

УДК 669.15-194.591

Г. А. Кононенко^{1,2}, д.т.н., ст. дослідник, ORCID 0000-0001-7446-4105

Т. В. Кімстач^{1,3}, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8993-201X

Р. В. Подольський¹, Ph. D., н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641

О. А. Сафронова¹, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-4032-4275

О. П. Клинова¹, провідний інженер

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

² Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

³ Український державний університет науки і технологій

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ БЕЙНІТНИХ СТАЛЕЙ

Анотація. Ціль роботи. Аналіз сучасного стану розробки високоміцних бейнітних сталей, вивчення механізмів формування бейнітної структури та її впливу на механічні властивості матеріалу. Визначення перспектив застосування сталей зі структурою бескарбідного бейніту в різних галузях промисловості. **Методика досліджень.** Аналіз літературних джерел, присвячених розробці та вдосконаленню бейнітних сталей. У процесі дослідження застосовуються методи огляду/порівняння/узагальнення даних, що дозволяють виявити основні тенденції та підходи у дослідженні механізмів формування бейнітних структур, їх вплив на властивості. Результати досліджень. У роботі здійснено аналіз наукових літературних джерел, присвячених вивченню особливостей бейнітного перетворення. Розглянуто перспективи розробки високоміцних бейнітних сталей, які характеризуються поєднанням високої міцності, пластичності та в'язкості. Проаналізовано сучасні підходи до отримання бейнітних структур, зокрема використання легування та термічної обробки, що дозволяють оптимізувати механічні властивості сталі. Розглянуто вплив легувальних елементів на кінетику формування бейніту, стабільність залишкового аустеніту і загальну структуру сталі. Виконано огляд сучасних тенденцій у розробці перспективних технологій термічної обробки високоміцних бейнітних сталей. **Практична значимість.** Наведено аналіз перспектив застосування бейнітних сталей у критично важливих галузях, таких як транспортне машинобудування, енергетика, будівництво і військова промисловість. Розглянуто напрями майбутніх досліджень, спрямованих на розширення сфер застосування та поліпшення експлуатаційних властивостей цих сталей, а також забезпечення їх конкурентоспроможності на ринку сучасних матеріалів.

Ключові слова: бескарбідний бейніт, аустеніт, механічні властивості,

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

легувальні елементи, термічна обробка.

Посилання для цитування: Перспективи розробки високоміцних бейнітних сталей / Г. А. Кононенко, Т. В. Кімстач, Р. В. Подольський, О. А. Сафронова, О. П. Клинова // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 602-620. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-602-620>.

Вступ. Завдання підвищення ефективності виробництва сучасних високоміцних сталей залишається актуальним. Його вирішення передбачає зниження витрат енергетичних та сировинних ресурсів, зокрема шляхом оптимізації хімічного складу та вдосконалення технології термічної обробки сталевого прокату.

Сучасні вимоги до матеріалів для різних галузей промисловості, зокрема транспорту, енергетики, будівництва, оборони та інш., обумовлюють необхідність розробки сталей з поєднанням високої міцності, пластичності та тріщиностійкості. Одним з перспективних напрямів виробництва відповідальних деталей та конструкцій є використання сталей бейнітного класу, які характеризуються підвищеним рівнем механічних та експлуатаційних властивостей, а також технологічністю у виготовленні [1, 2]. Сталі бейнітного класу знаходять все більш широке застосування у виробництві залізничних рейок, труб і листового прокату, а також елементів морських платформ. Це зумовлено їхніми перевагами у порівнянні з традиційними структурами мартенситу або ферито-перлітної суміші. Бейнітні сталі забезпечують однорідність механічних властивостей у перерізах товщиною до декількох десятків сантиметрів. При цьому рівень міцності таких сталей практично збігається з мартенситом, а пластичні властивості залишаються на рівні ферито-перлітних композицій. Використання сталей бейнітного класу дозволяє подолати обмеження, пов'язані з вичерпанням можливостей подальшого покращення експлуатаційних характеристик перлітних сталей.

Особливий інтерес викликає можливість отримання структури безкарбідного бейніту (БКБ), що являє собою двофазну ферито-аустенітну суміш, яка складається з α -фази та пересиченого вуглецем залишкового аустеніту. Інтерес до вивчення БКБ зумовлений тим, що сталі з такою структурою характеризуються поєднанням високої міцності та ударної в'язкості, підвищеною зносостійкістю, а також динамічною, статичною та циклічною тріщиностійкістю [3-5].

Високоміцні бейнітні сталі мають значний потенціал для розширення сфери застосування у високотехнологічних галузях, підвищенні надійності та довговічності технічних об'єктів, однак подальший розвиток процесів формування мікроструктури та оптимізації властивостей вимагає глибшого розуміння механізмів

утворення бейніту для забезпечення більш ефективного використання матеріалу в різних умовах експлуатації.

Мета роботи. Аналіз сучасного стану досліджень з питань розробки хімічного складу та режимів термічної обробки високоміцних бейнітних сталей, визначення основних тенденцій у розробці цих матеріалів і окреслення перспектив їх використання у різних галузях промисловості.

Методика досліджень. Аналіз літературних джерел, присвячених розробці та вдосконаленню бейнітних сталей. У процесі дослідження застосовуються методи огляду/порівняння/узагальнення даних, що дозволяють виявити основні тенденції та підходи у дослідженні механізмів формування бейнітних структур, їх вплив на властивості сталі.

Результати дослідження. Інтенсивний розвиток промисловості супроводжується підвищенням експлуатаційних навантажень і ускладненням умов роботи елементів конструкцій та виробів. Ці фактори диктують необхідність пошуку нових підходів до вдосконалення фізико-механічних властивостей матеріалів. У цьому контексті особливу актуальність набуває розробка та оптимізація бейнітних сталей, які завдяки своїм унікальним структурно-фазовим характеристикам забезпечують високу міцність, ударну в'язкість та зносостійкість навіть за екстремальних умов експлуатації.

Використання високоміцних економнолегованих бейнітних сталей розширює можливості проектування конструкцій, що працюють у складних експлуатаційних середовищах, забезпечуючи їх підвищену надійність та довговічність.

