УДК 669.15:621.785
DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.77.1211

СПОСІБ ОТРИМАННЯ НАНОБЕЙНІТУ В СТАЛЯХ : СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ДЕЙНЕКО Л. М.[1], *докт. техн. наук, проф.,*
ШПОРТЬКО Ю. В.[2*], *асп.*

[1] Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055
[2*] Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

Анотація. ***Постановка проблеми***. Тенденції розвитку в галузі машинобудівних матеріалів демонструють стійку тенденцію до підвищення їх міцності, в'язкості та пластичності. Це особливо виражено для сталей, оскільки вони конкурують з легкими сплавами та композитними матеріалами в багатьох сферах застосування. Поліпшення механічних властивостей сталей намагаються досягти шляхом утворення дисперсних складових мікроструктур, які можуть досягати нанорозміру, що забезпечує суттєве підвищення міцності без шкоди для в'язкості та пластичності металовиробів. ***Мета статті*** – аналіз сучасних способів отримання в сталевих виробах дисперсного структурного стану (наноструктурованого бейніту), який забезпечує поєднання високої міцності та пластичності в них. ***Результати досліджень.*** Здійснено аналіз літературних джерел, які присвячені перспективам отримання високоміцних сталей третього покоління з можливістю отримання дисперсних структурних станів, як нанобейнітові, безкарбідні бейнітні при реалізації обробки сталей по різним технологіям, у тому числі і по режимам Q&P (Quenching and Partitioning). Зазначено, що високовуглецеві наноструктуровані бейнітні сталі виготовляються шляхом тривалої ізотермічної термічної обробки у нижньому температурному інтервалі перетворення аустеніту, який зазвичай вище за температуру початку мартенситного перетворення (Мп). Показано, що час перетворення можна скоротити за допомогою додавання до складу сталей легуючих елементів, або попереднім утворенням мартенситу перед ізотермічним бейнітним перетворенням (тобто охолодження здійснюється нижче Мп, а потім температура металу підіймається вище Мп). Розглянуто метод отримання високоміцних матеріалів, який полягає в розробці низьковуглецевого наноструктурованого бейніту, який можна отримати за відносно невеликий час перетворення з міцністю, подібною до тієї, що була досягнута для високовуглецевої наноструктурованої сталі, а також з покращеною пластичністю і в'язкістю. Зазначено, що однією з розроблених модифікацій Q&P-технології є BQ&P (B – *bainite*). Суть даної технології полягає в отриманні безкарбідного бейніту на стадії первинного гартування. Виконано огляд сучасних тенденцій у розробці перспективних технологій термічної обробки високоміцних нанобейнітних сталей. ***Висновок***. Показано, що сталі зі структурою нанобейніту характеризуються унікальним поєднанням високої міцності, пластичності та ударної в'язкості. Визнано, що отримання нанобейнітного структурного стану можливе в сталях та сплавах з різним вмістом вуглецю та легуючих елементів. Розглянута інноваційна багатоступенева термічна обробка, яка поєднує процеси бейнітизації та гартування і розподілу (BQ&P). Показано можливість здійснення технологічних впливів на метал з метою отримання структури нанорозмірного бейніту способом, який буде прийнятним для промислового виробництва металовиробів. Зазначено, що для підвищення конструкційної міцності в умовах зменшення жолоблення та деформації металовиробів складної геометричної форми доцільно використовувати термічне зміцнення з отриманням бейнітного або ферито-бейнітного структурного стану.

