

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ТЕРМОКІНЕТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ (Огляд)

В.В. Жуков, В.А. Костін, С.Г. Григоренко, Р.С. Губатюк

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: zhukov.kyiv@gmail.com

У статті представлено огляд сучасних підходів до побудови ССТ-діаграм і спеціальних діаграм, сформованих на основі результатів дилатометричного експерименту, для аналізу структурно-фазових перетворень у сталях під час охолодження. Розглянуто методологію фізичного моделювання теплових циклів на установках Gleeble, а також типові параметри нагріву й охолодження. Особливу увагу приділено впливу швидкості охолодження на формування мікроструктури в зоні термічного впливу зварних з'єднань. Порівняно підходи з використанням постійних і змінних (нелінійних) режимів охолодження з акцентом на їх відповідність реальним умовам зварювання. Обґрунтовано переваги нелінійних термічних циклів для підвищення достовірності моделювання та коректності побудови ССТ-діаграм при оцінці зварюваності сталей. Бібліогр. 16, рис. 8.

Ключові слова: фізичне моделювання, фазові перетворення, мікроструктура, аустеніт, мартенсит, ССТ та DCCT діаграми, Gleeble, зварні з'єднання

Вступ. Термокінетичні діаграми (ТКД) розпаду переохолодженого аустеніту (в англійській літературі ССТ-діаграми – Continuous Cooling Transformation) є важливим інструментом для аналізу структурно-фазових перетворень у сталях під час охолодження. Вони відображають, як змінюється структура аустеніту при різних швидкостях охолодження, тобто яка фаза (ферит, перліт, бейніт або мартенсит) формується в залежності від температури та часу [1–3].

Використовуючи ТКД, фахівці можуть:

- прогнозувати структуру в кожній зоні термічного впливу (ЗТВ) – знати, чи утвориться мартенсит (що призводить до крихкості) або ферит/перліт (що забезпечує пластичність);
- оцінювати ризик холодних тріщин, що часто пов'язано з появою мартенситу при швидкому охолодженні;
- обирати зварювальні режими (струм, швидкість зварювання, попередній/допоміжний підігрів), щоб зменшити шкідливі структурні зміни;
- визначати необхідність термічної обробки після зварювання.

Таким чином, ТКД є критично важливими при зварюванні відповідальних конструкцій – від трубопроводів до броні – де потрібен контроль структури та властивостей металу в ЗТВ.

Дилатометричний експеримент – це основа експериментальної побудови ТКД. Це – метод дослідження фазових перетворень у матеріалах, за-

снований на вимірюванні змін лінійних розмірів зразка під час термічного циклу (нагріву або охолодження). Він проводиться за допомогою дилатометра – високоточного приладу, який фіксує деформацію матеріалу з точністю до мікронів при зміні температури. Зразок сталі нагрівають до температури аустенізації (вище A_{C3}), витримують певний час для стабілізації структури. Далі зразок охолоджують з постійною заданою швидкістю (наприклад 1 °C/c). Під час охолодження дилатометр реєструє зміну довжини зразка в реальному часі. У точках фазових перетворень (аустеніт→ферит, перліт, бейніт тощо) відбуваються стрибкоподібні або характерні зміни кривої деформації, що фіксуються приладом [4]. В Україні, на жаль, досі не існує стандарту, що регламентує побудову ТКД, а також проведення дилатометричного експерименту.

Стандарт ASTM A1033-18 (2023) [5], що має назву «Standard Practice for Quantitative Measurement and Reporting of Hypoeutectoid Carbon and Low-Alloy Steel Phase Transformations», описує методику кількісного вимірювання та представлення фазових перетворень у гіпоeutектоїдних вуглецевих і низьколегованих сталях за допомогою високошвидкісної дилатометрії. У розділі 1.3 цього стандарту зазначено, що методика застосовується для визначення поведінки фазових перетворень сталі як за ізотермічних умов, так і за умов безперервного охолодження. Хоча термін «ССТ-діаграма» (Continuous Cooling Transformation) прямо не використовується, описані методи дозволяють отримувати дані, необ-

Жуков В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3358-8491>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>,

Григоренко С.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-0625-7010>, Губатюк Р.С. – <https://orcid.org/0000-0002-0851-743X>

© В.В. Жуков, В.А. Костін, С.Г. Григоренко, Р.С. Губатюк, 2025

хідні для побудови таких діаграм. Таким чином, стандарт не містить прямого посилання на CCT-діаграми, але надає методологію, що дозволяє отримувати інформацію для їх побудови.

У стандарті ASTM A1033-18 (2023) методика побудови даних фазових перетворень передбачає використання лінійних (тобто постійних) швидкостей охолодження. Якщо контроль за постійною швидкістю неможливий (наприклад у реальному технологічному процесі), то необхідно фіксувати миттєву швидкість охолодження при 700 °C і тривалість охолодження в інтервалі 800...500 °C.

Мета роботи – проаналізувати сучасні методи побудови термкінетичних діаграм фазових перетворень в умовах зварювання з метою урахування складних температурно-механічних впливів та нелінійного характеру термічного циклу зварювання.

