

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ЗОНІ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБНОЇ СТАЛІ

У статті досліджено характер структурних перетворень у зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань трубної сталі 13Г1СУ, що виникають при різних швидкостях охолодження в умовах імітації зварювального термічного циклу. Сталь 13Г1СУ відноситься до низьколегованих конструкційних сталей підвищеної міцності, які широко застосовуються в енергетичній, будівельній і трубопровідній галузях, зокрема у виготовленні магістральних трубопроводів, резервуарів високого тиску та зварних конструкцій, що експлуатуються в умовах низьких температур. Надійність таких зварних з'єднань суттєво залежить від структури та властивостей ЗТВ, яка формується внаслідок нагріву й подальшого охолодження під час зварювання.

Проведено комплекс дилатометричних та мікроструктурних досліджень у діапазоні швидкостей охолодження від 100 до 0,3 °С/с. Встановлено, що в залежності від термодинамічних умов у ЗТВ формується мартенситно-бейнітна, бейнітна, ферито-бейнітна структура або суміші з різним співвідношенням фаз. При високих швидкостях охолодження (100 °С/с) переважає тверда змішана бейнітно-мартенситна структура з високою твердістю (до 358 НV), яка характеризується підвищеною схильністю до холодних тріщин. Із зменшенням швидкості охолодження зменшується вміст мартенситу, зростає частка бейніту та полігонального фериту, що сприяє зниженню твердості й підвищенню пластичності ЗТВ.

На основі отриманих результатів встановлено ділянки температур і відповідні швидкості охолодження, при яких формуються структурні стани з оптимальними механічними характеристиками. Визначено безпечні режими охолодження для зварювання сталі 13Г1СУ, за яких мінімізується ризик утворення твердих та крихких фаз у ЗТВ. Отримані результати є основою для подальшої оптимізації зварювальних технологій та підвищення надійності зварних з'єднань у відповідальних конструкціях.

Ключові слова: сталь 13Г1СУ, зварювання, зона термічного впливу, мікроструктура, бейніт, мартенсит, ферит, швидкість охолодження, твердість.

Постановка проблеми. Сталь марки 13Г1СУ — це низьколегована конструкційна сталь, яка використовується при виготовленні труб для магістральних газо- і нафтопроводів, зварних конструкцій у важких умовах експлуатації а також резервуарів і котлів високого тиску. Надалі ці вироби широко застосовується в енергетиці, будівництві, машинобудуванні та трубопроводах, особливо там, де важлива витривалість при низьких температурах, ударна в'язкість та зварюваність.

Одною з основних проблем при зварюванні сталі 13Г1СУ є тенденція до утворення твердих структур (мартенсит, бейніт) у зоні термічного впливу (ЗТВ), особливо при високих швидкостях охолодження, наприклад, при зварюванні в холодному середовищі чи тонких секцій. Це знижує ударну в'язкість і підвищує ризик тріщин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На структурні перетворення у зоні термічного впливу зварних з'єднань впливає як хімічний склад і початковий стан сталі, так і режим нагріву та охолодження під час дугового зварювання, який відрізняється від умов звичайної термічної обробки [1]. ЗТВ має декілька структурних ділянок, які відрізняються за формою і будовою зерен, та характеристики кожної ділянки різняться в залежності від

Машинобудування і зварювальне виробництво

температури [2]. При зварюванні сталей з підвищеним вмістом легуючих елементів в ЗНВ можливе утворення гартівних структур і тріщин [3].

Шляхом побудови термокінетичної діаграми розпаду аустеніту встановлено вплив швидкості охолодження зразків-імітаторів високоміцних броньованих сталей Quardian 500 і Armstal 500 ЗТВ на структуру і тривкість. Встановлено закономірності впливу вуглецю на структуроутворення в металі ЗТВ [4].

В Інституті електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України проводили дослідження, спрямовані на вивчення впливу теплових циклів зварювання на структурні зміни металу в ЗТВ зварних з'єднань високоміцної сталі марки С390 (S355 J2). Встановлено допустимий діапазон швидкостей охолодження металу ЗТВ у температурному інтервалі 600–500 °С та підібрано зварювальні матеріали, які забезпечують властивості зварних з'єднань на рівні вимог до основного металу, а також високу стійкість до утворення холодних тріщин. [5, 6].