Ключові слова: *нанобейніт; безкарбідний нанобейніт; бейнітизація; гартування і розподіл (Q&P); механічні властивості*

METHOD OF OBTAINING NANOBAINITE IN STEELS : MODERN TECHNOLOGIES

DEINEKO L.M.[1], *Dr. Sc. (Tech.)., Prof.,*
SHPORTKO Yu.V.[2*], *PhD Stud.*

[1] Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State

University of Science and Technology, 4, Science Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055
[2*] Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI "Dnipro Metallurgical Institute" of the Ukrainian State University of Science and Technology, 4, Science Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

Abstract. ***Statement of the problem*.** Trends in the development of engineering materials show a steady tendency toward increasing strength, toughness, and ductility. This is especially evident for steels, as they compete with lightweight alloys and composite materials in many fields of application. Improvements in the mechanical properties of steels are being pursued through the formation of exceptionally fine microstructures, reaching the nanoscale. This ensures a significant increase in strength without compromising toughness and ductility. ***The purpose of the article*** is to analysis of modern methods for obtaining a dispersed structural state (nanostructured bainite) in steel products, which provides a combination of high strength and ductility in them. ***Research results*.** The article analyzes scientific literature on the prospects of obtaining high-strength steels of the third generation with the possibility of obtaining such dispersed structural states as nanobainitic, carbide-free bainitic steels when implementing steel processing by Q&P (Quenching and Partitioning) modes. It is noted that high-carbon nanostructured bainitic steels are made by prolonged isothermal heat treatment at low temperatures above the temperature of the onset of martensitic transformation. It is shown that the transformation time can be reduced by adding alloying elements to the steel composition, ausforming, or by preliminary formation of martensite before isothermal bainite transformation. A method of obtaining high-strength materials is considered, which consists in the development of low-carbon nanostructured bainite, which can be obtained in a relatively short transformation time with strength similar to that achieved for high-carbon nanostructured steel, as well as with improved ductility and toughness. It is noted that one of the developed modifications of the Q&P technology is BQ&P (B – bainite). The essence of this technology is to obtain carbide-free bainite at the stage of primary quenching. A review of current trends in the development of promising technologies for heat treatment of high-strength nanobainitic steels is made. ***Conclusion***. It is shown that steels with a nanobainite structure are characterized by a unique combination of high strength, ductility, and impact strength. It is indicated that nanobainite can be obtained in steels and alloys with different carbon and alloying elements. It is noted that many studies have been devoted to the development of low-carbon nanostructured bainite, which can be obtained in a relatively short transformation time with strength similar to that achieved for high-carbon nanostructured steel, as well as with improved ductility and toughness. An innovative multi-stage heat treatment combining bainitization and quenching and distribution (BQ&P) processes is considered. It is shown that it is possible to carry out technological effects on metal in the laboratory and obtain the structure of nanoscale bainite in a way that will be acceptable for the industrial production of metal products.

Keywords: *nanobainite; carbide-free nanobainite; bainitization; Quenching and Partitioning (Q&P); mechanical properties*

Постановка проблеми. Сталеві конструкції, що працюють в екстремальних умовах, вимагають матеріалів високого рівня властивостей. А промисловість потребує розробки нових підходів до обробки сталей з різним вмістом вуглецю, які забезпечать отримання деталей із високим рівнем характеристик механічних властивостей при зменшенні рівня остаточних напружень та жолоблення виробів.

Аналіз публікацій. В літературі за останні десятиліття опубліковані результати досліджень мікроструктури та механічних властивостей зміцнених сталей з високим рівнем (недосяжним раніше) механічних властивостей. Покращення механічних властивостей розглядається с точки зору оптимізації мікроструктури сталей через подрібнення складових структури до нанометрів [1; 2], фазове перетворення, додаткове підвищення щільності дефектів кришталевої решітки та створення в металі раціонального структурного та субструктурного стану з дисперсними частинками вторинної фази, рівномірно розподіленими по об'єму металу.

В даний час у науці про матеріали велика увага приділяється їх структурі та властивостям, а також способам отримання в них наноструктурного стану.

Так ще в середині XX віку були отримані цікаві співвідношення міцності та пластичності, в'язкості в сталях з підвищеною концентрацією кремнію, які отримували при термічній обробці бейнітну структуру, у тому числі і по ізотермічним режимам (наприклад, роботи Allten A. G., Payson P., Owen W. S., Keh A. S., Leslie W. V., Spelch G. R., Averbach B. L., Alstetter C. J., Cohen M. та інших). Для

вітчизняних дослідників більш відомі результати досліджень Закея В. Ф., Паркера Е. Р. та інших у питаннях розробки сучасних конструкційних сплавів.