Еволюція розвитку сталей для автомобілебудування, від звичайних сталей високої міцності (HSS) до сучасних поколінь сталей для автомобілебудування (AHSS), представлено на рис. 1 [6, 7, 8]. На графіку (див. рис. 1) надана залежність між границею міцності на розтягнення та відносним подовженням для різних класів сталей.

За даними, наведеними на рис. 1, сталі зі структурою безкарбідного бейніту (CFB-сталі) мають унікальне поєднання високої міцності та пластичності. Згідно з графічними даними, границя міцності цих сталей знаходиться в діапазоні від 1300 до 1700 МПа, а відносне подовження в межах 10...25%. CFB-сталі відносяться до сталей третього покоління AHSS (Advanced High Strength Steels). Низьке значення відношення границі плинності до границі міцності (σ_T/σ_B) у діапазоні 0,5...0,6 забезпечує добру штампованість цих сталей, а ефективне зміцнення під час деформації гарантує високу міцність готових виробів [9]. Перспективи подальшого вдосконалення бейнітних сталей полягають у досягненні ще більшої міцності та пластичності шляхом оптимізації

хімічного складу, технології виплавки, обробки тиском та термічної обробки. Це дозволить створити матеріали з покращеними характеристиками для широкого спектру застосувань.

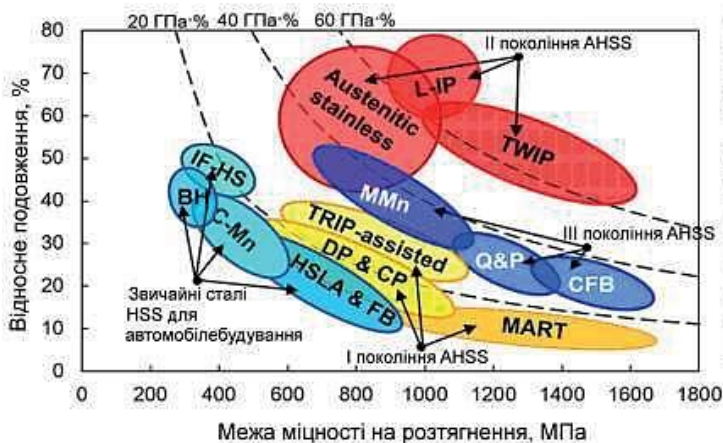


Рисунок 1 – Співвідношення «міцність-пластичність» для різних марок АНСС сталей, що використовуються для автомобілебудування: HSLA – високоміцні низьколеговані; FB – ферито-бейнітні; C-Mn – низьковуглецеві марганцевисті; BH – bake-hardening (зміцнюються під час сушки фарби); IF-HS – низьковуглецеві феритні; TRIP – низьколеговані TRIP-assisted; DP – двофазні; MART – мартенситні; Q&P – сталі, що піддаються Q&P обробці; MMn – TRIP-сталі з середнім вмістом марганцю; CP – комплексно-фазні; CFB – безкарбідні бейнітні; L-IP – легкі з наведеною пластичністю; TWIP – високолеговані TWIP-сталі; Austenitic stainless – аустенітні корозійностійкі сталі [6, 7, 8]

З часу відкриття Давенпортом і Бейном бейнітної структури [10] інтерес до дослідження проміжного перетворення не зникає, а з кожним роком тільки ще більше зростає [11- 15].

Останніми роками зібрано значний обсяг даних щодо проміжного перетворення переохолодженого аустеніту [3, 16, 17] та характеристик бейніту у конструкційних сталях [18, 19]. Структура бейніту є складною за своєю природою і може суттєво змінювати морфологію залежно від вмісту вуглецю, легуючих елементів та умов охолодження. За температурою утворення морфологічно розрізняють верхній і нижній бейніт.

Бейнітне перетворення відбувається при проміжних температурах, де дифузія атомів заліза та легуючих елементів практично відсутня, однак спостерігається інтенсивна дифузія вуглецю. Це зумовлює

формування різноманітних морфологічних форм фаз і отримання фаз із різним хімічним складом, що відрізняються вмістом вуглецю. Рівень перерозподілу вуглецю суттєво впливає на структурні особливості й механічні властивості сталі після завершення бейнітного перетворення. Легуючі елементи змінюють кінетику процесу, впливаючи на температуру початку і завершення перетворення, а також на стабільність отриманих фаз.

Серед різноманітних морфологічних форм бейніту значний інтерес представляє структура дрібнодисперсного бейнітного фериту без виділення карбідів цементитного типу у поєднанні зі стабільним залишковим аустенітом (безкарбідний бейніт), що обумовлено тим, що цементитні включення є концентраторами напружень і сприяють зародженню та розвитку тріщини.

У табл. 1 надані основні відмінності безкарбідного бейніту в порівнянні з класичним бейнітом.

Таблиця 1 – Основні відмінності безкарбідного бейніту в порівнянні з класичним бейнітом [3, 18, 19]

Параметр	Класичний бейніт	Безкарбідний бейніт
Виділення карбідів	Карбіди присутні	Відсутні (вуглець дифундує в аустеніт)
Міцність	Висока	Дуже висока
Пластичність	Середня	Висока (за рахунок залишкового аустеніту)
Утворення	Дифузія вуглецю та утворення карбідів	Придушення карбідоутворення через легування

Безкарбідним може бути як верхній, так і нижній бейніт. Найбільш перспективною структурою вважається нижній безкарбідний бейніт (НБКБ) [3, 19, 20]. Згідно з дослідженнями Юрченко А.Н. (2016), структура верхнього бейніту характеризується грубішою морфологією, яка погіршує властивості сталі. У той час нижній бейніт, завдяки більш тонкодисперсній структурі, сприяє покращенню механічних характеристик матеріалу. Основні відмінності мікроструктури нижнього (НБКБ) та верхнього безкарбідного бейніту (ВБКБ) пояснюються умовами їх формування та морфологічними особливостями. На рис. 2 наведено приклад структури нижнього та верхнього безкарбідного бейніту (за даними досліджень Симонова Ю.Н. (2015)).