Виклад основного матеріалу. Доволі часто CCT-діаграми, що побудовані з використанням постійних швидкостей охолодження, використовуються для оцінки структурно-фазового складу сталей в ЗТВ. Наприклад, у [6] досліджено мікроструктурні перетворення в ЗТВ сталі X70 (C – 0,06 %; Mn – 1,28 %; Si – 0,26 %; Nb – 0,045 %; Ti – 0,014 %; Mo – 0,17 %) для трубопроводів при зварювальних теплових циклах. Експерименти проводили на установці Gleeble 3500. Для вивчення фазових перетворень зразки нагрівали зі швидкістю 10 °C/c до максимальної температури 1300 °C, потім охолоджували до 900 °C за 1 с, витримували 16 с при цій температурі, а потім охолоджували до кімнатної температури з постійними швидкостями охолодження від 60 до 0,1 °C/c. Слід зазначити, що діаграма побудована від температури 900 °C. Автори роблять висновок, що оптимальна швидкість охолодження для забезпечення міцності та в'язкості ЗТВ становить 10...20 °C/c (рис. 1).

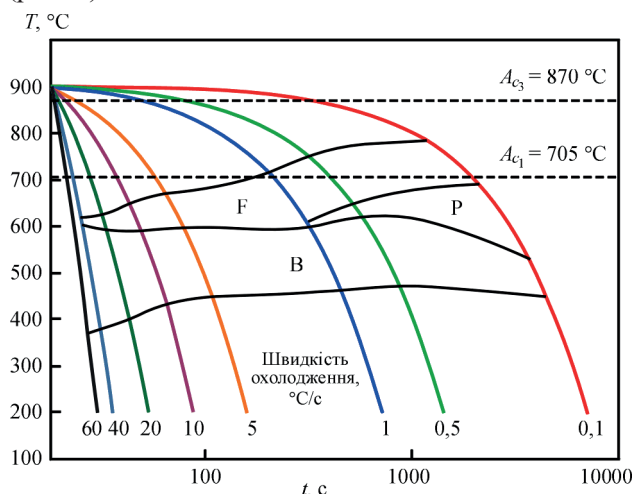


Рис. 1. CCT-діаграма сталі трубної сталі X70. Мікроструктури: F – ферит; B – бейніт; P – перліт [6]

У [7] представлено побудову CCT-діаграми для ЗТВ вуглецевої сталі SA106 Grade B (C – 0,3 %; Mn – 0,7 %; Si – 0,1 %; Cr – 0,4 %; Cu – 0,4 %; Mo – 0,15 %; Ni – 0,4 %; V – 0,08 %). Мета дослідження – оцінка фазових перетворень і мікроструктури, які утворюються в ЗТВ при різних швидкостях охолодження, що відтворює умови дугового зварювання.

Дилатометричний експеримент виконано на установці Gleeble 3500. Зразки нагрівали зі швидкістю 100 °C/c до 1200 °C, витримували при цій температурі 1 с та охолоджували до кімнатної температури із заданими постійними швидкостями від 0,1 до 100 °C/c. У загальних висновках вказано, що оптимальний інтервал охолодження для формування сприятливої структури – 10...20 °C/c. Отримана CCT-діаграма рекомендована для розробки технологій зварювання сталі SA106 Grade B (рис. 2).

У [8] досліджено вплив різних швидкостей охолодження на мікроструктуру ЗТВ та побудовано CCT-діаграму для умов процесу зварювання сталі CLAM (China Low Activation Martensitic, C – 0,093 %; Cr – 8,39 %; W – 1,499 %; V – 0,196 %; Ta – < 0,01 %; Mn – 0,44 %), що є феритно-мартенситною сталлю, призначеною для застосування в атомних реакторах.

Фізичне моделювання виконували на установці Gleeble-1500. Термічний цикл містив нагрів до температури 1623 K (~ 1350 °C) за 2 хв, витримку 1 хв та охолодження до кімнатної температури з постійними швидкостями охолодження в діапазоні 3600...1 K/хв (60...0,017 °C/c). Побудована CCT-діаграма містить лише дві області фазових перетворень: феритне та мартенситне. Автори зазначають, що діаграма дозволяє передбачити структуру ЗТВ та є корисним інструментом для оцінки зварюваності сталі CLAM (рис. 3).

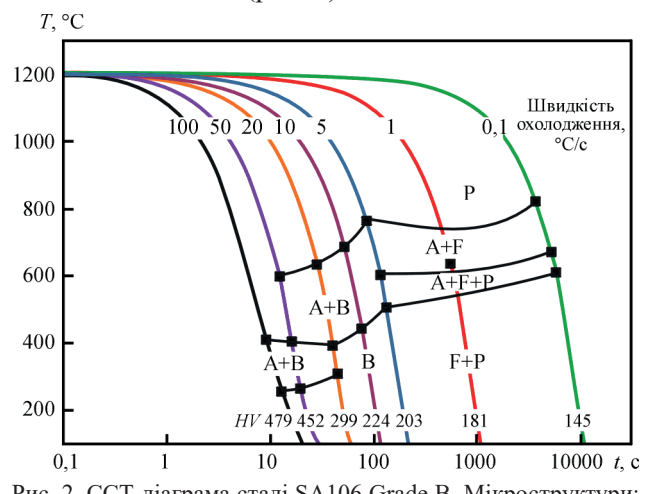


Рис. 2. CCT-діаграма сталі SA106 Grade B. Мікроструктури: A – аустеніт; F – ферит; B – бейніт; P – перліт; M – мартенсит [7]