А в кінці XX віку вже з'явилися відомі наукові розробки, наприклад, Бхадешіа та ін., які розглядали вже нанобейнітну структуру з чудовими властивостями у високовуглецевій та висококремнієвій сталі за допомогою процесу термічної обробки [3]. Відтоді сталі з нанобейнітним структурним станом привертають широку увагу [4–6].

Оскільки у вітчизняній літературі дані о способах отримання нанобейнітної структури практично відсутні, становить інтерес аналіз їх особливостей та перспектив в отриманні високоміцного стану сталей.

Мета статті – аналіз сучасних способів отримання в сталевих виробах дисперсного структурного стану (наноструктурованого бейніту), який забезпечує поєднання високої міцності та пластичності в них.

Результати та обговорення. Для задоволення постійно зростаючі потреби промисловості в інструментальних і конструкційних матеріалах, нові розробки передових машинобудівних сталей спрямовані на одночасне підвищення міцності, пластичності та в'язкості при зменшенні рівня жолоблення та деформацій виробів в процесі їх зміц-нюючої або комбінованої термічної обробки. Поліпшення механічних властивостей сталей намагаються досягти шляхом утворення винятково дисперсних мікроструктур, які досягають нанорозміру, це забезпечує суттєве підвищення міцності без шкоди для в'язкості та пластичності. Сьогодні наноінженерія використовується для розробки надвисокоміцних сталей, як перспективної технології в металургії.

Передові високоміцні сталі третього покоління мають композитні мікроструктури, які складаються з дисперсних високоміцних фаз (наприклад, бейніту або мартенситу) і високої частки більш м'якої фази (наприклад, аустеніту), для оптимізації компромісу між міцністю та пластичністю. Це призвело до створення нових концепцій, які пояснюють можливість отримання таких структурних станів, як нанобейнітові [7; 8], безкарбідні бейнітні [9] при реалізації обробки сталей по режимам Q&P (Quenching and Partitioning) [10].

Бейніт не є однорідною за складом фазою, це композит фаз, що складається переважно з пластинок фериту, але з вкрапленнями дрібних інших фаз, таких як карбіди та/або залишковий аустеніт. Цей структурний стан може бути створений рівномірно у об'ємі величезних конструкцій, таких як парові турбіни, або може використовуватися мікроскопічно, як обробка поверхневих шарів металу деталей для покращення її трибологічних властивостей. Ці структурні складові піддаються цілеспрямованим змінам у процесі їх отримання. Наприклад, їх масштаб можна регулювати від сотень мікрометрів до десятків нанометрів. Такі варіації відображаються на властивостях металовиробів, підкреслюючи універсальність впливу структурного стану.

Високовуглецеві наноструктуровані бейнітні сталі, які, наприклад, розглядаються в роботах Bhadeshia та ін. [3], виготовляються за допомогою термічних низькотемпературних ізотермічних перетворень, як правило, в діапазоні від 200 °C до 300 °C протягом довготривалих витримок, тобто обробки *austempering* для утворення нанорозмірного (20…100 нм) бейніту. Загалом відомо, що ці сталі мають надвисоку міцність і твердість, а також гарне подовження. Отримання таких властивостей як високої міцності та твердості пов'язані з нанорозмірними пластинами бейнітного фериту, високою щільністю дислокацій (дислокаційними лісами) та зміцненням твердого розчину, тоді як пластичність пов'язана з деформаційним мартенситним перетворенням або утворенням двійників у залишковому аустеніті під час деформації.

У роботі [11] були досліджені характеристики структури та механічних властивостей загартованої (*austenitization* протягом 15 хвилин за 1000 °C з наступним ізотермічним перетворенням за 200 °C

протягом 10 діб перед гартуванням у воді) високовуглецевої сталі з нанокристалічною бейнітною структурою. Виявлена імовірність пластичної релаксації в тонкій плівці залишкового аустеніту переважно за рахунок підвищеної щільності дислокацій, а також наявність аккомодаційної нанодвійникової структури в блоковому залишковому аустеніті. Різні механізми розміщення в бейнітній сталі нано-двійникової структури можуть бути також результатом нерівномірного розподілу вуглецю в залишковому аустеніті.