Структура НБКБ (рис. 2, а) складається з тонких, упорядкованих пластин бейнітного фериту та залишкового аустеніту, згрупованих у пакети. Пластинчаста структура сприяє кращому розподілу напружень

у матеріалі, що покращує механічні властивості. Така структура характеризується високою щільністю пакетів і тоншими пластинами, що забезпечує більш рівномірну мікроструктуру. По морфології верхній безкарбідний бейніт (ВБКБ) (рис. 2, б) істотно відрізняється від НБКБ: містить області неправильної форми з кутовими, нерівними границями, має грубіший характер структури, з меншою впорядкованістю, товщина пластин бейнітного фериту та залишкового аустеніту більша, що може призводити до зниження механічних характеристик.

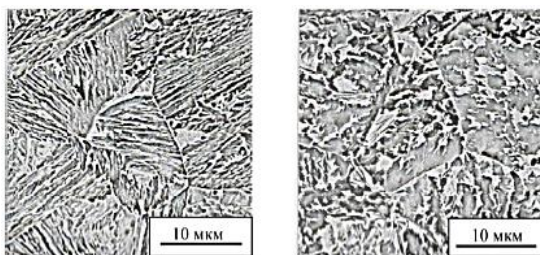


Рисунок 2 – Мікроструктура НБКБ (а) та ВБКБ (б) у сталі 25ХНЗМФС (Симонов Ю.Н. (2015))

На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що основними шляхами отримання в сталях структури НБКБ є:

- оптимізація/розробка хімічного складу;
- удосконалення/розробка раціонального режиму термічної обробки.

Отримання безкарбідного бейніту можливе в сталях та сплавах з різним вмістом вуглецю та легувальних елементів [3, 13, 21-24]. Метою легування є пригнічення виділення цементиту з аустеніту і зниження температури початку мартенситного перетворення нижче 250 °С [6].

Для формування структури безкарбідного бейніту більшість сучасних високоміцних бейнітних сталей легують кремнієм або алюмінієм у кількості 1–2% [25, 26], які є основними легувальними елементами, що пригнічують виділення цементитних часток [9, 27].

Кремній має низьку розчинність у цементиті, що суттєво уповільнює процес його утворення в бейнітній структурі [28, 29] і є ключовим фактором формування безкарбідного бейніту. Окрім цього, кремній значно підвищує активність вуглецю у фериті та аустеніті, знижуючи його розчинність у фериті, що сприяє перерозподілу вуглецю в аустеніті, стабілізуючи його структуру та запобігаючи утворенню карбідів. При температурах бейнітної витримки кремній характеризується низькою дифузійною здатністю на значні відстані [28]. Як наслідок, локальне накопичення кремнію поблизу зародків

цементиту може суттєво підвищувати активність вуглецю та збільшувати вільну енергію системи, що запобігає дифузії вуглецю до зародків цементиту [29]. За даними роботи [30], введення 1,5% Si підвищує границю плинності аустеніту на 7%.

Однак, легування великою кількістю кремнію може призвести до утворення марганце-кремнієвих оксидів, які утворюють міцні плівки на поверхні металу в процесі гарячої прокатки [31]. Це ускладнює нанесення антикорозійних покриттів, таких як цинк, у процесі гарячого цинкування. Коли вміст кремнію перевищує 0,5%, оксидні плівки стають занадто щільними та міцними, що ускладнює адгезію цинку, викликаючи появу оголених ділянок на поверхні металу. Це негативно впливає на антикорозійні властивості сталі, оскільки такі ділянки залишаються без захисту від доквілля [32, 33].

Алюміній, як і кремній, не розчиняється в цементиті та є потужним стабілізатором фериту, збільшує час утворення карбідів і знижує термодинамічну стабільність цементиту [23]. На відміну від кремнію, алюміній не перешкоджає нанесенню гальванічних покриттів за умови вмісту до 1,5% [34]. Легування сталі великою кількістю алюмінію сприяє більшому насиченню залишкового аустеніту вуглецем [31]. Недоліками використання алюмінію є низька ступінь твердорозчинного зміцнення [35] та значне підвищення температури початку мартенситного перетворення [32].

Для підвищення прогартовуваності та збільшення кількості залишкового аустеніту бейнітні сталі легують марганцем [36]. Однак, слід враховувати, що збільшення його кількості в бейнітних сталях понад 2,5% призводить до смугастої структури та надмірної стабілізації залишкового аустеніту [9, 37]. Вміст марганцю понад 2% ускладнює нанесення цинкового покриття навіть за відсутності кремнію [9, 33].

Крім кремнію, алюмінію та марганцю, які є недефіцитними елементами [38-42], перспективним є мікролегування елементами V, Ti, Nb, Ca та Cu, легування бором, обмеження вмісту шкідливих домішок.

Ванадій помітно впливає на структуру і властивості безкарбідного бейніту в сталях, в основному завдяки своїй здатності утворювати карбонітриди, які ефективно пригнічують зростання зерен аустеніту і перешкоджають виділенню карбідів цементитного типу.

Титан (Ti) має високу схильність до утворення карбідних фаз, які ефективно зв'язують вуглець у сталі. Це знижує концентрацію вуглецю в аустенітній матриці, що ускладнює утворення карбідів у бейнітній фазі. Результатом є утворення безкарбідного бейніту з покращеними механічними властивостями. Дрібнодисперсні карбіди титану сприяють покращенню міцності сталі завдяки зміцненню матриці.

Ніобій (Nb) є одним з основних елементів, що стримують зростання аустенітного зерна при високотемпературних нагріваннях та пригнічують процеси рекристалізації деформованого аустеніту.

Кальцій (Ca) сприяє підвищенню опору руйнуванню. Окрім того, модифікування Ca знижує ліквідацію шкідливих домішок і подрібнює дендритну структуру сталі у литому стані, поліпшує форму неметалевих включень.

Мідь (Cu) підвищує стійкість аустеніту, збільшує прогартовуваність та загартовуваність сталі, а також покращує корозійну стійкість сталей у різних середовищах. Найбільш ефективним є використання Cu разом із бором (B). Присадка до 0,5% Cu в мікролеговану сталь з вмістом бору до 0,003% дозволяє підвищити розчинність бору в аустеніті та запобігти виділенню крихкої боровмісної фази на границях аустенітних зерен. Крім того, Cu уповільнює зростання частинок вторинної фази, тому доцільно вводити Cu в товстолистову сталь, яка піддається неодноразовим технологічним нагріванням з повільним охолодженням. [42].