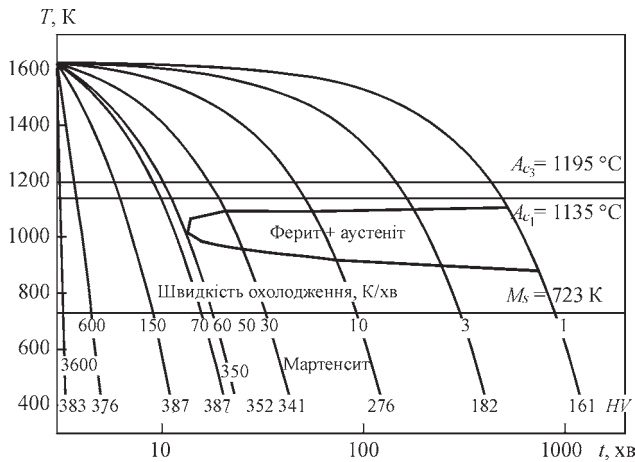


Рис. 3. CCT-діаграма сталі CLAM для ЗТВ [8]

Хоча розглянуті вище роботи щодо побудови ТКД-діаграм автори позиціонують як роботи для вивчення впливу ЗТВ на структуру сталі при зварюванні, діапазони швидкостей охолодження, які використовуються в побудові ТКД у цих роботах, дуже схожі з такими, які використовуються у роботах з побудови ТКД для створення та оптимізації циклів термічної обробки.

У [9] досліджено поведінку при безперервному охолодженні такої ж сталі, що й в [8] феритно-мартенситної сталі CLAM. Основна мета – побудова CCT-діаграми та вивчення впливу швидкості охолодження на фазові перетворення та мікротвердість. Однак у цій роботі основні зусилля було направлено на розробку термічної обробки цієї сталі.

Фізичне моделювання проведено на установці Gleeble 1500. Зразки нагрівали до 1253 K ($\approx 980 \text{ }^\circ\text{C}$) за 15 хв, витримували 30 хв, після чого охолоджували до кімнатної температури зі швидкостями від 240 K/хв ($4 \text{ }^\circ\text{C/c}$) до 1 K/хв ($0,017 \text{ }^\circ\text{C/c}$). Усі термічні цикли охолодження проводили з постійною швидкістю. Автори зазначають, що отримані результати можуть бути використані для розробки режимів термічної обробки з прогнозованим фазовим складом у кри-

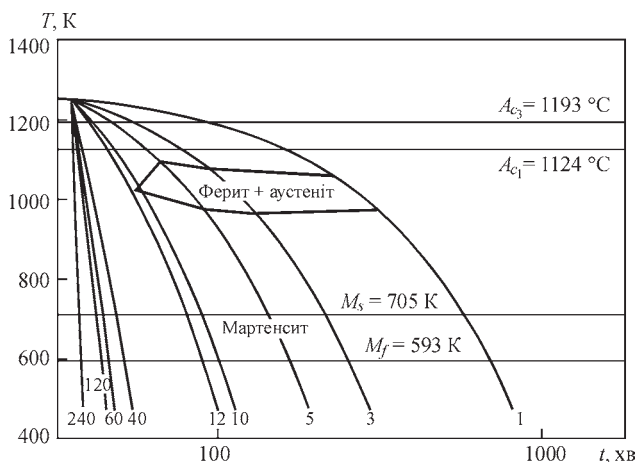


Рис. 4. CCT-діаграма сталі CLAM для термічної обробки [9]

тичних зонах конструкцій атомних реакторів (рис. 4).

Умови побудови CCT/ТКД відрізняються для кожного випадку й по суті проведення дилатометричного експерименту є фізичним моделюванням технологічного впливу на матеріал. Якщо під час технологічної обробки матеріалу окрім термічного відбувається й деформаційний вплив, то необхідно врахувати це при вивченні кінетики структурно-фазових перетворень.

У літературі іноді зустрічається опис так званих DCCT-діаграм (Deformation Continuous Cooling Transformation). Такі діаграми використовуються для оптимізації режимів термодформаційної обробки та викликані необхідністю врахування термодформаційної обробки на кінетику структурно-фазових перетворень. Так, у [10] досліджено вплив попередньої пластичної деформації на характер CCT-діаграми пружинної сталі 51CrV4 ($C - 0,47...0,55 \%$; $Si - \leq 0,40 \%$; $Mn - 0,70...1,10 \%$; $P - \leq 0,025 \%$; $S - \leq 0,035 \%$; $Cr - 0,90-1,20 \%$; $V - 0,10-0,25 \%$).

На симуляторі Gleeble 3800 було побудовано як стандартну CCT-діаграму, так і DCCT-діаграму, що враховує деформацію до охолодження сталі 51CrV4 (рис. 5).

Для побудови CCT-діаграми без деформації зразки нагрівали до $850 \text{ }^\circ\text{C}$, витримували 120 с і охолоджували зі сталими швидкостями в діапазоні $0,16...12 \text{ }^\circ\text{C/c}$. У циклах з деформацією зразки після такої ж витримки стискали одночасно при $850 \text{ }^\circ\text{C}$ з істинною деформацією 0,35 при швидкості 1 c^{-1} , а потім охолоджували з тими ж швидкостями. Всі цикли охолодження були з постійною швидкістю.

DCCT-діаграма показала зсув кривої початку перлітного перетворення вліво (в область більших швидкостей охолодження), тобто перліт формувався швидше. Крива початку бейнітного перетворення дещо змістилась вгору (до вищих температур), з'явилась також крива завершення бейнітного перетворення. Крива початку мартенситного перетворення трохи знизилась у зоні високих швидкостей. Загалом деформація прискорює анізотермічний розпад аустеніту для даної сталі, особливо це помітно для перлітної складової.

Слід зазначити, що для деформованого металу існує тенденція до прискорення перетворення в умовах постійного охолодження у порівнянні з металом без деформації.

