

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПІСЛЯЗВАРЮВАЛЬНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРЯМОШОВНИХ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ КЛАСУ МІЦНОСТІ К60 (Х70)

Забезпечення надійності газотранспортної системи та енергетичної інфраструктури України є питанням національної безпеки, особливо в умовах триваючої військової агресії.

Важливо отримувати зварні з'єднання труб великого діаметру про прокладанні та ремонті з гарантованою якістю й довгостроковими властивостями.

Метою дослідження є визначення впливу термічних циклів зварювання на структурно-фазові перетворення та механічні властивості трубної сталі групи міцності К60 (Х70).

Через складну будову та малі розміри зон термічного впливу (ЗТВ) оцінювання змін у металевій структурі здійснювали на основі імітації зварювального нагріву, що дозволяє дослідити вплив тепловкладення без проведення реального процесу зварювання.

Зразки нагрівали зі швидкістю 260 °С/с до 1350 °С та охолоджували в діапазоні швидкостей 0,2–200 °С/с. На основі дилатометричних кривих побудовано термодинамічну діаграму розпаду переохолодженого аустеніту, яка показала, що основним перетворенням у досліджуваній сталі є бейнітне, тоді як феритне перетворення спостерігається лише за низьких швидкостей охолодження. За швидкості до 5 °С/с формується полігональний ферит уздовж границь зерен, що свідчить про потенційно низьку ударну в'язкість. У діапазоні до 10 °С/с утворюється верхній бейніт гранулярної морфології, тоді як за 10–30 °С/с — нижній бейніт голчастий морфології. За швидкостей понад 30 °С/с формується рейковий бейніт із дисперсними прошарками МА. Зі збільшенням швидкості охолодження зменшується величина вихідного зерна аустеніту.

Встановлено, що мікроструктура ЗТВ суттєво визначає в'язкопластичні властивості сталі: гранулярний бейніт характеризується низькою розорієнтованістю та гіршою ударною в'язкістю, тоді як голчастий і рейковий бейніт забезпечують покращення механічних характеристик.

Для отримання оптимальних властивостей у промислових умовах рекомендовано забезпечувати швидкість охолодження 10–20 °С/с шляхом інтенсифікації охолодження та зменшення погонної енергії зварювання.

Ключові слова: *Високоміцна трубна сталь; сталь класу К60 (Х70); зона термічного впливу (ЗТВ); імітація термічного циклу зварювання; термодинамічна діаграма; структурно-фазові перетворення; бейнітна структура; швидкість охолодження; ударна в'язкість.*

Постановка проблеми. *Забезпечення надійності газотранспортної системи та енергетичної інфраструктури України є питанням національної безпеки, особливо в умовах триваючої військової агресії. Історично склалося, що до 2017 року флагманом виробництва труб великого діаметру (ТВД) в Україні був ПАТ «Харцизький трубний завод» (м. Харцизьк, Донецька обл.), потужності якого дозволяли випускати понад 1 млн. т. продукції на рік. Внаслідок окупації частини Донбасу контроль над цим стратегічним підприємством було втрачено, що створило значний дефіцит на ринку вітчизняної трубної продукції.*

У відповідь на цей виклик в Україні розпочався процес створення нових виробничих потужностей. Низка вітчизняних підприємств освоїла технологію виробництва прямошовних зварних труб діаметром 406–1422 мм, використовуючи метод автоматичного електродугового зварювання під флюсом (SAWL) із застосуванням експандування для калібрування геометрії

Машинобудування і зварювальне виробництво

та зміцнення металу. Основними споживачами такої продукції виступають стратегічні підприємства: ТОВ «Оператор ГТС України», АТ «Укртрансгаз» та НАК «Нафтогаз України» [1]. Окрім нафтогазової галузі, ТВД критично необхідні для будівництва магістральних водогонів та як конструкційні елементи (палі) ліній електропередач.

Актуальність досліджень у цьому напрямі набула критичного значення після подій осені 2025 року. За офіційними повідомленнями НАК «Нафтогаз України», масовані атаки ворога на об'єкти газовидобутку стали наймасштабнішими за весь період війни. Руйнування зазнали не лише наземні об'єкти підготовки газу та компресорні станції, але й обв'язка газових свердловин. Відновлення цих об'єктів вимагає колосальних обсягів високоякісних зварних труб, здатних витримувати високий тиск та складні умови експлуатації. Це накладається на нагальну потребу в ремонтах магістральних газопроводів та інфраструктури ТЕС/ТЕЦ (котлоагрегати, паропроводи), які також зазнають систематичних ушкоджень.