Легування *бором* (0,002-0,005 %) забезпечує підвищення рівня міцності і твердості, а також підвищення прогартовуваності сталі

Зниження вмісту шкідливих домішок, таких як *сірка* та *фосфор*, є необхідним, оскільки ці елементи знижують пластичність сталі та можуть сприяти виникненню відпускнуї крихкості.

Для отримання необхідного рівня механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей важливим є грамотний вибір параметрів технології термічної обробки. Аналіз літературних джерел показав, що для сталей певного хімічного складу отримання безкарбідного бейніту можливе в результаті ізотермічного гартування, безперервного охолодження як на повітрі так і з піччю.

Класичним варіантом термічної обробки на структуру безкарбідного бейніту є ізотермічне загартування [6], яке здійснюють у два етапи. На першому етапі проводять повну аустенітизацію для отримання гомогенної аустенітної структури. На другому етапі реалізують низькотемпературну ізотермічну витримку трохи вище точки Mn в діапазоні 125...300 °C [6, 16]. Мікроструктура сталей після термічної обробки характеризується наявністю нанометрових пластин бейнітного фериту товщиною 20...60 нм у яких відсутні карбідні включення та нанорозмірних ділянок аустеніту. Аустеніт розташований між пластинами α -фази у вигляді тонких плівкових прошарків, або у вигляді компактних «острівців в стиках феритних пакетів. [6]. Така структура забезпечує сталі високу міцність ($\sigma_v = 2400...2600$ МПа) при задовільному подовженні 7...10% [6].

Зменшення температури ізотермічної витримки призводить до

зменшення розмірів структурних компонентів бейнітної фази, що сприяє підвищенню міцності сталі. Товщина пластин бейнітного фериту залежить від міцності аустеніту при температурі перетворення та величини виграшу вільної хімічної енергії, що виникає під час фазового переходу [6, 43]. Із пониженням температури ці чинники зростають. Міцніший аустеніт чинить опір руху міжфазних границь, а велика рушійна сила процесу сприяє інтенсивнішому утворенню зародків нової фази через зменшення критичного розміру зародка. У результаті цього феритні пластини стають тоншими [6].

Суттєвим недоліком даної технології термічної обробки є значна тривалість ізотермічної витримки для завершення бейнітного перетворення, яка може сягати десятків годин. Це пояснюється низькою дифузійною рухливістю атомів вуглецю за температурних умов витримки [44].

В останні роки науковці спрямовують зусилля на отримання структури НБКБ у заготовках перерізу до 50...100 мм при безперервному охолодженні [45]. У роботі Симонова Ю.Н. (2015) зазначено, що необхідними для цього умовами є:

- висока стійкість переохолодженого аустеніту в області перлітного та бейнітного перетворення, при цьому стійкість у бейнітній області повинна бути меншою, ніж у перлітній, щоб перлітне перетворення «не закривало» бейнітне перетворення;
- температура початку бейнітного перетворення не повинна перевищувати 400°C, щоб виключити появу верхнього бейніту, температура початку мартенситного перетворення не нижче 200°C.

В дослідженнях Симонова Ю.Н. (2016) показано можливість отримання структури НБКБ при уповільненому безперервному охолодженні з температури аустенітизації заготовок перетином від 50 до 400 мм у сплавах 25X3ГЗМФС2 та 45X3ГЗМФС2.

Окрему увагу заслуговує термічна обробка за режимом, що передбачає безперервне охолодження як на повітрі, так і в печі з інтервалу міжкритичних температур (МКІТ) [27, 46]. Такий підхід дозволяє отримати структуру, яка, окрім безкарбідного бейніту, містить рівномірно розподілену феритну складову. Поєднання безкарбідного бейніту, фериту та достатньої кількості залишкового аустеніту може позитивно впливати на показники тріщиностійкості [47].

На підставі викладеного, можна зробити висновок, що сталі зі структурою БКБ мають значний потенціал для використання у критично важливих галузях, таких як транспортне машинобудування, енергетика, будівництво та військова промисловість. Унікальне поєднання високої міцності, достатньої пластичності, зносостійкості та опору до тривалих навантажень робить ці матеріали перспективними

для виготовлення деталей, які працюють в умовах високих механічних та теплових навантажень. У транспортному машинобудуванні бейнітні сталі можуть застосовуватись для виготовлення елементів кузовів, рам та шасі, де потрібна підвищена безпека і зниження ваги конструкції. Крім того, вони є придатними для виробництва залізничних рейок, які потребують високої зносостійкості та тріщиностійкості під час експлуатації в екстремальних умовах. У сфері енергетики вони є перспективними для виготовлення турбін, трубопроводів та енергетичного обладнання, здатного працювати в агресивних середовищах. У будівництві ці сталі можуть використовуватись для несучих конструкцій, мостів та інших об'єктів, які потребують високої міцності та довговічності. Військова промисловість знаходить у бейнітних сталях матеріал для броньованих корпусів, бронепластин та інших захисних елементів.

В якості перспективних напрямів подальших досліджень можливості підвищення властивостей високоміцних економнолегованих сталей зі структурою безкарбідного бейніту можна виділити наступні:

- оптимізація/розробка хімічного складу з метою досягнення раціонального співвідношення міцності, пластичності та ударної в'язкості;
- розробка економічно ефективних технологій виробництва, які дозволять знизити вартість цих сталей без втрати їхніх характеристик;
- проведення досліджень, спрямованих на підвищення зносостійкості та тріщиностійкості, особливо для застосувань у складних умовах;
- моделювання та прогнозування поведінки бейнітних сталей за різних режимів навантаження для створення матеріалів із заданими характеристиками.

Детальніше розуміння цих процесів дозволить розкрити нові можливості для створення матеріалів із покращеними характеристиками, що забезпечить їхнє широке застосування у різних галузях промисловості.

Висновки

1. Показано, що сталі зі структурою безкарбідного бейніту характеризуються унікальним поєднанням високої міцності, пластичності та ударної в'язкості, що робить їх перспективними для використання у відповідальних конструкціях, які працюють в умовах високих навантажень та агресивних середовищ.