Так, наприклад, у [11] автори дослідили вплив вмісту хрому та попередньої деформації аустеніту на вигляд CCT- і DCCT-діаграм для низьковуглеце-

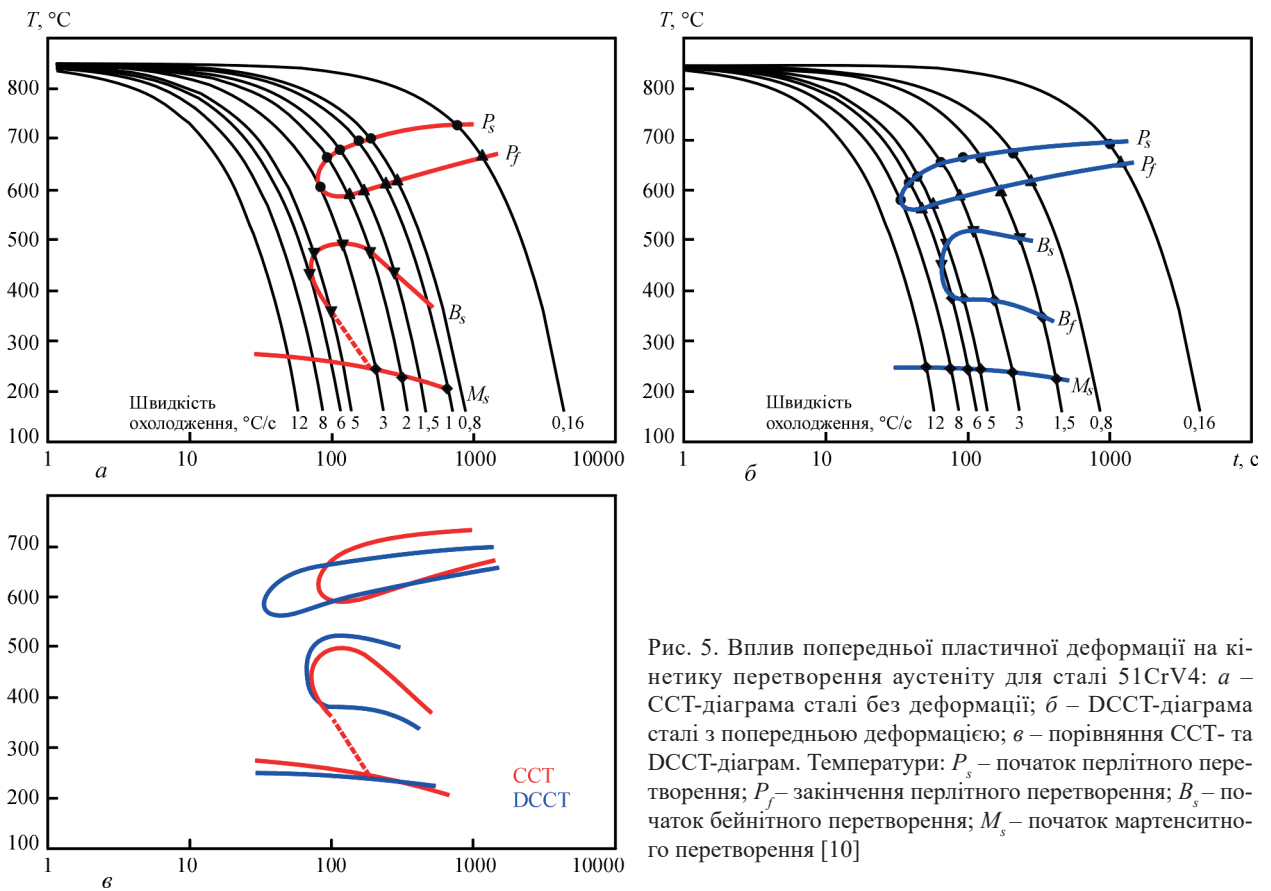


Рис. 5. Вплив попередньої пластичної деформації на кінетику перетворення аустеніту для сталі 51CrV4: *a* – CCT-діаграма сталі без деформації; *б* – DCCT-діаграма сталі з попередньою деформацією; *в* – порівняння CCT- та DCCT-діаграм. Температури: P_s – початок перлітного перетворення; P_f – закінчення перлітного перетворення; B_s – початок бейнітного перетворення; M_s – початок мартенситного перетворення [10]

вих бейнітних сталей. Метою роботи було оцінити, як змінюється структура та твердість залежно від складу, температури охолодження та деформації. Було досліджено три сталі з однаковим вмістом вуглецю (~ 0,033 %), марганцю (~ 0,9...1 %) і ніобію (~ 0,06 %), але з різною концентрацією хрому: 3,97 % (А), 2,52 % (В) і 1,02 % (С) (рис. 6). Усі зразки нагрівали до температури 1100 °C зі швидкістю 10 °C/c і витримували 3 хв. Для побудови CCT-діаграм зразки після витримки охолоджували до кімнатної температури з різними швидкостями охолодження, що варіювалися від 2 до 80 °C/c. Для побудови DCCT-діаграм після витримки зразки охолоджували зі швидкістю 2 °C/c до температури 880 °C. При цій температурі зразки витримували протягом 15 с, а потім до них застосовували стискаючу деформацію із загальною деформацією 0,6 та швидкістю деформації 1 с⁻¹. Після деформації зразки витримували ще 20 с і потім охолоджували до кімнатної температури з різними швидкостями охолодження в діапазоні від 2 до 80 °C/c.