У таких умовах новостворені українські виробництва стикаються з подвійним викликом: необхідністю швидкого нарощування обсягів випуску та жорсткими вимогами до якості зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей класу міцності K60. Саме ці сталі є основним матеріалом для відповідальних трубопроводів високого тиску.

Критичним етапом технологічного процесу є зварювання. Зона термічного впливу (ЗТВ) у сталях даного класу є «слабкою ланкою», де внаслідок термічних циклів зварювання можуть відбуватися небажані структурні перетворення, що призводить до зниження в'язкості та ризику крихкого руйнування. З огляду на це, наукове обґрунтування режимів зварювання, зокрема дослідження впливу швидкості охолодження на формування структури та експлуатаційних властивостей з'єднань труб вітчизняного виробництва, є актуальним науково-технічним завданням, що має пряме прикладне значення для енергетичної безпеки держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На структурні перетворення у ЗТВ зварних з'єднань серед інших факторів впливає і режим нагріву та охолодження під час дугового зварювання. ЗТВ має декілька структурних ділянок, які відрізняються за формою і будовою зерен, та характеристики кожної ділянки різняться в залежності від температури. При зварюванні низьковуглецевих низьколегованих сталей в ЗНВ можливе утворення гартівних структур і тріщин [2-4].

Значний внесок у дослідження впливу термічних циклів зварювання на структуру та властивості високоміцних низьколегованих трубних сталей класів міцності K60–K65 (X70) зробили вчені Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України. Зокрема, у роботах Познякова В.Д. та ін. [5-6] встановлено, що критичним фактором для забезпечення холодостійкості зварних з'єднань є обмеження погонної енергії зварювання. Фундаментальні аспекти фазових перетворень та кінетики розпаду аустеніту в трубних сталях детально розглянуті в працях Костіна В.А. та Григоренка Г.М. [7], де показано схильність цих матеріалів до утворення гартівних структур.

Дослідниками Mohsen Mohammadijoo та ін. встановлено, що для сталей класу міцності X70 застосування технології тандемного зварювання під флюсом з додаванням холодного дроту дозволяє знизити тепловкладення та пікову температуру, що сприяє подрібненню зерна аустеніту та зменшенню частки крихких М-А (мартенсит-аустеніт) складових у крупнозернистій ділянці ЗТВ [8].

Проте, незважаючи на значний обсяг даних, питання впливу широкого діапазону швидкостей охолодження на формування конкретних морфологічних типів бейніту в сталях K60 залишається недостатньо вивченим, що і зумовлює мету цієї роботи.

Мета дослідження. Метою даної роботи є вивчення впливу термічних циклів зварювання на експлуатаційні властивості трубної сталі групи міцності K60 (X70).

ЗТВ складається з п'яти ділянок, що мають різний структурно-фазовий склад, складну конфігурацію та відносно малі розміри, унаслідок чого її дослідження ускладнене. У зв'язку з цим вивчення впливу термічного циклу зварювання на структурно-фазовий склад і механічні властивості сталі здійснювали на основі імітації зварювального нагріву. Цей метод дозволяє оцінити вплив зварювання плавленням на основний метал у ЗТВ, при якому тепловий вплив на метал відбувається без виконання самого процесу зварювання.

Вплив термічного циклу на сталь оцінюють за взаємозв'язком швидкості охолодження (тепловкладення під час зварювання) зі структурою, що утворюється, та властивостями зварного з'єднання.

Циліндричні зразки діаметром 6 мм і довжиною 70 мм, вирізані з листів досліджуваних сталей, нагрівали прямим пропусканням електричного струму зі швидкістю 260 °C/с, характерною для зварювального нагріву, до температури 1350 °C, витримували протягом 1 секунди та охолоджували за заданими режимами; швидкість охолодження змінювали в межах від 0,2 до 200 °C/с. Охолодження зразків здійснювали шляхом тепловідведення через захвати за рахунок регульованого зниження сили струму, що проходив через зразок.

Основний матеріал дослідження. Вивчення кінетики фазових перетворень, що відбуваються в досліджуваній сталі в умовах зварювального нагріву й охолодження, здійснювали на основі побудови та аналізу термокінетичної діаграми розпаду переохолодженого аустеніту. Побудову термокінетичної діаграми виконували на основі дилатометричних кривих, за якими визначали точки початку утворення аустеніту A_{c1} ; завершення утворення аустеніту A_{c3} ; початку феритного перетворення F_s ; початку бейнітного перетворення B_s ; завершення бейнітного перетворення B_f . За отриманими координатами точок будували термокінетичну діаграму (рис. 1).