2. Вказано, що легування кремнієм, алюмінієм та іншими елементами може забезпечити пригнічення утворення цементиту та

стабілізацію залишкового аустеніту, що дозволяє покращити механічні властивості сталі. Застосування таких підходів сприяє створенню матеріалів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю.

3. Розглянута доцільність використання сучасних технологій термічної обробки, таких як ізотермічне загартування та контрольоване охолодження, що дозволяють отримати наноструктуровану бейнітну фазу без карбідних включень. Це забезпечує сталі покращені експлуатаційні характеристики навіть у складних умовах.

4. Зазначено, що застосування безкарбідних бейнітних сталей у транспортному машинобудуванні, енергетиці, будівництві та військовій промисловості дозволяє підвищити надійність, довговічність і знизити експлуатаційні витрати на технічні об'єкти.

5. Визначені основні напрямки подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію хімічного складу, розробку економічно ефективних технологій виробництва та підвищення тріщиностійкості сталей. Це дозволить розширити сфери їхнього застосування та забезпечити конкурентоспроможність на ринку сучасних матеріалів.

Перелік посилань

1. Hofer C., Leitner H., Winkenhofer F., Clemens H., Primig S. Structural characterization of "carbide-free" bainite in a Fe-0.2C-1.5Si-2.5Mn steel *Materials Characterization*. 2015. Vol. 102. P. 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.020>.

2. Hell J. C., Dehmas M., Allain S. & Prado J. M. Microstructure – Properties Relationships in Carbide-free Bainitic Steels. *ISIJ international*. 2011. Vol. 51, No. 10. P. 1724-1732. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1724>.

3. Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H. Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8, No. 3-4. P. 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.005>.

4. Garcia-Mateo C., Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H. Mechanical Properties of Low-Temperature Bainite. *Materials Science Forum*. 2005. Vol. 500. P. 495-502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.500-501.495>.

5. Soliman M., Mostafa H., El-Sabbah A. S., Palkovski H. (2010). Low temperature bainite in steel with 0.26 wt%. *C Mater. Sci. Eng. A*. 2010. Vol. 527. P. 7706-7713. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.037>.

6. Kussa R. O., Voloshyn V. S., Zurnadzy V. I., Yefremenko V. H., Zaichuk N. P., Tkachev R. O., Havrylova V. H., Dzherenova A. V. (2021) Tekhnolohii termichnoi obrobky vysokomitsnykh AHSS- tretoho pokolinnia. *Mizhvuzivskiyi zbirnyk "NAUKOVI NOTATKY"*. 2021. Vol. 71. P. 181-190. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.26>.

7. Soleimani M., Kalhor A., Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: a review. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 795, 140023. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140023>.

8. Zurnadzy V., Efremenko V., Petryshynets I., Chabak Y., Efremenko A. Improvement of mechanical properties of structural steels by multi-phase structure

formation. Premier Publishing s.r.o., 2020. <https://ppublishing.org/media/uploads/journals/monograph/Efremenko.pdf>.

9. Zurnadzy V. I., Voloshyn V. S., Kussa R. O., Yefremenko V. H., Dzherenova A. V., Tsvetkova O. V. Современные конструкционные стали с TRIP-эффектом. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*. 2020. Vol. 5. P. 80-92. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2020_5_9

10. Davenport E., Bain E. *Trans. AIME*. 1930. Vol. 90. No. 1. P. 117–154.

11. Goulas C., Mecozzi M. G., Sietsma J. Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. P. 3077–3087. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3418-6>.

12. Slama M. B. H., Gey N., Germain L., Hell J. C., Zhu K., Allain S. Fast granularization of lath-like bainite in FeNiC alloys during isothermal holding at Ms+20 K (+20 °C). *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. P. 15–18. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3209-5>

13. Morales-Rivas L. Viewpoints on Technological Aspects of Advanced High-Strength Bainitic Steels. *Metals*. 2022. Vol. 12, 195. <https://doi.org/10.3390/met12020195>.

14. Sandvik B. P. V. The bainite reaction in Fe–Si–C alloys: the primary stage. *Met. Trans. A*. 1982. Vol. 3. No. 5. P. 777–787. <https://doi.org/10.1007/bf02642392>.

15. Fang H.-S., Yang J.-B., Yang Z.-G., Bai B.-Z. The mechanism of bainite transformation in steels. *Scripta Materialia*. 2002. Vol. 47. No. 3. P. 157-162. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00122-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00122-7).

16. Bhadeshia H. K. D H. *Bainite in Steels. Theory and Practice*. CRC Press, 2015. 616 p.

17. Kumar A., Blessto B., Singh A. Development of a low-carbon carbide-free nanostructured bainitic steel with extremely high strength and toughness. *Materials Science and Engineering: A*, 2023. Vol. 887, 145186. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145186>.

18. Garcia-Mateo C., Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H. Development of Hard Bainite. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. No. 8. P. 238–243. <http://surl.li/aouerw>

19. Caballero F., Miller M., Babu S., Garciamateo C. Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. No. 1. P. 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033>.

20. Yang H.-S., Bhadeshia H. K. D. H. Designing low carbon, low temperature bainite. *Materials Science and Technology*. 2008. Vol. 24. No. 3. P. 335-342. <https://doi.org/10.1179/174328408X275982>.

21. Soliman M., Mostafa H., El-Sabbagh A. S., Palkowski H. Low temperature bainite in steel with 0.26 wt% C. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527. No. 29–30. P. 7706-7713. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.037>.

22. Bojarski Z., Bold T. Structure and properties of carbide-free bainite. *Structure et propriétés d'une bainite sans carbure*. *Struktur und eigenschaft karbidfreier Bainite. Acta Metallurgica*. 1974. Vol. 22. No. 10. P. 1223-1234. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(74\)90136-9](https://doi.org/10.1016/0001-6160(74)90136-9).

23. Bhattacharya T., Singh S. B., Das S., Haldar A., Bhattacharjee D. Development and characterisation of C–Mn–Al–Si–Nb TRIP aided steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, No. 6. P. 2394–2400. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.054>.

24. Rana R., Cordova-Tapia E., Jimenez J. A., Morales-Rivas L., Garcia-Mateo C. Design of carbide free bainitic steels for hot rolling practices. *Philosophical Magazine Letters*. 2024. Vol. 4. No. 1.