На думку F. G. Caballero та ін. [12], мартенситне перетворення (*displacive transformation*) пов'язане з рухом границі розділу фаз. Цей рух може бути загальмований дефектами, *такими як дислокації*, дефекти упаковки або двійники в аустеніті. У процесі бейнітного пере-творення аустеніту дефекти виникають, коли деформація структури, що супро-воджує зародження і ріст бейніту, компенсується пластичною релаксацією навколишнього аустеніту. Зростаюча бейнітна пластина зупиняється, коли вона стикається з межею зерна аустеніту і деформує аустеніт. Оскільки перетворення зміцненого аустеніту з підвищеною щільністю дефектів призводить до утворення тонких пластин, автори зазначають, що сплави можуть оброблятися в таких умовах, коли бейнітне перетворення пригнічується до низьких температур (до 125…350 °C) і це призводить до отримання нанорозмірної бейнітної мікроструктури.

У в,язку з тим, що отримання наноструктурованого бейнітного стану в високовуглецевих сталях пов,язане з тривалою ізотермічною витримкою в нижньому інтервалі при температурах, вищих за температуру початку мартенситного перетворення, доцільно розглянути можливість скорочення часу ізотермічної витримки, для того, щоб виробництво цих сталей було економічним для промисловості. Відомо, що час перетворення можна скоротити за допомогою додавання до складу сталей легуючих елементів [13] або попереднім утворенням мартенситу перед ізотермічним бейнітним перетворенням, що прискорює наступне бейнітне перетворення [14].

F.G. Caballero зі співавторами [15] з використанням теорії атомного пере-творення, розробили та описали багато-масштабну структуру нанозернистих бейнітних високовуглецевих сталей з підвищенною концентрацією Si (1,5…3,0 мас. %), після їх ізотермічної витримки при температурах до 125…325 °C. Також, утворення двійників в аустенітних плівках ідентифіковано авто-рами, як механізм деформаційного зміц-нення, що сприяє пластичності цих структур. Ці сталі показали видатні характеристики зносу та конкуренто-спроможні значення втомної міцності.

Вплив попередньо сформованого мартенситу на бейнітне перетворення досліджували Yuki Toji та ін. [16], яке відбувалося під час етапу розподілу в процесі Q&P. Дослідження було зосеред-жено на впливі попередньо сформованого мартенситу на кінетику подальшого перетворення по бейнітному механізму, морфологію та кристалографічну орієн-тацію бейніту, який утворився згодом. Для визначення впливу Si на цей процес автори використовували дві сталі: 1,1 мас % C – 3 мас %. Mn з 2 % мас. Si та без нього. Дослідження показали, що перетворення по бейнітому механізму явно прискорювалося попередньо виникаючим мартенситом як в сталях з кремнієм, так і в сталях без кремнію. Бейніт оточує попередньо існуючий мартенсит у сталі без кремнію, тоді як у сталі, що містить 2 % Si, він виникає всередині зерен аустеніту. Основне співвідношення орієнтації між бейнітом і прилеглим аустенітом було змінено за рахунок присутності мартенситу від Nishiyama-Wassermann (N-W) до Greninger-Troiano (G-T) незалежно від вмісту Si. Перед бейнітним перетворенням у сталі з вмістом Si 2 % спостерігалося чіткий розподіл вуглецю з мартенситу в аустеніт, чого не спостерігалося в сталі без кремнію. Автори припускають, що дислокації, введені в результаті мартенситного перетворення,

діють як основний фактор, який прискорює бейнітне перетворення, коли мартенсит виникає перед бейнітним перетворенням.