Для сталі у досліджуваному інтервалі швидкостей охолодження основним перетворенням на термокінетичній діаграмі розпаду переохолодженого аустеніту є бейнітне; також спостерігається коротка область феритного перетворення. Утворення вільного фериту пригнічується за швидкості охолодження 5 °C/с і більше.

Чітко виражених перегинів, що відповідали б перебігу мартенситного перетворення, на дилатограмі не спостерігається навіть за швидкостей охолодження понад 100 °C/с. Аналіз мікроструктури методом оптичної мікроскопії не дозволяє однозначно відрізнити реєчний бейніт від реєчного мартенситу. Єдиною видимою зміною морфології мікроструктурних складових зі збільшенням швидкості охолодження вище 20...30 °C/с є зменшення товщини рейок α -фази. Можна припустити, що аж до найвищих швидкостей охолодження основною мікроструктурною складовою залишається реєчний бейніт, оскільки межі рейок протравлюються, що свідчить про наявність значної кількості збагачених вуглецем другорядних фаз, розташованих уздовж меж рейок. Більш чітке розмежування цих структурних складових не є принциповим для даної роботи.

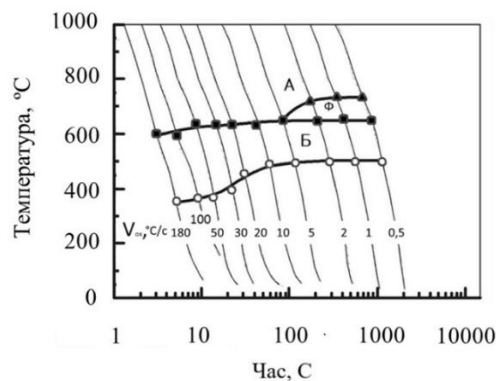


Рисунок 1 – Термокінетична діаграма досліджуваної сталі

У ході металографічних досліджень було встановлено, що за швидкостей охолодження $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ і нижче спостерігається утворення полігонального фериту по межах аустенітних зерен, який формує так звану феритну окаймівку (рис. 2). Феритна окаймівка вздовж меж аустенітних зерен є непрямою ознакою низької ударної в'язкості металу; внутрішньозерна мікроструктура представлена верхнім бейнітом гранулярної морфології (рис. 2).

Гранулярний бейніт у досліджуваній сталі утворюється за низьких швидкостей охолодження — до $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, за яких встигають перебігати дифузійні процеси. Спочатку відбувається виділення бейнітної α -фази, а внаслідок дифузії формуються ділянки, перенасичені вуглецем, де утворюються острівці МА. Таким чином відбувається формування гранулярного бейніту, у якому великорозмірні включення МА розташовуються між округлими субзернами бейнітної α -фази (рис. 3).

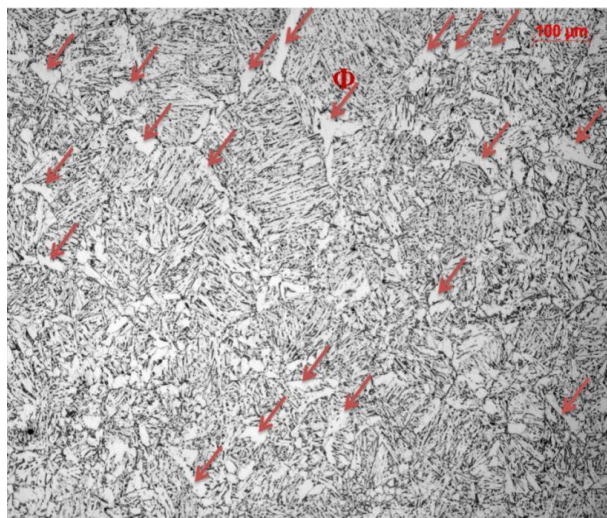


Рисунок 2 – Виділення полігонального фериту (Ф)