Мета дослідження. Метою даної роботи є вивчення структурних перетворень у зоні термічного впливу зварних з'єднань сталі 13Г1СУ при різних швидкостях охолодження та визначення оптимальних умов, які забезпечують мінімізацію дефектності.

Зразки для дилатометричних досліджень вирізали з центральної частини сталевих листів на тій самій висоті, на якій вирізали зразки для механічних випробувань основного металу та зварних з'єднань. На рис. 1 наведено термокінетичну діаграму перетворення аустеніту сталі 13Г1СУ в умовах імітації зварювального термічного циклу, а на рис. 2 — мікроструктуру зразків-імітацій.

У досліджуваному діапазоні швидкостей охолодження (100–0,3 °С/с) перетворення аустеніту під час імітації зварювального термічного циклу відбувається в мартенситній, бейнітній та феритній областях.

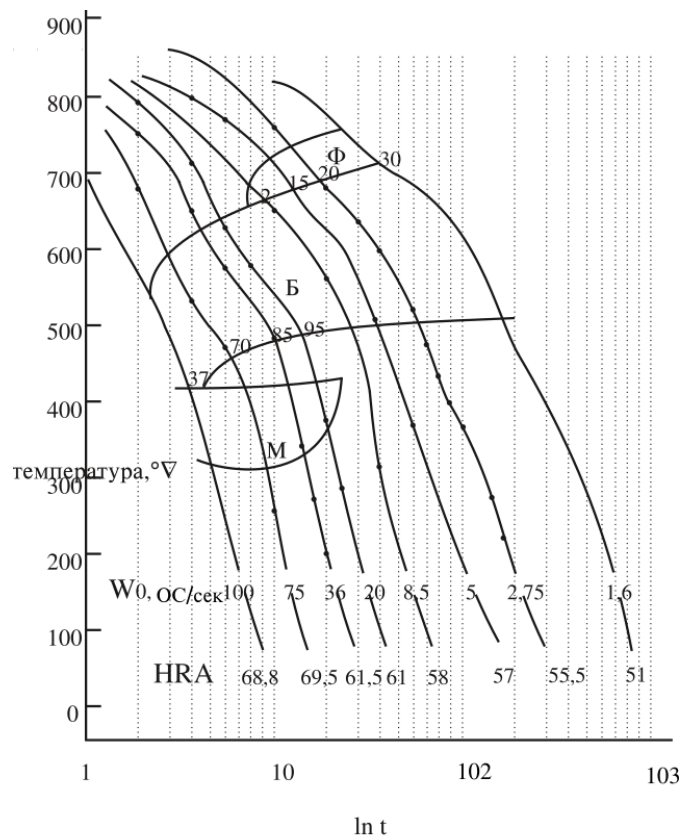


Рисунок 1 – Термокінетична діаграма перетворення аустеніту сталі 13Г1СУ

Машинобудування і зварювальне виробництво

Основний матеріал дослідження. При швидкості охолодження $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ перетворення починається при температурі $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ з утворення бейніту; при $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ воно змінюється на мартенситне. В результаті утворюється змішана бейнітно-мартенситна структура (37% Б і 63% М) з високою твердістю (HV 358). Варто зазначити, що в цій сталі при досліджених швидкостях охолодження чисто мартенситна структура не утворюється. Мартенсит має вигляд світлотравлених ділянок, що складаються з голок різної довжини, розташованих або паралельно, або під кутом 60° . Бейніт має вигляд колоній з тонких паралельних пластин, що ростуть в одному напрямку (рис 2а).

За швидкості охолодження $75\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ температура початку бейнітного перетворення підвищується до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, вміст бейніту збільшується до 70 %, а мартенситу — зменшується до 30 %, з'являється зона відносної стійкості аустеніту між бейнітною та мартенситною областями. Через зменшення вмісту мартенситу твердість знижується до HV 276. Мартенсит має вигляд світлих ділянок із внутрішньою голчастою будовою (рис. 2b); вони оточені колоніями бейніту з ширшими пластинами та збільшеною відстанню між ними. Через широкий температурний інтервал бейнітного перетворення ширина та відстань між пластинами різна.