Слід зазначити, що в літературних джерелах [17] і раніше фіксували зменшення інкубаційного періоду бейнітного перетворення поблизу температури точки M_S, це пов'язують з ініціюючою дією деформаційного впливу мартенситного перетворення на зародження бейніту, а також на суттєве затримання бейнітного перетворення та зміну морфології залишкового аустеніту в сталях зі збільшеною концентрацією кремнію.

Автори роботи [18] подальше дослідили вплив попередньо сформованого мартенситу та його об'ємної частки на мікроструктуру та механічні властивості нанобейнітної підшипникової сталі. Послі-довну кількість попередньо сформованого мартенситу від 0 % до 25 % вводили шляхом регулювання ізотермічної температури першої операції – отримання мартенситу. Згідно з дослідженнями введення попередньо сформованого мартенситу може покращити бейнітну мікроструктуру і збільшити об'ємну частку залишкового аустеніту, але при цьому, знижує його механічну стабільність. Коли об'ємна частка попередньо сформованого мартенситу становить менше 20 %, твердість і зносостійкість нанобейнітної підшипникової сталі поступово зростає, але в'язкість сталі поступово знижується зі збільшенням об'ємної частки попередньо сформованого мартенситу. Коли об'ємна частка попередньо сформованого мартенситу досягає 25 %, властивості нано-бейнітної сталі, особливо зносостійкість, явно погіршуються. За результатами комплексного порівняння механічних властивостей нанобейнітної підшипникової сталі автори визначили, що оптимальна об'ємна частка попередньо сформованого мартенситу становить ~10...15 %.

Peter Kirbiš та ін. [19] показали, що створити тонкі мікроструктури, які досягають нанорозміру, можна не застосовуючи зовнішню пластичну деформацію, а контролюючи фазове перетворення аустеніту на ферит при низьких температурах. Утворення бейніту в сталях при температурах нижче приблизно 200 °C дозволяє отримувати об'ємні наноструктурні матеріали виключно термічною обробкою. Це надає переваги високої продуктивності, а також малі обмеження щодо форми та розміру заготовки порівняно з іншими методами виробництва наноструктурованих металів. Розробка нових бейнітних сталей базувалася на сплавах з високим вмістом Si або Al. Ці групи сталей відрізняються дуже тонкою мікроструктурою, що складається переважно з бейнітних феритових пластин і невеликої частки залишкового аустеніту, а також карбідів. Автори показали, що тонку структуру, в межах якої товщина окремих бейнітних феритових пластин може становити всього 5 нм, можна отримати виключно шляхом гартування та природного старіння без використання ізотермічного перетворення, яке є характерним для більшості бейнітних сталей. Передбачається, що необхідний час для природного старіння можна значно скоротити без зниження твердості, використовуючи сплави з меншим вмістом стабілізуючих аустеніт легуючих елемен-тів. Завдяки тонкій структурі та низькому вмісту залишкового аустеніту ця група сталей може розвивати дуже високу твердість до 65 HRC, зберігаючи при цьому значний рівень ударної в'язкості.

Автори роботи [20] проаналізували термодинамічну доцільність формування нанобейніту в сталях, легованих Al із середнім вмістом Mn, за допомогою міжкритичного відпалу (intercritical annealing – IA) та подальшої термічної обробки. Метою дослідження було визначити вплив температури IA та вмісту Mn на стабільність аустеніту, температуру *Ms* та результуючу товщину бейнітної пластини (bainite plate thickness – BPT). Результати показують, що температурний діапазон IA 780…860 °C ефективно знижує температуру *Ms*, сприяючи утворенню нанобейніту. Результати показали, що вищий вміст Mn збільшує частку аустеніту

під час ІА, таким чином підвищуючи потенціал для утворення нанобейніту.

Інший метод отримання високоміцних матеріалів полягає в розробці низьковуглецевого наноструктурованого бейніту, який можна отримати за відносно невеликий час перетворення з міцністю, подібною до тієї, що була досягнута для високовуглецевої наноструктурованої сталі, а також з покращеною пластичністю і в'язкістю.