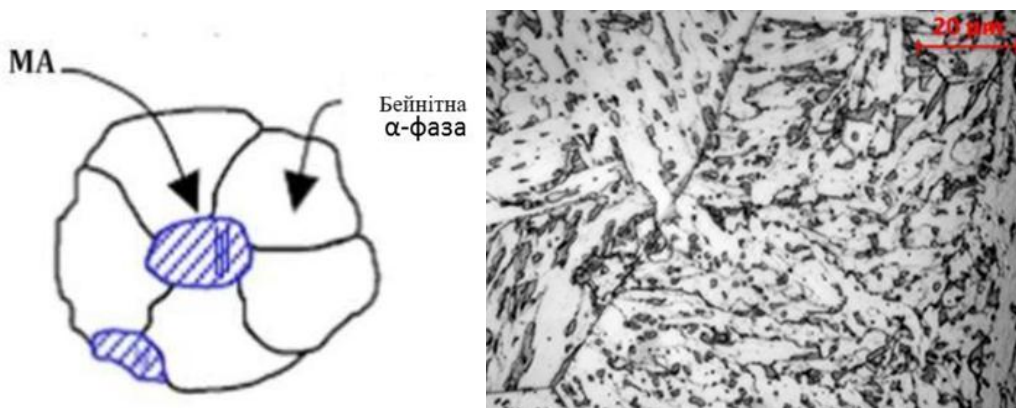


Рисунок 3 – Гранулярний бейніт:

а) схематичне зображення; б) фотографія мікроструктури (x1000)

З підвищенням швидкості охолодження в діапазоні $10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ дифузійні процеси встигають протікати меншою мірою. Острівці МА формуються у вигляді тонких прошарків між голками бейнітної α -фази. Верхній бейніт гранулярної морфології замінюється нижнім бейнітом голчастої морфології (рис. 4).

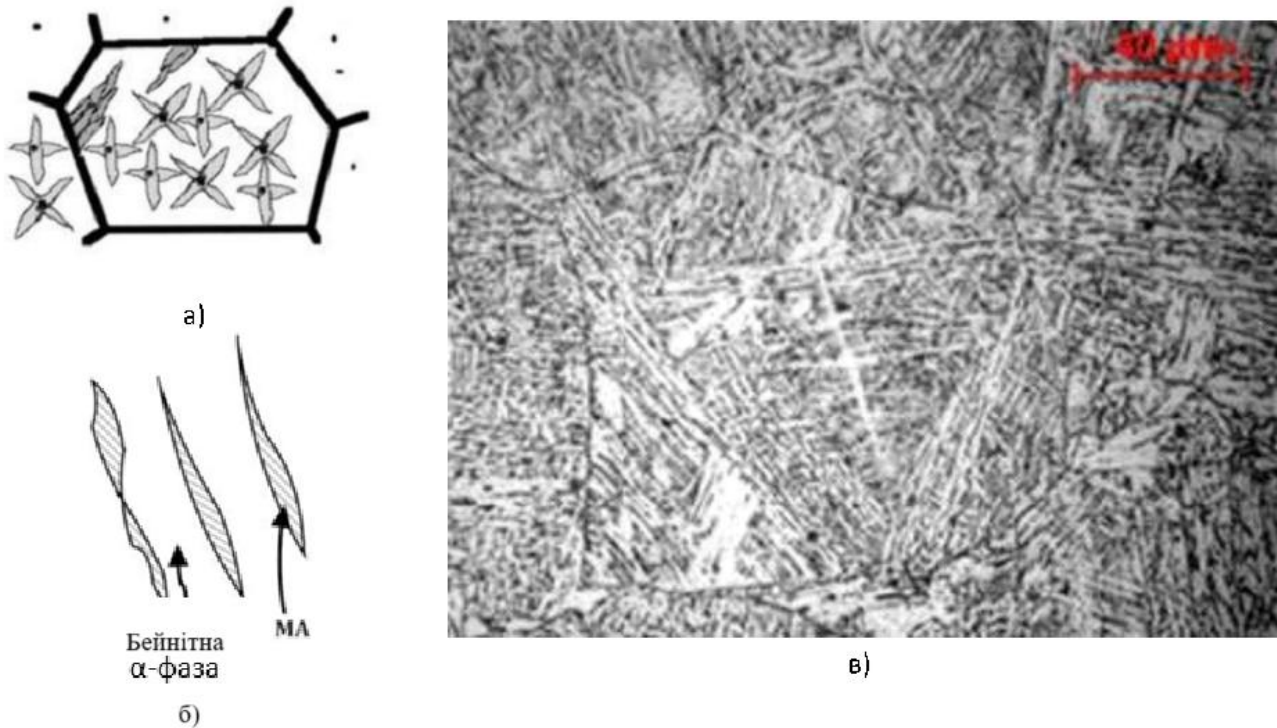


Рисунок 4 – Голчастий бейніт:
а) схематичне зображення; б) форма МА; в) фотографія мікроструктури, збільшення x500

При подальшому підвищенні швидкості охолодження понад 30 °С $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення відбувається за дифузійно-зсувним механізмом. Відбувається утворення рейкового бейніту з невеликими дисперсними прошарками МА (рис. 5) через малу дифузію вуглецю.

