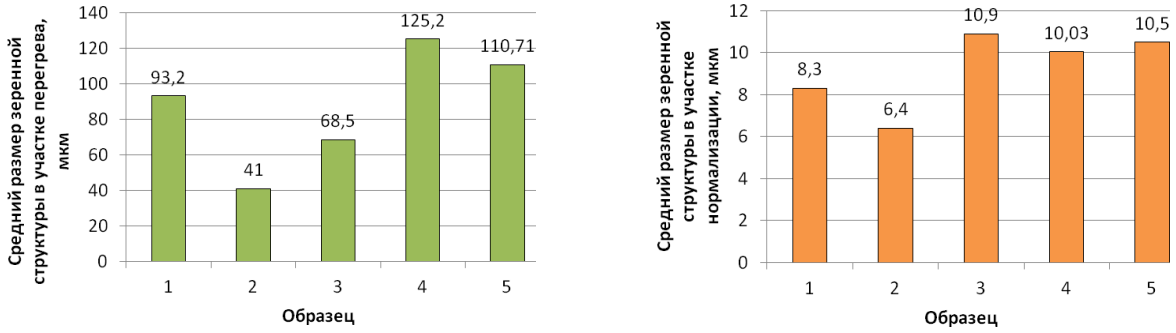


а б

Мал. 11 – Структура зварного шва, зразок №5: а – ділянки неповного розплавлення та перегріву, б – перехід нормалізованої структури в основний метал

Більш наочно кількісні відмінності структурних складових експериментальних зразків показано малюнку 12.

Як видно на діаграмах, зразок №3 характеризується найменшим розміром зерен металу як у ділянці перегріву, так і в ділянці нормалізації. Цей факт кореспондується з дослідженнями в галузі застосування вібрації при кристалізації злитків зі сталі та сплавів, наведених вище.



а б

Мал. 12 – Середній розмір зерен характерних ділянок зони термічного впливу в аналізованих зразках: а – ділянка перегріву (структура відманштету), б – ділянка нормалізації (ферито-перлітна структура)

У табл. 3 наведено дані про рівень розвитку видманштеттової структури (згідно з ГОСТ 5640 Сталь. Металографічний метод оцінки мікроструктури листів і стрічки) ділянки перегріву зварних сполук досліджуваних зразків і ступінь різнозернистості ділянки нормалізації.

Ступінь різнозернистості оцінювали за допомогою коефіцієнта варіації (запропонований Салтиковим С. А.), який розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення до середнього діаметра зерен. Чим вищий коефіцієнт, тим вища неоднорідність і нерівноосність зерен.

Таблиця 3. Дані про різнозеристість структури.

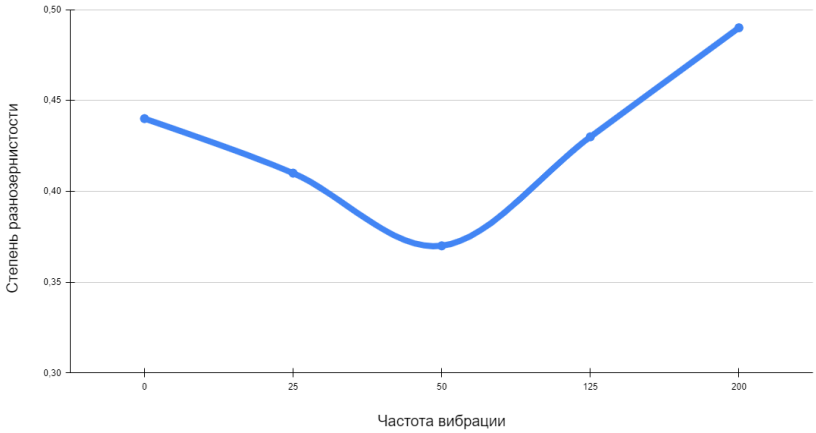
Зразок № п/п	Частота, Гц	Бал видманштеттової структури в ділянці перегріву ЗТВ зварного шва	Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації ЗТВ зварного шва
1	0	2-3	0,44
2	25	1-2	0,41
3	50	2	0,37
4	125	4	0,43
5	200	3	0,49

Основною чутливою до руйнування зоною зварного шва є зона термічного впливу, а саме ділянка перегріву, внаслідок виникнення в ньому голчастих структур.

Проведення відпалу після зварювання електрозварних труб в технологічному процесі, що діє, потрібно не тільки для зняття залишкових напруг, але і для подрібнення структури і підвищення її рівномірності.