Слід зазначити, що деформаційний вплив призводить до зниження температур початку перетворення аустеніту та зміщення появи феритної фази до вищих швидкостей охолодження (рис. 6). Підвищення вмісту хрому покращує схильність до гартування, знижує температури фазових перетворень, збільшує частку бейніту та зменшує

чутливість структури до деформації. Натомість при низькому вмісті Cr деформація стимулює феритоутворення та істотно змінює кінетику перетворень. Автори вказують, що для формування повністю бейнітної структури необхідно уникати фериту й перліту, чого можна досягти при вмісті Cr у межах 2,5...4 % і швидкості охолодження понад 20 °C/c (рис. 6).

Урахування деформаційного впливу на характер структурно-фазових перетворень має безпосереднє значення при зварюванні. Так, термічні деформації, що виникають при зварюванні в залежності від конструктивних особливостей зварювального виробу, можуть впливати на термкінетику перетворення аустеніту.

Наприклад, у [12] представлено новий підхід до аналізу схильності матеріалів до утворення залишкових напружень у зоні термічного впливу зварного з'єднання – так звані «діаграми зварювальних термічних напружень» (WTSD, Welding Thermal Stress Diagrams). На відміну від класичних CCT-діаграм, які описують фазові перетворення без урахування механічних обмежень, WTSD-діаграми дозволяють прямо оцінити, як реальні зварювальні температурні цикли впливають на розвиток напружень у метали.

Для аналізу було обрано високоміцну низьколеговану сталь ферито-бейнітного класу (C – 0,12 %; Si – 0,07 %; Mn – 1,73 %; P – 0,023 %;

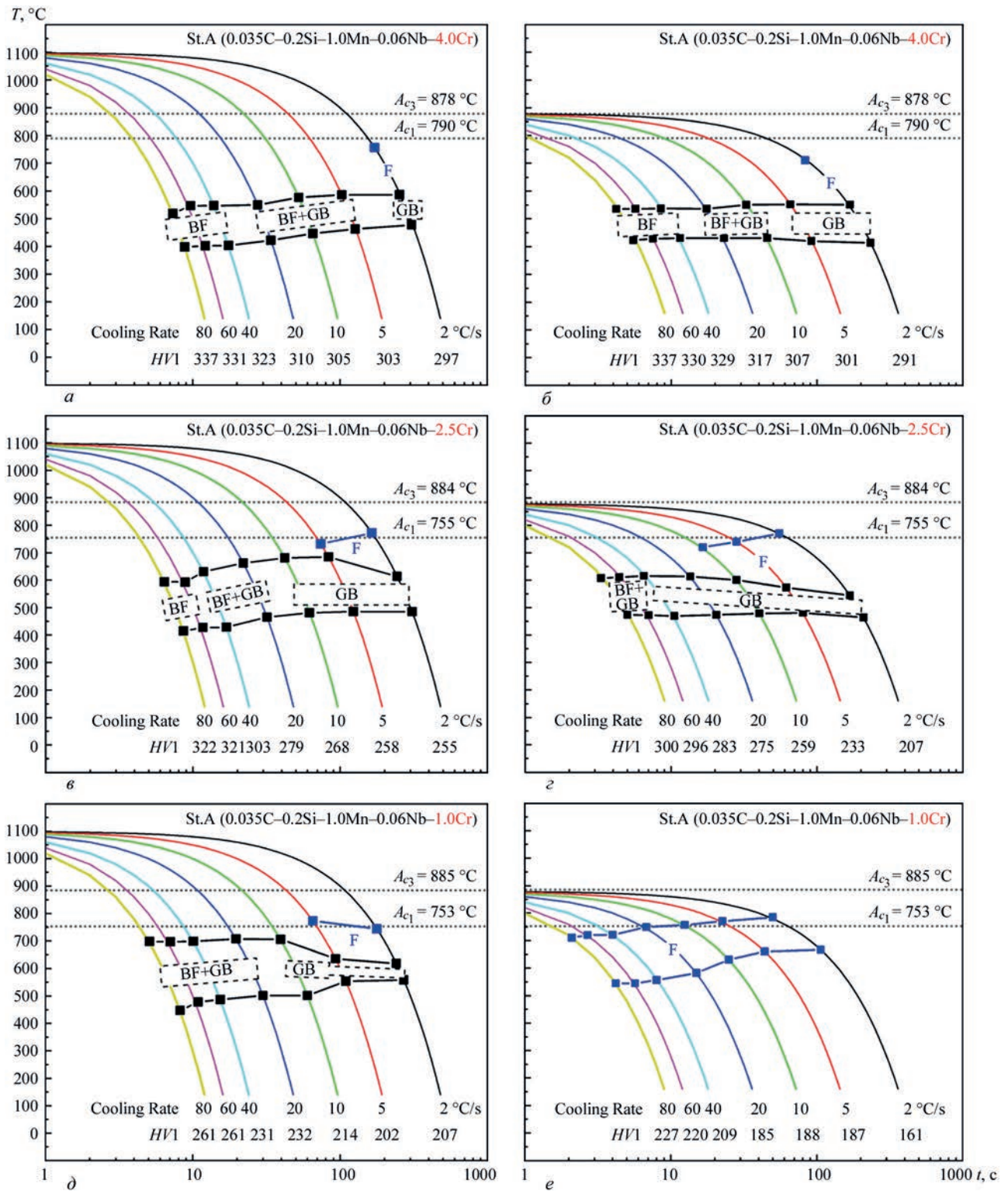


Рис. 6. Вплив вмісту хрому та попередньої пластичної деформації на кінетику перетворення аустеніту низьковуглецевих бейнітних сталей з різним вмістом хрому 3,97 % (A), 2,52 % (B) і 1,02 % (C): *a, в, д* – CCT-діаграми; *б, з, е* – DCCT-діаграми сталей. Мікроструктури: BF – бейнітний ферит; GB – гранулярний бейніт; F – ферит [11]

S – 0,003 %; Al – 0,042 %). Зразки фіксувались у жорстких захватах термомеханічного симулятора Gleeble 3550-GTC, що дозволяло повністю блокувати подовження зразка під час нагріву та охолодження. Таким чином забезпечувалось виникнення внутрішніх напружень, подібних до тих, що формуються в реальних зварних з'єднаннях.