25. Bleck W., Guo X., Ma Y. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*. 2017. Vol. 88. No. 10. P. 1–10. <https://doi.org/10.1002/srin.201700218>.

26. Navarro-Lopez A., Sietsma J., Santofimia M. J. Effect of prior athermal martensite on the isothermal transformation kinetics below Ms in a low-C High-Si steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. P. 1028–1039. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3285-6>.

27. Yi H. L. Chen P., Bhadeshia, H. K. D. H. Optimizing the morphology and stability of retained austenite in a δ -TRIP steel. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2014. Vol. 45. No. (8). P. 3512–3518. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2267-4>.

28. Caballero F. G., Miller M. K., Babu S. S., Garcia-Mateo C. Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. No. 1. P. 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033>.

29. Bhadeshia H. K. D. H., Edmonds D. V. The bainite transformation in a silicon steel. *Metall Trans A*. 1979. Vol. 10. No. 7. P. 895–907. <https://doi.org/10.1007/BF02658309>.

30. Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H., Mawella K. J. A., Jones D. G., Brown P. Very strong low temperature bainite. *Material Science and Technology*. 2002. Vol. 18. P. 279–284. <https://doi.org/10.1179/026708301225000725>.

31. Mahieu J., De Cooman B. C., Maki J. Phase transformation and mechanical properties of Si-free CMnAl transformation-induced plasticity-aided steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002. Vol. 33, No. 8. P. 2537–2580. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0378-9>.

32. Mahieu J., Claessens S., De Cooman B. C. Galvanizability of highstrength steels for automotive applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. No. 11. P. 2905–2907. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-1042-5>.

33. Mintz B. Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels. *International Materials Reviews*. 2001. Vol. 46. No. 4. P. 169–197. <https://doi.org/10.1179/095066001771048754>.

34. Maki J., Mahieu J., De Cooman B. C., Claessens S. Galvanisability of silicon free CMnAl TRIP steels. *Materials science and technology*. 2003. Vol. 19. No. (1). P. 125–131. <https://doi.org/10.1179/026708303225009300>.

35. Jacques P. J., Girault E., Mertens A., Verlinden B., Humbeeck J. V., Delannay F. The developments of coldrolled TRIP-assisted multiphase steels Al-alloyed TRIP-assisted multi-phase steels. *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. No. 9. P. 1068–1074. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1068>.

36. De Cooman B. C. Structure–properties relationship in TRIP steels containing

carbide-free bainite. *Current Opin-ion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8. No. 3-4. P. 285–303. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.002>.

37. Kim S. J., Lee C. G., Choi I., Lee S. Effects of heat treatment and alloying elements on the microstructure and mechanical properties of 0.15 wt pct C transformation-induced plasticity-aided cold rolled steel sheet. *Metal-lurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. No. 3. P. 505–514. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0067-0>.

38. Santigopal S., Sourav D., Debalay C., Indradev S., Shiv Brat S., Arunansu H. Development of multiphase microstructure with bainite, martensite and retained austenite in a co-containing steel through quenching and parti-tioning (Q&P) treatment. *Metallurgical and materials transactions A*. 2013. Vol. 44. No. 13. P. 5653-5664. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1929-y>.

39. Timokhina I., Beladi H., Xiong X.-Y. & Hodgson P.D. On the low temperature strain aging of bainite in the TRIP steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013. Vol. 44. No. 11. P. 5177–5191. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1864-y>.

40. Huang B. M., Yang J. R., Yen H. W., Hsu C. H., Huang C. Y., Mohrbacher H. Secondary hardened bainite. *Materials Science and Technology*, 2014. Vol. 30. No. 9. P. 1014–1023. <https://doi.org/10.1179/1743284714y.0000000536>.

41. Liang Z., Li H., Chen C., Fu H., Feng X., Gao X., Yang Z., Zhang F. Introducing nano-VC precipitates makes ultrafine bainitic steel a better combination of strength, ductility, and toughness. *Materials Research Letters*, 2024. Vol. 12. No. 10. P. 756–763. <https://doi.org/10.1080/21663831.2024.2386439>.

42. Кононенко Г. А., Кімстач Т. В., Сафронова О. А., Подольський Р. В. Шляхи підвищення стійкості та живучості листового прокату із броньової сталі. (Огляд). *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 447-464. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-447-464>.

43. Singh S. B., Bhadeshia H. K. D. H. Estimation of bainite plate-thickness in low-alloy steels. *Materials Science and Engineering: A*. 1998. Vol. 245. No. 1. P. 72-79. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00701-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00701-6).

44. Hesse O., Liefieith J., Kunert M., Kapustyan A., Brykov M., Efremenko, V. Bainit in Stählen mit hohem Widerstand gegen Abrasivverschleiß (Bainite in Steels with High Resistance to Abrasive Wear). *Tribologie und Schmierungstechnik*. 2016. Vol. 63. No. 2. P. 5–13. <http://surl.li/gubkxo>

45. Goulas C., Mecozzi M. G., Sietsma J. Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2016. Vol. 47. No. 6. P. 3077–3087. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3418-6>.

46. Mohanty R. R., Girina O. A., Fonstein N. M. Effect of heating rate on the austenite formation in low-carbon high-strength steels annealed in the intercritical region. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2011. Vol. 42. No. 12. P. 3680-3690. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0753-5>.

47. Kang Jian, Wang Chao, Li Yunjie, Yuan Guo, Wang Guodong. Effect of direct quenching and partitioning treatment on mechanical properties of a hot rolled strip steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*. 2016. Vol. 31. No. 1. P. 178-185. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11595-016-1349-0>.