Дослідження Y. X. Zhoua та ін. [21] було присвячено вивченню способів отримання нанорозмірного бейніту для покращення механічних властивостей низьковуглецевої середньомарганцевої сталі (Mn був основним легуючим елементом для зниження температур *Ms* і *Bs*, тоді як Si додавали для уповільнення утворення цементиту). Інтереси авторів були зосереджені на впливі ізотермічної температури та часу бейнітного перетворення на мікроструктуру та механічні властивості досліджуваної сталі. Дослідження мікроструктури показали, що сталь складається з нанорозмірних ламелей з характеристиками радіального розташування бейнітного фериту і залишкового аустеніту середньої товщини ~120 нм. Об'ємна частка залишкового аустеніту досягала 32 % при концентрації в ньому вуглецю 1,75 мас %. Температура і час ізотермічної витримки при бейнітному перетворенні вплинули не тільки на морфологію бейніту, але й на об'ємну частку залишкового аустеніту, розподіл, мікроструктуру і концентрацію вуглецю в аустеніті, які відповідають за поєднання високої міцності і достатньої пластичності сталі.

Дослідження Avanish Kumar та ін. [22] показали, що можна сформувати наноструктурований бейніт у низьковуглецевих сталях менш ніж за 8 годин шляхом термічної обробки, що включає двоступеневу *austempering* (за 350 °C протягом 20 хвилин і 250 °C протягом 7 годин). Принцип, що лежить в основі цього, полягає в тому, щоб зменшити температуру *Ms*, незважаючи на початковий низький вміст вуглецю, за допомогою короткочасного *austempering*, таким чином наповнюючи залишковий аустеніт вуглецем. Автори показали, що розроблена за допомогою двох етапів ізотермічного перетворення нано-структурована низьковуглецева бейнітна сталь, продемонструвала надзвичайно високу ударну в’язкість на додаток до високої міцності та пластичності.

Останніми роками активно розвивається такий різновид ізотермічного гартування, як технологічна схема терміч-ної обробки сталі «Quenching and Partitioning – Q&P» («Гартування та розподіл») [23]. Вона базується на теорії «Обмеженої парарівноваги вуглецю» («Constrained Carbon Paraequilibrium»), яку у 2003 році запропонував J. G. Speer і яка дозволяє розрахувати кількість вуглецю, який може дифундувати зі свіжого мартенситу гартування, який пересичений вуглецем, в аустеніт [24].

Застосування процесу гартування та розподілу (Q&P) для сталей передбачає мікроструктурні зміни, які є більш складними, ніж просто утворення мартенситу з подальшим розподілом вуглецю від мартенситу до аустеніту. Прикладами такої складності є утворення епітаксіального фериту під час першого етапу гартування, утворення бейніту, карбідів і градієнтів вуглецю, а також міграція границь розділу мартенсит/аустеніт під час етапу розподілу. В роботі авторами проаналізовано дослідження механізмів, що контролюють мікроструктурні зміни під час застосування Q&P-процесу, які дозволять розробити концепції проектування Q&P-сталей на основі фазових перетворень [25].

Серед різноманітних морфологічних форм бейніту значний інтерес представляє структура дисперсного 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.

Метою процесу гартування та розподілу (Q&P) при термічній обробці сталі є збагачення аустеніту вуглецем під час розподілу після початкового переохолодження нижче температури початку мартенситного перетворення (*Ms*). A. J. Clarke та ін. [26] запропонували два механізми збагачення аустеніту вуглецем під час стадії розподілу. Вони припускають або виділення вуглецю з мартенситу, або утворення безкарбідного бейніту під час стадії розподілу, які порівнюються з прямими експериментальними вимірюваннями утворених фракцій аустеніту.

Зважаючи на свою перспективність, базова Q&P-технологія постійно розвивається, розробляються різні модифікації, метою яких є усунення її недоліків, або подальше підвищення комплексу якості сталі.

Однією з розроблених модифікацій Q&P-технології є BQ&P (B – *bainite*) – суть даної технології полягає в отриманні безкарбідного бейніту на стадії первинного гартування.