У роботі було проведено моделювання різних зон термічного впливу, які відрізнялись максимальною температурою нагрівання: 1350 $^{\circ}\text{C}$ для зони крупного зерна CGHAZ (Coarse-Grained Heat-Affected Zone), 1100 $^{\circ}\text{C}$ для зони дрібного зерна FGHAZ (Fine-Grained HAZ), 900 $^{\circ}\text{C}$ для міжкритичної ICHAZ (Intercritical HAZ) та 700 $^{\circ}\text{C}$ для

субкритичної зони SCHAZ (Subcritical HAZ). Після досягнення максимальної температури нагріву відбувалось охолодження з різними швидкостями охолодження, які склали від 10 до 100 °C/c (в інтервалі 800...500 °C). Слід зазначити, що автори роботи для моделювання охолодження використовували не постійні швидкості охолодження, а температурні цикли на основі модифікованих рівнянь Розенталя [13] – аналітичних рішень для температурних полів під час зварювання, які враховують швидкість руху теплового джерела, теплопровідність матеріалу та інші параметри. У ході експерименту реєструвалися реактивні зусилля, тобто сила, яка розвивалась у відповідь на теплове розширення та стиснення зразка. За цими показниками визначались величини механічних напружень (термічних і залишкових), які будувались як функція температури. Це дозволяло отримати діаграми типу σ - T (напруження – температура) для кожного режиму (рис. 7).

При аналізі результатів виявлено (рис. 7), що максимальні залишкові напруження не завжди виникають при найвищих або найнижчих швидкостях охолодження, як це прийнято вважати. Наприклад, у зоні CGHAZ максимальні напруження були зафіксовані при середній швидкості охолодження 50 °C/c. Причиною цього є складна взаємодія між фазовими перетвореннями (особливо формуванням мартенситу) та обмеження теплового розширення.

У висновку автори стверджують, що WTSD – це дієвий інструмент для оцінки та моделювання залишкових напружень у зварних з'єднаннях, особливо при використанні сучасних сталей, чутливих до тріщиноутворення. Цей метод може також бути використаний для калібрування чисельних моделей напружень і механічних властивостей металу після зварювання.

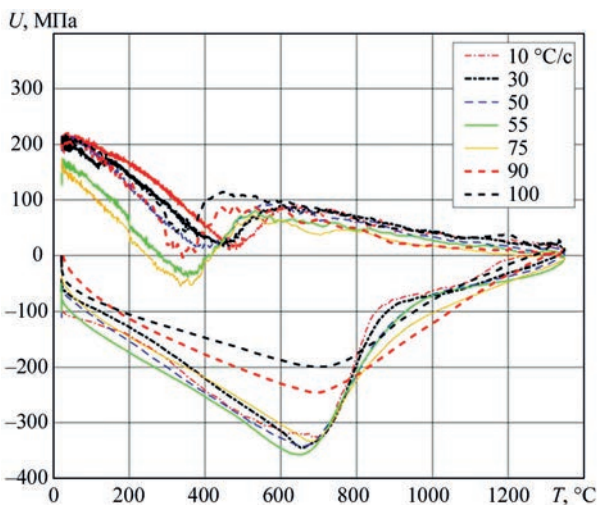


Рис. 7. WTSD діаграма для високоміцної низьколегованої сталі [12]

У реальних умовах процесу зварювання охолодження металу відбувається зі змінною швидкістю, яка залежить від тепловідведення, геометрії з'єднання, режиму зварювання та інших факторів. Лінійні режими не відображають цих особливостей, тому не дозволяють адекватно моделювати структурні перетворення в ЗТВ. Використання наближених до реальних нелінійних циклів забезпечує вищу достовірність результатів і дозволяє точніше відтворити умови формування мікроструктури у зварному з'єднанні.

Так, у [14] використання нелінійних термічних циклів для побудови ТКД обґрунтовується наявністю невідповідності та похибками діаграм, побудованих із використанням постійних швидкостей охолодження, та прагненням наблизити фізичне моделювання до реальних умов зварювання. У роботі представлено результати фізичного моделювання структури та фазових перетворень у зоні крупного зерна термічного впливу (CGHAZ) конструкційної сталі 700MC (C – 0,065 %; Mn – 1,82 %; Al – 0,025 %; Cu – 0,0115 %; Cr – 0,025 %; Ni – 0,037 %; V – 0,014 %; Nb – 0,053 %; Ti – 0,102 %) (рис. 8).