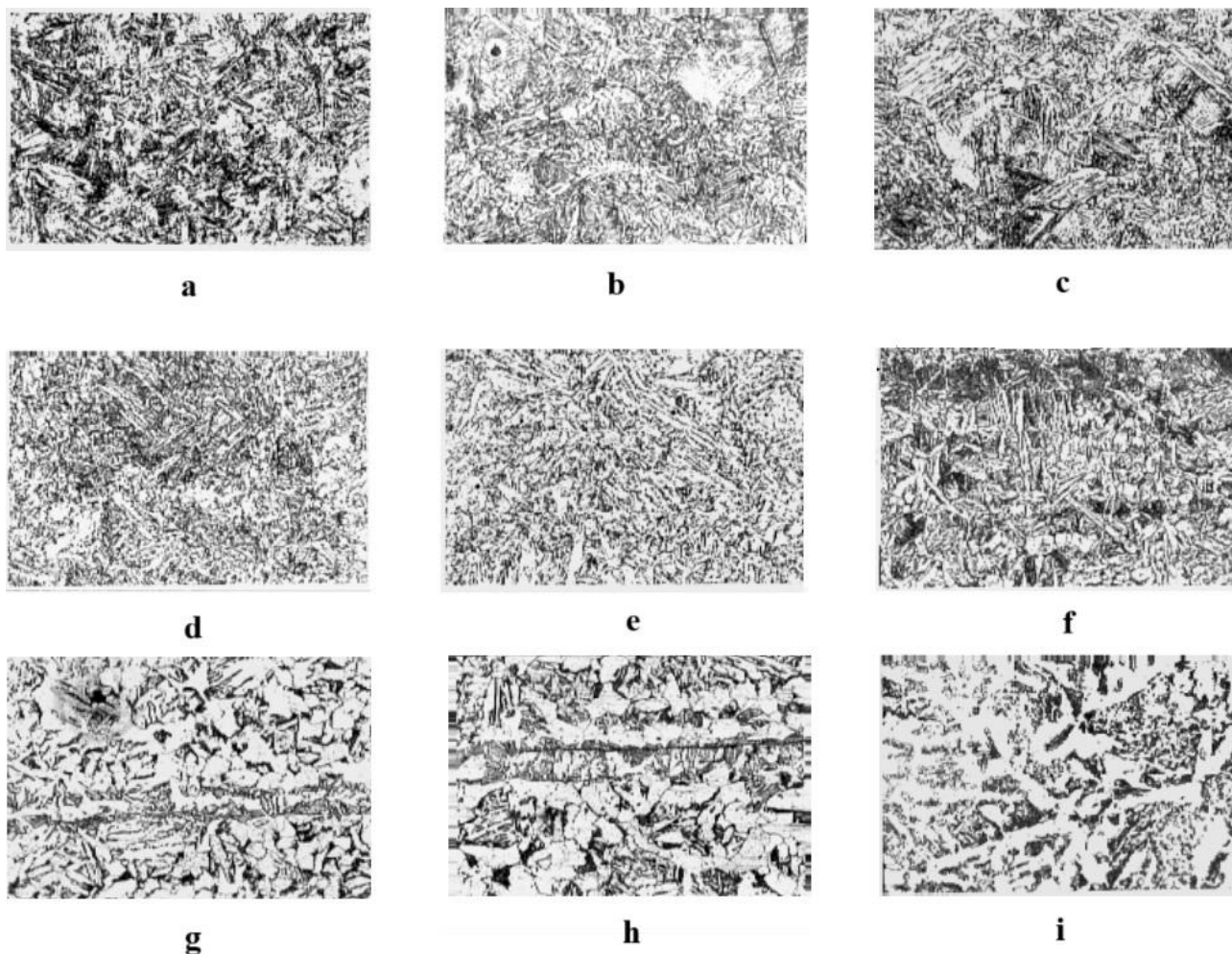


Рисунок 2 – Мікроструктура зразків імітаторів сталі 13Г1СУ, які охолоджувалися зі швидкостями, $^{\circ}\text{C/s}$: а – 100, б – 75, с – 36, д – 20, е – 8,5, ф – 5, г – 2,7, h – 1,6, і – 0,3

При охолодженні зі швидкістю $36\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ бейнітне перетворення продовжується, температура його початку зростає до $625\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вміст бейніту досягає 85 %, мартенситу — 15

Машинобудування і зварювальне виробництво

%. Мікроструктура — суміш бейніту й мартенситу, твердість — 61,7 HRA (238 HV). Бейніт має вигляд колоній з довгими паралельними пластинами (рис. 2с). Порівняно зі швидкістю 75 °C/с при 36 °C/с ширина пластин і відстань між ними більші. Частина пластин подрібнена, вони мають вигляд ланцюжків округлих частинок (глобул), тобто бейніт набуває рис глобулярної структури. Мартенсит оточений бейнітом і має однорідно травлену структуру з голчастою внутрішньою будовою.