Дослідження Xiaolu Gui та ін. [27] проводились для вивчення обробки BQ&P у середньовуглецевій легованій сталі Mn-Si-Cr. Мета дослідження полягала в з'ясуванні впливу морфології та об'ємної частки бейніту, отриманого шляхом *austempering* при різних температурах бейнітного перетворення, на мікро-структурну еволюцію та механічні влас-тивості сталі BQ&P. Автори показали, що оптимальне поєднання міцності та плас-тичності було досягнуто в сталі BQ&P, коли температура *bainitic austempering* становила 360 °C (межа міцності на розрив: 1495 МПа; рівномірне подовження та загальне подовження: 26,2 % та 31,8 %; зменшення площі: 47,9 %). Окрім викли-каного перетворенням ефекту пластичності залишкового аустеніту та композитного ефекту багатофазності після обробки BQ&P, формування безкарбідного бейніту також відіграє значну роль у покращенні механічних властивостей. Безкарбідний бейніт може підвищити стійкість до пошкоджень багатофазної сталі завдяки додатковій деформаційній міцності в локальній зоні пластичної деформації біля вершини мікротріщини. У цьому випадку слід належним чином контролювати фракцію та розподіл CFB та уникати макросегрегації.

З попередніх досліджень відомо, що змішана мікроструктура бейніту та мартенситу може ефективно підвищувати міцність та в’язкість сталі. Це пояснюється подрібненням мікроструктури, спричиненим геометричним розчленуванням попереднього зерна аустеніту бейнітним феритом, який утворився ізотермічно перед гартуванням, та більшими енерговитратами на поширення тріщин. Ґрунтуючись на цій концепції, в роботі [28] запропоновано новий метод низькотемпературного бейнітного ізотермічного перетворення з неповним одноступеневим гартуванням і розподілом (BQ&P) для бейнітної сталі 0,2 C–1,5 Si–1,8 Mn. Було досліджено мікроструктуру та механічні властивості, особливо ударну в'язкість сталі після мартенситного (Q&T) і повного бейнітного перетворення з неповним одноступеневим гартуванням і розподілом (B_3-Q&P, B_{30}-QP – підрядковий індекс 3 або 30 вказує на ізотермічну витримку 3 або 30 хв для бейнітного перетворення).

Інноваційна багатоступенева термічна обробка, яка поєднує процеси бейнітизації та гартування і розподілу (BQ&P), може бути застосована для отримання багатофазної мікроструктури, що містить безкарбідний нанобейніт, надтонкий мартенсит і залишковий аустеніт для покращення властивості цементованого поверхневого шару та серцевини виробів. У дослідженні [29] цементована середньовуглецева легована сталь Cr–Si–Mn була оброблена *bainitic austempering* в поєднанні з BQ&P з 20 і 40 % ступенем бейнітного перетворення. Цементація призводить до збільшення вмісту вуглецю в сталі, що дозволяє отримати дуже тонку складну мікроструктуру в виробу, яка поступово змінюється в межах градієнта вуглецю по перерізу. Було показано, що процес BQ&P дозволив отримати більш високу твердість і

зносостійкість виробу в порівнянні з простою *bainitic austempering*. Покращення властивостей є результатом зміцнюючого впливу додаткової фракції мартенситу та більшої кількості стабілізованого аустеніту, схильного до трансформації при терті (трансформаційна індукована пластичність, TRIP-ефект). Крім того, скориговані параметри процесу призводять до сприятливих механічних властивостей у середньовуглецевій серцевині (межа текучості (YS) ~ 1 430 МПа, межа міцності (UTS) ~ 1 820 МПа, ударна в'язкість (KV) ~ 20 Дж/см^2). Можливість регулювати механічні та експлуатаційні властивості сталі шляхом контролю частки певних фаз, а також значне скорочення часу термічної обробки може зробити процес BQ&P придатним для промислового застосування, наприклад, для виробництва цементованих зубчастих коліс.