Модулювання виконувались на установці Gleeble 3800. Для моделювання CGHAZ обрано пікову температуру 1300 °C, що відповідає температурному полю поблизу зварного шва. Швидкість нагріву становила 100 °C/c, витримка при максимальній температурі 1 с. Було реалізовано 13 варіантів охолодження зі швидкістю від 1,25 до 100 °C/c. Цикли охолодження були нелінійними, з використанням моделі Рикаліна [15]. Ця модель також є аналітичною схемою теплопередачі, яка враховує розподіл температур у масивних зварних деталях з урахуванням геометрії, теплопровідності

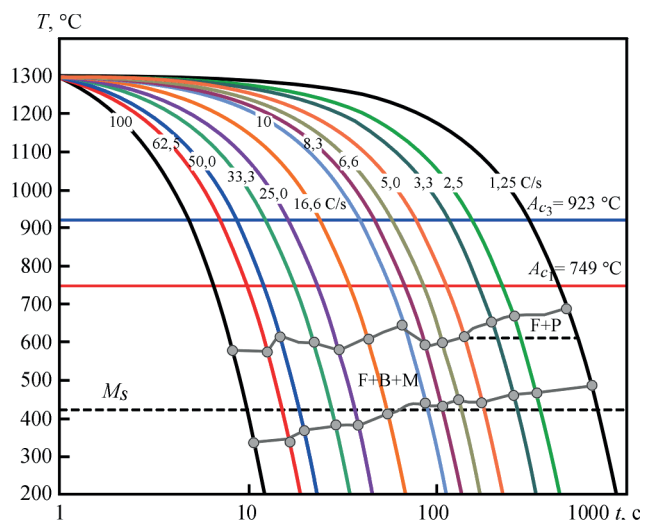


Рис. 8. CCT-діаграма для сталі 700MC. Мікроструктури: F – ферит; B – бейніт; P – перліт; M – мартенсит; M_s – початок мартенситного перетворення [14]

та щільності матеріалу. Її застосування обґрунтоване потребою точно імітувати неоднорідні теплові умови в товстостінних зварних конструкціях, де лінійні моделі дають суттєві похибки. Автори дійшли висновку, що точне фізичне моделювання CGHAZ з використанням нелінійних теплових циклів дозволяє обґрунтовано будувати ССТ-діаграми, специфічні саме для зварювання. Зокрема при оптимізації режимів зварювання для сталі 700МС варто уникати швидкостей охолодження понад 25 °С/с, щоб запобігти надмірному мартенситоутворенню, яке супроводжується підвищенням твердості та зниженням в'язкості металу зони термічного впливу.

Основною метою [16] було вивчення впливу характеру охолодження на структурно-фазовий склад металу ЗТВ сталі 15Х2НМФА, що використовується в корпусах реакторів ВВЕР-1000 при дуговому наплавленні. Автори прагнули зіставити теоретичні уявлення, засновані на стандартних термокінетичних діаграмах, з реальними умовами формування структури в процесі зварювання/наплавлення. Оскільки реальний процес наплавлення вирізняється нелінійним охолодженням, що значно відрізняється від лінійних циклів, було проведено як фізичне моделювання, максимально наближене до умов зварювання/наплавлення, так і ряд експериментів з використанням лінійних циклів охолодження. Автори прагнули перевірити, як ці реальні умови вплинуть на формування кінцевої мікроструктури. Для побудови класичних термокінетичних діаграм зразки сталі 15Х2НМФА нагрівалися до 1000 °С, витримувалися при цій температурі 170 хв, а потім охолоджувалися з різними постійними швидкостями (1, 3, 5 і 7 °С/с).

При моделюванні циклів, наближених до реальних умов зварювання, було проведено дві серії дослідів, у яких зразки нагрівалися до 1000 чи до 1350 °С. Потім зразки охолоджувалися зі швидкостями 3, 4 та 5 °С у діапазоні 800...500 °С для обох серій. Усі експериментальні роботи проводили на Gleeble 3800.

Ключовою відмінністю реальних циклів наплавлення від лінійних (для побудови ССТ-діаграм) є вкрай короткий час перебування металу при температурі аустенітизації (~ 1 с). При короткій витримці та подальшому охолодженні в умовах, наближених до наплавлення, у металі може утворюватися повністю мартенситна структура, тоді як при лінійному охолодженні при аналогічних швидкостях охолодження формується бейнітно-мартенситна структура.

Зміна максимальної температури нагріву (1000 проти 1350 °С) практично не впливала на кінетику утворення мартенситної фази та незначно впливала на температури початку/закінчення фазоутворення. Однак ця зміна впливала на максимальну частку фаз у кінцевій мікроструктурі, що вказує на важливість урахування пікової температури циклу.

Автори роботи переконливо показали, що характер охолодження – зокрема нелінійність і вкрай короткий час перебування при температурі аустенітизації – має вирішальне значення для формування структурно-фазового складу в ЗТВ сталі 15Х2НМФА. Використання стандартних ССТ-діаграм, побудованих на основі лінійних циклів охолодження з тривалою витримкою, не дозволяє адекватно прогнозувати мікроструктуру в умовах реального зварювального процесу. Для точного прогнозування необхідно застосовувати експериментально побудовані ССТ-діаграми, отримані в умовах, максимально наближених до фактичних термічних циклів наплавлення, враховуючи специфіку їх нелінійності та короткого часу аустенітизації.

Висновки

1. Термокінетичні діаграми (ССТ) є важливим інструментом для прогнозування структури у зоні термічного впливу зварних з'єднань. Їх побудова базується на дилатометричних експериментах з постійною швидкістю охолодження. Однак такий підхід лише частково відповідає реальним умовам зварювання.

2. Деформаційні термокінетичні діаграми (DCСТ) дозволяють враховувати вплив пластичної деформації, яка може істотно змінювати кінетику фазових перетворень, зокрема прискорювати формування перліту та бейніту, а також знижувати температуру мартенситного перетворення.

3. Урахування складних температурно-механічних впливів (залишкові напруження, реальні температурні градієнти тощо) дозволяє точніше прогнозувати можливий рівень залишкових напружень у залежності від швидкості охолодження матеріалу.

4. Нелінійні термічні цикли, які моделюють реальне охолодження під час зварювання, забезпечують точнішу відповідність фазових перетворень фактичним умовам зварювання. Їх використання дозволяє будувати більш релевантні діаграми та уникати похибок, притаманних лінійним моделям.