За охолодження зі швидкістю 20 °C/с температура початку бейнітного перетворення підвищується до 640 °C, бейніт стає доміантною фазою (95%). У ньому зростає кількість пластин, що розпалися на глобули, тож бейніт стає змішаним: одні ділянки зберігають пластинчасту форму, інші (більшість) — зернисту (рис. 2d). Мартенсит становить 5% і має вигляд світлотравлених острівців, оточених бейнітною матрицею. Твердість зразка — 60,8 HRA (225 HV).

При подальшому зменшенні швидкості охолодження (8,5 °C/с) температура бейнітного перетворення підвищується до 660 °C. Перед утворенням бейніту виділяється незначна кількість (2%) полігонального фериту, який виявляється лише під мікроскопом і має вигляд окремих дрібних зерен (рис. 2е). Структура — бейніт із збереженою голчастою формою, з подальшим потовщенням пластин. Спостерігаються частки темнотравленої бейнітної складової, орієнтовані за напрямом прокату. Мартенсит не утворюється. Твердість — 58,2 HRA (199 HV).

При 5 °C/с зростають процеси утворення полігонального фериту, його частка — до 15 % (решта — бейніт). Температура початку феритного та бейнітного перетворень підвищується, кінець бейнітного — незначно. Структура складається із зерен полігонального фериту, що формують короткі ланцюжки вздовж прокату (рис. 2f). Бейніт має голчасту будову, як при 8,5 °C/с, з підвищеною часткою темнотравленої складової, у вигляді частинок або витягнутих смуг (рис. 2f). Це початкова стадія структурної неоднорідності, властивої прокату металу. Твердість — 56,7 HRA (184 HV).

За швидкості охолодження 2,7 °C/с температура початку перетворень підвищується, частка фериту — 20 %. Феритні ланцюжки стають довшими, місцями розташовуються по межах зерен або витягуються вздовж прокату (рис. 2g). Поряд — зерна бейнітної темнотравленої складової. Ця фаза також рівномірно розподілена в бейнітній матриці, що наближається до глобулярної. Твердість — 55,5 HRA (174 HV).

Подальше уповільнення охолодження (до 1,6 °C/с) підвищує температуру початку перетворень і вміст полігонального фериту до 36 %. Структура подібна до тієї, що при 2,7 °C/с, але з виразнішими рисами. Зростає кількість фериту, який утворює суцільні смуги вздовж меж зерен. Довжина ланцюжків фериту збільшується, вони виглядають як смуги (рис. 2h). Поруч — зерна бейніту, що розпадаються на частинки за типом фази «А». Видно зв'язок структурної неоднорідності з вихідною неоднорідністю прокатки — поблизу витягнутої сульфідної смуги. Твердість — 55,1 HRA (172 HV).

ВИСНОВКИ

При імітації зварювальних термічних циклів у діапазоні швидкостей охолодження 100–1,6 °C/с аустеніт у сталі 13Г1СУ перетворюється в мартенсит, бейніт та ферит. Чисто мартенситне перетворення не спостерігається навіть при 100 °C/с — утворюється 37% бейніту. Високою є температура початку і особливо завершення бейнітного перетворення при цій швидкості (420 і 350 °C). Твердість закономірно зменшується зі зниженням швидкості охолодження, особливо при придушенні мартенситу та розвитку фериту. Структурний аналіз подано в Таблиці 1.

Мінімальні допустимі швидкості охолодження визначаються за діаграмою, використовуючи критерії: твердість HV не більше 350, кількість мартенситу – 50%,

Машинобудування і зварювальне виробництво

температура кінця мартенситного перетворення не нижче 290 °С. З цих критеріїв безпечні швидкості охолодження для сталі 13Г1СУ – включаючи 75 °С/с (30 % М, 276 HV) і нижче.