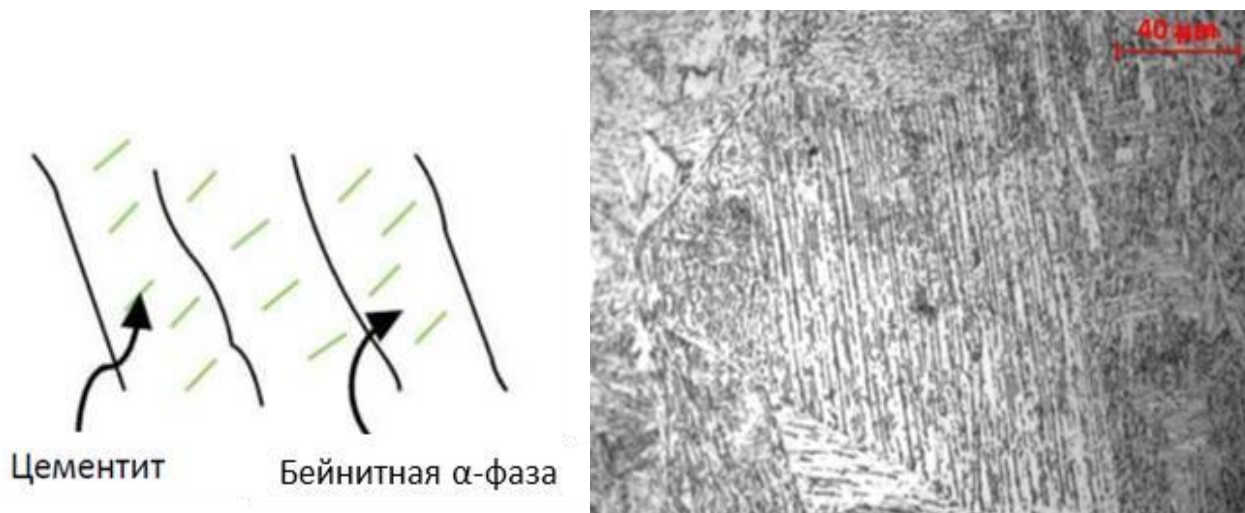


Рисунок 5 – Рейковий бейніт:
а) схематичне зображення; б) фотографія мікроструктури, збільшення x500

У ході металографічних досліджень було здійснено вимірювання величини вихідного зерна аустеніту. Результати вимірювань представлені у таблиці 1.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 1 – Залежність величини зерна від швидкості охолодження

Швидкість охолодження, °C/c				
1	5	10	30	100
Величина зерна, км				
98	83	76	70	59

Спостерігається тенденція зменшення величини вихідного зерна аустеніту зі збільшенням швидкості охолодження. Це пов'язано зі скороченням часу перебування зразка при температурі активного зростання зерна аустеніту (понад 1000-1100°C). Залежність величини вихідного зерна аустеніту від швидкості охолодження досліджуваної сталі представлені на рис. 6.

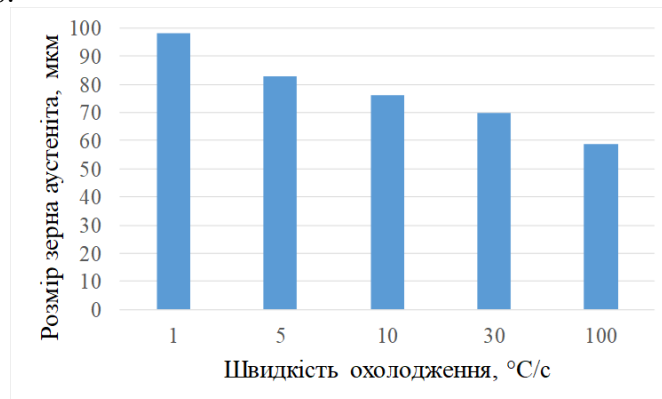


Рисунок 6 – Залежність величини зерна вихідного аустеніту від часу перебування сталі при температурі понад 1000°C за умов зварювального циклу.