5. Фізичне моделювання на установках Gleeble залишається ключовим методом дослідження термічної поведінки сталей при зварюванні за умови правильної постановки експерименту

з урахуванням як температурних, так і деформаційних параметрів.

Список літератури/References

- Atkins, M. (1980) *Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels*. Rev. U.S. ed. Metals Park, Ohio: ASM International (American Society for Metals).
- Seyffarth, P., Meyer, B., Scharff, A. (1992) *Großer atlas schweiß-ZTU-Schaubilder*. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verl.
- Zhang, Z., Farrar, R. A. (1995) *An atlas of continuous cooling transformation (CCT) diagrams applicable to low carbon low alloy weld metals*. London: The Institute of Materials.
- Костін В.А., Жуков В.В. (2021) Удосконалення методики аналізу термкінетичних діаграм фазових перетворень металу зварних швів високоміцних низьколегованих сталей. *Сучасна електрометалургія*, 2, 40–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.02.06>
- Kostin, V.A., Zhukov, V.V. (2021) Improvement of the procedure of analysis of thermokinetic diagrams of phase transformations in metal of high-strength low-alloy steel welds. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 2, 40–46 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.02.06>
- ASTM A1033-18 (2023). *Standard practice for quantitative measurement and reporting of hypoeutectoid carbon and low-alloy steel phase transformations*. ASTM International, 2018, reapproved 2023. DOI: <https://doi.org/10.1520/A1033-18R23>
- Li, H., Liang, J.-L., Feng, Y.-L., Huo, D.-X. (2014) Microstructure transformation of X70 pipeline steel welding heat-affected zone. *Rare Metals*, 33(4), 493–498. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-014-0344-x>
- Vimalan, G., Muthupandi, V., Ravichandran, G. (2018) Construction of continuous cooling transformation (CCT) diagram using Gleeble for coarse grained heat affected zone of SA106 grade B steel. *AIP Conference Proceedings*, 1966, 020013. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5038692>
- Zheng, S., Wu, Q., Huang, Q., Liu, S., Han, Y. (2011) Influence of different cooling rates on the microstructure of the HAZ and welding CCT diagram of CLAM steel. *Fusion Engineering and Design*, 86, 2616–2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.02.072>
- Wu, Q.-s., Zheng, S.-h., Huang, Q.-y., Liu, S.-j., Han, Y.-y. (2013) Continuous cooling transformation behaviors of CLAM steel. *J. of Nuclear Materials*, 442, S67–S70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.03.072>
- Kawulok, R., Schindler, I., Kawulok, P., Rusz, S., Opéla, P., Malis, M., Vašek, Z., Subíková, M., Váňová, P. (2015) Effect of plastic deformation on CCT diagram of spring steel 51CrV4. *METAL 2015, Conference Proceedings*, 345–350.
- Ali, M., Kajjalainen, A., Hannula, J., Porter, D., Kömi, J. (2020) Influence of chromium content and prior deformation on the continuous cooling transformation diagram of low-carbon bainitic steels. *Key Engineering Materials*, 835, 58–67. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.835.58>
- Mishchenko, A., Scotti, A. (2021) Welding thermal stress diagrams as a means of assessing material proneness to residual stresses. *J. of Materials Sci.*, 56, 1694–1712. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05294-y>
- Rosenthal, D. (1946) The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. *Transact. of the American Society of Mechanical Engineers*, 68(8), 849–866. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4018624>
- Roshan, R., Naik, A.K., Saxena, K.K., Msomi, V. (2022) Physical simulation on joining of 700MC steel: A HAZ and CCT curve study. *Materials Research Express*, 9(4), 046522. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac6792>
- Rykalin, N.N. (1960) Calculation of heat processes in welding. In: *42nd Annual Meeting of the American Welding Society*, 64.
- Lobanov, L.M., Kostin, V.A., Makhnenko, O.V., Zhukov, V.V., Kostenevich, E.S. (2020) Forecasting of structural transformations in HAZ steel of 15Kh2NMFA at anti-corrosion cladding. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(126), 89–96. DOI: <http://dx.doi.org/10.46813/2020-126-089>

MODERN APPROACHES TO OBTAINING THERMOKINETIC TRANSFORMATION DIAGRAMS FOR WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES (Review)

V.V. Zhukov, V.A. Kostin, S.G. Grigorenko, R.S. Gubatyuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: zhukov.kyiv@gmail.com

The article presents a review of modern approaches to constructing CCT-diagrams and special diagrams formed on the basis of the results of a dilatometric experiment for the analysis of structural-phase transformations in steels during cooling. The methodology of physical modeling of thermal cycles on Gleeble installations, as well as typical heating and cooling parameters, is considered. Special attention is paid to the influence of the cooling rate on the formation of the microstructure in the heat-affected zone of welded joints. Approaches using constant and variable (nonlinear) cooling modes are compared with an emphasis on their compliance with the real welding conditions. The advantages of nonlinear thermal cycles for increasing the reliability of modeling and correctness of constructing the CCT-diagrams when assessing the weldability of steels are substantiated. 16 Ref., 8 Fig.

Keywords: physical modeling, phase transformations, microstructure, austenite, martensite, CCT and DCCT diagrams, Gleeble, welded joints

Отримано 09.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2025

Прийнято 15.01.2026

З

АВТОМАТИЧНЕ

ЗВАРЮВАННЯ

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

тел./факс: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГОДНІ

Передплата доступна
у друкованому
та цифровому форматах!