Таблиця 1 – Структурні перетворення та твердість зразків за різних швидкостей охолодження

Швидкість охолодження, °С/с	Температура початку перетворень, °С	Фази та їхній вміст, %	Структурні особливості	Твердість (HRA / HV)
100	540 (Б), 420 (М)	Б — 37%, М — 63%	Бейніт: колонії тонких пластин; мартенсит: голки під кутом 60° (рис. 2а)	— / 358
75	600	Б — 70%, М — 30%	Бейніт: ширші пластини, збільшена відстань (рис. 2б)	— / 276
36	625	Б — 85%, М — 15%	Бейніт: довгі пластини, частково глобулярний (рис. 2с)	61.7 / 238
20	640	Б — 95%, М — 5%	Бейніт: переважно глобули; мартенсит — острівці (рис. 2д)	60.8 / 225
8,5	660	Б — ~83%, Ф — 2%, М — 0%	Полігональний ферит; бейніт — голчастий, частки темнотравленої фази (рис. 2е)	58.2 / 199
5	>660	Б — ~85%, Ф — 15%, М — 0%	Ферит: ланцюжки вздовж прокату; бейніт: смуги темнотравленої фази (рис. 2ф)	56.7 / 184
2,7	↑	Ф — 20%, решта — Б	Ферит: ланцюжки вздовж прокату; бейніт: глобулярна матриця (рис. 2г)	55.5 / 174
1,6	↑	Ф — 36%, решта — Б	Ферит: смуги вздовж меж зерен; бейніт: фаза «А», структурна неоднорідність (рис. 2г)	55.1 / 172

Список використаних джерел

1. Грабин В.Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / В.Ф. Грабин, А.В. Денисенко. К.: Наук. думка, 1978. – 272с.
2. Гуменюк І.В. Обладнання та технології зварювальних робіт: навч. посіб. / І.В. Гуменюк. К.: Грамота, 2014. – 120с.
3. Афтандіянц Є.Г. Матеріалознавство: Підручник / Є.Г. Афтандіянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. Херсон: Олді-плюс, Київ: Видавництво Ліра-К, 2013. – 612 с.
4. 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.
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.

Машинобудування і зварювальне виробництво

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.

Zaharova I.V., Kurov E.V.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN THE HEAT-AFFECTED ZONE OF WELDED JOINTS IN PIPE STEEL

The study investigates the nature of structural transformations in the heat-affected zone (HAZ) of welded joints in 13G1SU pipe steel under different cooling rates simulated by welding thermal cycles. 13G1SU steel is a low-alloy high-strength structural steel widely used in the energy, construction, and pipeline industries, particularly in the production of main pipelines, high-pressure vessels, and welded structures operating under low-temperature conditions.

The reliability of such welded joints is significantly influenced by the microstructure and properties of the HAZ, which are formed as a result of heating and subsequent cooling during welding.

A comprehensive dilatometric and microstructural analysis was performed in the cooling rate range of 100 to 0.3 °C/s. It was established that depending on the thermokinetic conditions, the HAZ microstructure may consist of martensitic-bainitic, bainitic, ferritic-bainitic structures, or mixtures with various phase ratios. At high cooling rates (100 °C/s), a hard bainitic-martensitic mixed structure dominates, reaching hardness values up to 358 HV and demonstrating increased susceptibility to cold cracking. As the cooling rate decreases, the martensite content decreases while the proportion of bainite and polygonal ferrite increases, resulting in reduced hardness and enhanced ductility of the HAZ.

Based on the obtained results, temperature ranges and corresponding cooling rates were identified at which structural states with optimal mechanical properties are formed. Safe cooling regimes for welding 13G1SU steel were determined, which minimize the risk of forming hard and brittle phases in the HAZ. The results provide a foundation for further optimization of welding technologies and improvement of welded joint reliability in critical applications.

Keywords: 13G1SU steel, welding, heat-affected zone, microstructure, bainite, martensite, ferrite, cooling rate, hardness.

Стаття надійшла 24.04.2025р.

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990292025330209

Щетиніна В.І., Воленко І.В.

ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЗАНУРЮВАЛЬНИХ БАРАБАНІВ АГРЕГАТУ ЦИНКУВАННЯ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ

Занурювальний барабан, що забезпечує занурення протравленої в сірчаній кислоті полоси в цинк, при безперервному гарячому цинкуванні, з температурою 718 – 728 К в ванні агрегату цинкування, експлуатується під дією високої температури і агресивного середовища, корозії, руху полоси, розплаву, абразивного зносу і конвективних потоків. В результаті зносу під дією високої температури і агресивного середовища занурювальний барабан виходить з строю, що призводить до зупинок агрегату цинкування, електромагнітного викачування рідкого цинку з ванни, збільшення витрати цинку,