ВИСНОВКИ

Отримані в ході досліджень результати свідчать, що в'язкопластичні та корозійні властивості (ударна в'язкість, твердість) поздовжніх зварних з'єднань ТВД залежать від типу мікроструктури, сформованої в зоні перегріву ЗТВ, яка, своєю чергою, визначається швидкістю охолодження. За швидкості охолодження в зоні перегріву ЗТВ нижче 10 °C/c формується верхній бейніт гранулярної морфології. Низькі значення в'язкопластичних властивостей металу в зоні перегріву ЗТВ при формуванні бейніту гранулярної морфології зумовлені низьким ступенем розорієнтованості такої мікроструктури.

Формування нижнього бейніту голчастої та рейкової морфології забезпечує високий ступінь розорієнтованості внутрішньозеренної структури та часту зміну напрямку поширення тріщини й енергоємності її росту під час руйнування, що приводить до підвищення в'язкопластичних властивостей сталі.

Для забезпечення швидкості охолодження в зоні перегріву в інтервалі 10–20 °C/c під час виробництва ТВД необхідно збільшити інтенсивність охолодження, наприклад шляхом підохолодження перед виконанням зовнішнього поздовжнього шва, а також за рахунок зниження загальної погонної енергії зварювання.

Список використаних джерел

1. *Віталій Чекме́з*: «Як розвивається сегмент труб великого діаметру в Україні». URL: <https://gmcenter.ua/interview/vitalij-chekmez-yak-rozvivaetsya-segment-trub-velikogo-diametru-v-ukraini/> (дата звернення 04.12.2025)

2. Гольдштейн М. И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
3. Грабин В.Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / В.Ф. Грабин, А.В. Денисенко. К.: Наук. думка, 1978. – 272 с.
4. Пантейков С.П. Спеціальна металургія сталей і сплавів. Т.1. Спеціальні сталі і сплави : навчальний посібник / С.П. Пантейков, М.А. Кащеев. Кам'янське : ДДТУ, 2021. – 118 с.
5. Позняков В.Д. Технології зварювання для виготовлення і ремонту металевих конструкцій із високоміцних сталей / В.Д. Позняков. Вісник НАН України, 2017, № 1 С.64-70
6. Позняков В.Д. Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S355J2) / В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, А.А. Максименко. Автоматическая сварка. 2012. № 8. С. 7—11.
7. Костін В.А. Структурні перетворення металу зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних броньових сталей / В.А. Костін, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, Т.О. Зубер. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2019. Т. 55, № 6. С. 78-83.
8. Mohsen Mohammadijoo Characterization of HAZ of API X70 Microalloyed Steel Welded by Cold-wire Tandem Submerged Arc Welding / Mohsen Mohammadijoo, Stephen Kenny, Laurie Collins, Hani Henein. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, Volume 48, pages 2247–2259.

Zaharova I.V., Kurov Y.V.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF POST-WELD COOLING RATE ON SERVICE PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF LARGE DIAMETER LONGITUDINALLY WELDED PIPES OF STRENGTH CLASS K60 (X70)

The aim of the study is to determine the influence of welding thermal cycles on the structural-phase transformations and mechanical properties of K60 (X70) strength class pipe steel.

Due to the complex morphology and narrow width of the heat-affected zone (HAZ), the assessment of changes in the metal structure was performed using welding thermal cycle simulation, which allows investigating the influence of heat input without conducting the actual welding process.

The specimens were heated at a rate of 260 °C/s to 1350 °C and cooled within the range of 0.2–200 °C/s. Based on the dilatometric curves, a continuous cooling transformation (CCT) diagram of supercooled austenite decomposition was constructed. It showed that the dominant transformation in the investigated steel is bainitic, whereas ferritic transformation is observed only at low cooling rates. At cooling rates up to 5 °C/s, polygonal ferrite forms along the grain boundaries, indicating potentially low impact toughness. In the range up to 10 °C/s, granular bainite (upper bainite) is formed, while at 10–30 °C/s — acicular bainite (lower bainite). At rates exceeding 30 °C/s, lath bainite with dispersed MA constituents forms. The prior austenite grain size decreases as the cooling rate increases.

It was established that the HAZ microstructure significantly determines the toughness properties of the steel: granular bainite is characterized by low misorientation and inferior impact toughness, while acicular and lath bainite provide improved mechanical characteristics.

To achieve optimal properties under industrial conditions, it is recommended to maintain a cooling rate of 10–20 °C/s by intensifying cooling and reducing the welding heat input.

Keywords: High-strength pipe steel; X70 steel; heat-affected zone (HAZ); welding thermal cycle simulation; CCT diagram; phase transformations; bainite structure; cooling rate; impact toughness.

Стаття надійшла 04.12.2025р.