References

1. Hofer, C., Leitner, H., Winkelhofer F., Clemens H. & Primig S. (2015). Structural characterization of "carbide-free" bainite in a Fe-0.2C-1.5Si-2.5Mn steel *Materials Characterization*, 102, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.020>
2. Hell, J. C., Dehmas, M., Allain, S. & Prado, J. M. (2011). Microstructure – Properties Relationships in Carbide-free Bainitic Steels. *ISIJ international*, 51(10), 1724-1732. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1724>
3. Caballero, F. G. Bhadeshia, H. K. D. H. (2004). Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3-4), 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.005>
4. Garcia-Mateo, C., Caballero, F. G. & Bhadeshia, H. K. D. H. (2005). Mechanical Properties of Low-Temperature Bainite. *Materials Science Forum*, 500, 495-502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.500-501.495>
5. Soliman, M., Mostafa, H., El-Sabbah, A. S. & Palkovski, H. (2010). Low temperature bainite in steel with 0.26 wt%. *C Mater. Sci. Eng. A*, 527, 7706-7713. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.037>
6. Kussa, R. O., Voloshyn, V. S., Zurnadzhy, V. I., Yefremenko, V. H., Zaichuk, N. P., Tkachev, R. O., Havrylova, V. H. & Dzherenova A. V. (2021) Tekhnolohii termichnoi obrobky vysokomitsnykh AHSS- tretoho pokolinnia. *Mizhvuzivskiyi zbirnyk "NAUKOVI NOTATKY"*, 71. 181-190. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.26>
7. Soleimani, M., Kalthor, A. & Mirzadeh, H. (2020). Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 795. 140023. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140023>
8. Zurnadzhy, V., Efremenko, V., Petryshynets, I., Chabak, Y., & Efremenko, A. (2022). Improvement of mechanical properties of structural steels by multi-phase structure formation. *Premier Publishing s.r.o.* <https://ppublishing.org/media/uploads/journals/monograph/Efremenko.pdf>
9. Zurnadzhy, V. I., Voloshyn, V. S., Kussa, R. O., Yefremenko, V. H., Dzherenova, A. V. & Tsvetkova, O. V (2020). Sovremennyye konstruktsyonnyye staly s TRIP-effektom. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*. 5, 80-92. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2020_5_9
10. Davenport, E. & Bain, E. (1930). *Trans. AIME*, 90(1), 117–154
11. Goulas, C., Mecozzi, M. G. & Sietsma, J. (2016). Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 3077–3087. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3418-6>
12. Slama, M. B. H., Gey, N., Germain, L., Hell, J. C., Zhu, K. & Allain, S. (2016). Fast granularization of lath-like bainite in FeNiC alloys during isothermal holding at Ms+ 20 K (+20 °C). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 15–18. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3209-5>
13. Morales-Rivas, L. (2022). Viewpoints on Technological Aspects of Advanced High-Strength Bainitic Steels. *Metals*, 12, 195. <https://doi.org/10.3390/met12020195>

14. Sandvik, B. P. V. (1982). The bainite reaction in Fe–Si–C alloys: the primary stage. *Met. Trans. A*, 3(5), 777–787. <https://doi.org/10.1007/bf02642392>
15. Fang, H.-S., Yang J.-B., Yang, Z.-G. & Bai, B.-Z. (2002). The mechanism of bainite transformation in steels. *Scripta Materialia*, 47(3), 157-162. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00122-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00122-7)
16. Bhadeshia, H. K. D H. (2015). *Bainite in Steels. Theory and Practice*. CRC Press
17. Kumar, A., Blessto, B., & Singh, A. (2023). Development of a low-carbon carbide-free nanostructured bainitic steel with extremely high strength and toughness. *Materials Science and Engineering: A*, 887, 145186. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145186>
18. Garcia-Mateo, C., Caballero, F. G. & Bhadeshia, H. K. D. H. (2003). Development of Hard Bainite. *ISIJ International*, 43(8), 238–1243. <https://surl.li/auerw>
19. Caballero, F., Miller, M., Babu, S., & Garciamateo, C. (2007). Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*, 55(1), 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033>
20. Yang, H.-S., Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Designing low carbon, low temperature bainite. *Materials Science and Technology*, 24(3), 335-342. <https://doi.org/10.1179/174328408X275982>
21. Soliman, M., Mostafa, H., El-Sabbagh, A. S. & Palkowski, H. Low temperature bainite in steel with 0.26 wt% C. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29–30), 7706-7713. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.037>
22. Bojarski, Z. & Bold T. (1974). Structure and properties of carbide-free bainite. Structure et propriétés d'une bainite sans carbure. Struktur und eigenschaft karbidfreier Bainite. *Acta Metallurgica*, 22(10), 1223-1234. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(74\)90136-9](https://doi.org/10.1016/0001-6160(74)90136-9).
23. Bhattacharyya, T., Singh, S. B., Das, S., Halder, A. & Bhattacharjee, D. (2011). Development and characterisation of C–Mn–Al–Si–Nb TRIP aided steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2394–2400. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.054>
24. Rana, R., Cordova-Tapia, E., Jimenez, J. A., Morales-Rivas, L. & Garcia-Mateo, C. (2024). Design of carbide free bainitic steels for hot rolling practices. *Philosophical Magazine Letters*, 4(1)
25. Bleck, W., Guo, X. & Ma Y. (2017). The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*, 88(10), 1–10. <https://doi.org/10.1002/srin.201700218>
26. Navarro-Lopez, A., Sietsma, J., Santofimia, M.J. (2016). Effect of prior athermal martensite on the isothermal transformation kinetics below Ms in a low-C High-Si steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 1028–1039. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3285-6>
27. Yi, H. L. Chen, P. & Bhadeshia, H. K. D. H. (2014). Optimizing the morphology and stability of retained austenite in a δ -TRIP steel. *Metallurgical and Materials Transactions*, 45(8), 3512–3518. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2267-4>

28. Caballero, F. G., Miller, M. K., Babu, S. S. & Garcia-Mateo, C. (2007). Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*, 55(1), 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033>

29. Bhadeshia, H. K. D. H. & Edmonds D. V. (1979). The bainite transformation in a silicon steel. *Metall Trans A*, 10(7), 895–907. <https://doi.org/10.1007/BF02658309>

30. Caballero, F. G., Bhadeshia, H. K. D. H., Mawella, K. J. A., Jones, D. G., Brown, P. (2002). Very strong low temperature bainite. *Material Science and Technology*, 18, 279–284. <https://doi.org/10.1179/026708301225000725>

31. Mahieu, J., De Cooman, B. C. & Maki J. (2002). Phase transformation and mechanical properties of Si-free CMnAl transformation-induced plasticity-aided steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 33(8), 2537–2580. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0378-9>