Чим грубіше структура (у разі, що вищий бал розвитку видманштеттовой структури), тим складніше вона усувається за наступної термічної обробці. Рекристалізаційний відпал часто повністю не усуває грубу структуру видманштетта. І у разі усунення спрямованості (гольчастості), у місцях перегріву після відпалу може спостерігатися істотна різнозернистість, яка негативно позначається на властивостях міцності і експлуатаційних зварного виробу. На малюнку 13 наведено графік залежності рівня різнозернистості структури в ділянці нормалізації від застосованої в процесі зварювання частоти вібрації.

Аналізуючи малюнок 13, очевидно, що найбільш однорідна і рівнозерниста структура як у ділянці перегріву, так і в ділянці нормалізації виявлена в зразку №3, звареному з впливом вібрації частотою 50 Гц. Згідно з даними з паралельних досліджень залишкових напруг, зразок №3 так само характеризується найбільшим відсотком зниження залишкових напруг щодо зразка, звареного без застосування вібрації – 71,41%.



Мал. 13. Графік залежності рівня різнозернистості структури від застосованої у процесі зварювання частоти вібрації.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування в процесі зварювання вібрації 50 Гц позитивно впливає як на рівень залишкових напруг, так і на рівномірність структури металу. При цьому необхідно відзначити, що при частоті вібрації 25 Гц (Зразок №3), незважаючи на більш інтенсивне подрібнення зерен, зафіксовано велику різнозернистість та високий рівень залишкової напруги.

Висновки.

Проведені аналітичні дослідження впливу вібрації на мікроструктуру зварного шва показали необхідність проведення експериментальних досліджень, спрямованих на зміну мікроструктури зварного шва безпосередньо в процесі зварювання.

В результаті проведеного експериментального дослідження процесу зварювання на попередньо сформованих трубних заготовках із застосуванням вібраційного впливу встановлено закономірність зміни величини зерен та різнозернистості у ділянках перегріву та нормалізації щодо частоти вібрації.

Дослідження мікроструктури зварних швів показало, що найменша величина зерна зафіксована у зразку, звареному із застосуванням вібрації частотою 25 Гц. Розмір зерна в даному зразку становив 41 мкм у ділянці перегріву та 6,4 мкм у ділянці нормалізації.

Найбільш однорідна та рівнозерниста мікроструктура виявлена у зразку, звареному із застосуванням вібрації частотою 50 Гц. Бал видманштеттової структури в ділянці перегріву ЗТВ зварного шва становив 2 бали. Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації – 0,37.

Бібліогріфічний опис

1. Мороз Л.С. Механіка та фізика деформацій та руйнування матеріалів.- Л.: Машинобудування, 1984.- 223 с.
2. Горенко В.Г., Русаков П.В.Статичні та динамічні способи зниження рівня залишкових напруг та стабілізації розміру оливок// у кн. .- С.23-39.
3. Скаковський В. Д. Розробка технології вібраційної обробки зварних конструкцій рамного типу// Автореферат дисерт. на соїск. вчений. ступеня. - К.: Видавництво ІЕС ім. Е. О. Патона, 1987. - 16 с.
4. Вплив вібрації на кристалізацію органічного зливка / В. Х. Межидов, Х. І. Асхабов, А. С. Ельдарханов, та ін. // Вплив зовнішніх впливів на рідкий метал, що кристалізується. - Київ: ІПЛ АН УРСР, 1983. - С. 35-40.
5. Кристалізація та структуроутворення сталевих зливків в умовах вібраційного впливу / О. Д. Таранов, А.С. Нурадинов, С.Є. Кондратюк та ін. // Процеси лиття. - 1998. - № 3-4. - С. 84-90.
6. Балакін Ю. А., Гладков М. І. Енергоємність зовнішнього впливу на метал, що твердне, з позицій термодинаміки // Изв. вишів. Чер. металургія. - 2001. - № 6. - С. 44-46.
7. Гладков М. І., Балакін Ю. А., Гончаревич І. Ф. Термодинамічний аналіз умов зародження та зростання кристалів при віброобробці металу // Ізв. вишів. Чер. металургія. − 1989. − № 9. – С. 27-29.
8. Ефімов В. А., Ельдарханов А. С. Технології сучасної металургії. - М.: Нові технології. - 2004. - 784 с.
9. Поліпшення якості стали ШХ15 шляхом віброобробки злитків // Сталь. - 1987. - № 4. - С. 48-49.
10. Ельдарханов А.С. Застосування фізичних методів моделювання вивчення впливу вібрації на процеси затвердіння сплавів // Дис. д-ра техн. наук. - Київ,1996. - 321 с.
11. Балакін Ю. А., Гладков М. І. Розрахунок параметрів вібраційної обробки металів, що кристалізуються // Изв. вишів. Чер. металургія. − 2003. − № 9. – С. 56-60.