32. Mahieu, J., Claessens, S. & De Cooman, B. C. (2001). Galvanizability of highstrength steels for automotive applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(11), 2905–2907. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-1042-5>

33. Mintz, B. (2001). Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels. *International Materials Reviews*, 46(4), 169–197. <https://doi.org/10.1179/095066001771048754>

34. Maki, J., Mahieu, J., De Cooman, B. C. & Claessens, S. (2003). Galvanisability of silicon free CMnAl TRIP steels. *Materials science and technology*, 19(1), 125–131. <https://doi.org/10.1179/026708303225009300>

35. Jacques, P. J., Girault, E., Mertens, A., Verlinden, B., Humbeek, J. V. & Delannay, F. (2001). The developments of coldrolled TRIP-assisted multiphase steels Al-alloyed TRIP-assisted multi-phase steels. *ISIJ International*, 41(9), 1068–1074. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1068>

36. De Cooman, B. C. (2004). Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3–4), 285–303. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.002>

37. Kim, S. J., Lee, C. G., Choi, I. & Lee, S. (2001). Effects of heat treatment and alloying elements on the microstructure and mechanical properties of 0.15 wt pct C transformation-induced plasticity-aided cold rolled steel sheet. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(3). 505–514. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0067-0>

38. Santigopal, S., Sourav, D., Debalay, C., Indradev, S., Shiv Brat, S. & Arunansu, H. (2013). Development of multiphase microstructure with bainite, martensite and retained austenite in a co-containing steel through quenching and partitioning (Q&P) treatment. *Metallurgical and materials transactions A*, 44(13), 5653–5664. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1929-y>

39. Timokhina I., Beladi H., Xiong X.-Y. & Hodgson P. D. (2013). On the low temperature strain aging of bainite in the TRIP steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(11), 5177–5191. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1864-y>

40. Huang, B. M., Yang, J. R., Yen, H. W., Hsu, C. H., Huang, C. Y., & Mohrbacher, H. (2014). Secondary hardened bainite. *Materials Science and Technology*, 30(9), 1014–1023. <https://doi.org/10.1179/1743284714y.0000000536>

41. Liang, Z., Li, H., Chen, C., Fu, H., Feng, X., Gao, X., Yang, Z., & Zhang, F. (2024). Introducing nano-VC precipitates makes ultrafine bainitic steel a better combination of strength, ductility, and toughness. *Materials Research Letters*, 12(10), 756–763. <https://doi.org/10.1080/21663831.2024.2386439>

42. Kononenko, H. A., Kimstach, T. V., Safronova, O. A. & Podolskyi, R. V. (2023). Shliakhy pidvyshchennia stiikosti ta zhyvuchosti lystovoho prokatu iz bronovoi stali. (Ohliad). *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 447-464. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-447-464>

43. Singh, S. B. & Bhadeshia, H. K. D. H. (1998). Estimation of bainite plate-thickness in low-alloy steels. *Materials Science and Engineering: A*, 245(1), 72-79. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00701-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00701-6)

44. Hesse, O., Liefelth, J., Kunert, M., Kapustyan, A., Brykov, M. & Efremenko, V. (2016). Bainit in Stählen mit hohem Widerstand gegen Abrasivverschleiß (Bainite in Steels with High Resistance to Abrasive Wear). *Tribologie und Schmierungstechnik*. 63(2), 5–13. <http://surl.li/gubkxo>

45. Goulas, C., Mecozzi, M. G. & Sietsma, J. (2016). Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. *Metallurgical and Materials Transactions*, 47(6), 3077–3087. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3418-6>

46. Mohanty, R. R., Girina, O. A. & Fonstein, N. M. (2011). Effect of heating rate on the austenite formation in low-carbon high-strength steels annealed in the intercritical region. *Metallurgical and Materials Transactions*, 42(12), 3680-3690. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0753-5>

47. Kang, Jian, Wang, Chao, Li, Yunjie, Yuan, Guo & Wang Guodong. (2016). Effect of direct quenching and partitioning treatment on mechanical properties of a hot rolled strip steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 31(1), 178-185. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11595-016-1349-0>

G. A. Kononenko^{1,2}, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105
T. V. Kimstach^{1,3}, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-8993-201X
O. A. Safronova¹, Ph. D. Student, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4032-4275
R. V. Podolskyi¹, Ph. D., Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641
O. P. Klynova¹, Lead Engineer

¹Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

²National Technical University "Dnipro Polytechnic"

³Ukrainian State University of Science and Technologies

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-STRENGTH BAINITE STEELS

Abstract. Purpose of the work. Analysis of the current state of development of high-strength bainite steels, study of the mechanisms of formation of the bainite structure and its influence on the mechanical properties of the material. Determination of the prospects for the application of steels with a carbide-free bainite structure in various industries. Research methodology. Analysis of literature sources devoted to the development and improvement of bainite steels. In the process of research, methods

of review/comparison/generalization of data are used, which allow to identify the main trends and approaches in the study of the mechanisms of formation of bainite structures, their influence on properties. Research results. The work analyzes scientific literature sources devoted to the study of the features of bainite transformation. The prospects for the development of high-strength bainite steels, which are characterized by a combination of high strength, plasticity and toughness, are considered. Modern approaches to obtaining bainite structures are analyzed, in particular the use of alloying and heat treatment, which allow to optimize the mechanical properties of steel. The influence of alloying elements on the kinetics of bainite formation, the stability of retained austenite and the general structure of steel is considered. A review of current trends in the development of promising technologies for heat treatment of high-strength bainite steels is carried out. Practical significance. An analysis of the prospects for the application of bainite steels in critical industries, such as transport engineering, energy, construction and the military industry is presented. The directions of future research aimed at expanding the scope of application and improving the performance properties of these steels, as well as ensuring their competitiveness in the modern materials market are considered.

Keywords: carbide-free bainite, austenite, mechanical properties, alloying elements, heat treatment.

For citation: Kononenko, G. A., Kimstach, T. V., Safronova, O. A., Podolskyi, R. V. & Klynova, O. P. (2024). Prospects for the development of high-strength bainite steels. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 602-620. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-602-620>

Стаття надійшла до редакції збірника 03.10.2024 р.

Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)