Практичний досвід авторів при створенні режимів та технологій зміцнюючої термічної обробки різноманітних сталевих деталей зі структурою бейніту (або бейніту і мартенситу та бейніту і фериту) підтверджує доцільність широкого розвитку такого напряму. Він дозволяє збільшити термін експлуатації механізмів та конструкцій при зменшенні їх матеріаломісткості, а також знизити збитки від можливих відмов деталей машин та елементів металевих споруд.

Слід зазначити, що в промислових умовах реалізувати процеси зміцнюючої термічної обробки металовиробів з ізотермічними витримками більшими ніж 30–40 хвилин складно реалізувати по різним причинам. Авторами розроблені та реалізовані в промисловості технологія термічної обробки (яка поєднує режими, конструктивно-технологічні параметри обладнання та охолоджувальні середовища) для отримання в маловуглецевих низьколегованих сталях бейнітної або ферито-бейнітної структури при зменшенні рівня жолоблення виробів складної геометричної форми. Встановлені закономірності процесів структуроутворення в металі з таким структурним станом при подальших відпусках.

Висновки

До основних висновків, які можна зробити на підставі аналізу різних джерел інформації, належать:

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

2. Вказано, що отримання нанобейніту можливе в сталях та сплавах з різним вмістом вуглецю та легуючих елементів. Легування кремнієм, алюмінієм пригнічує утворення цементиту та забезпечує стабілізацію залишкового аустеніту, марганець є легуючим елементом для зниження температур *Ms* і *Bs* та ще підвищує прогартовуваність, що покращує механічні властивості сталі.

3. Зазначено, що високовуглецеві наноструктуровані бейнітні сталі часто не відповідають технологічним та комерційним вимогам. Тому, багато досліджень присвячені розробці низьковуглецевого наноструктурованого бейніту, який можна отримати за відносно невеликий час перетворення з міцністю, близькою до тієї, що була досягнута для високовуглецевої наноструктурованої сталі, а також з покращеною пластичністю і в'язкістю. Це є економічно і технологічно ефективним для промислового виробництва.

4. Розглянута доцільність використання інноваційної багатоступеневої термічної обробки, яка поєднує процеси бейнітизації та гартування і розподілу (BQ&P). Вона може бути застосована для отримання багатофазної мікроструктури, яка містить безкарбідний нанобейніт.

5. Проведений аналіз отримання наноструктурованого бейніту в сталях припускає здійснення в лабораторних умовах технологічних впливів на метал в процесі його термічної або комбінованої

обробки з метою суттєвого збільшення рівня дефектності структури для цілеспрямованого впливу на подальші процеси структуроутворення і отримання структури нанорозмірного бейніту способом, який буде прийнятним для промислового виробництва металовиробів. При цьому авторами передбачається використовувати подібні розробки для підвищення експлуатаційної стійкості інструменту для деформування, зокрема для ножів холодного та гарячого різання.

Результати досліджень отримані при фінансовій підтримці Національного фонду досліджень України у межах проекту (реєстраційний номер 2025.06/0084).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hu J., Shi Y. N., Sauvage X., Sha G., Lu K. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals. *Science*. 2017. № 355. Pp. 1292–1296. URL: https://doi.org/10.1126/science.aal5166

2. Zhou X., Li X. Y., Lu K. Enhanced thermal stability of nanograined metals below a critical grain size. *Science*. 2018. № 360. Pp. 526–530. URL: https://doi.org/10.1126/science.aar6941

3. Bhadeshia H. K. D. H. The first bulk nanostructured metal. *Sci. Technol. Adv. Mater*. 2013. № 14. Pp. 014202. URL: https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/1/014202

4. Zhao J., Hou C. S., Zhao G., Zhao T., Zhang F. C., Wang T. S. Microstructures and mechanical properties of bearing steels modi-fied for preparing nanostructured bainite. *J. Mater. Eng. Perform*. 2016. № 25. Pp. 4249–4255. URL: https://doi.org/10.1007/s11665-016-2289-8

5. Wasliluk K., Skolek E., S'witnicki W. Microstructure and properties of surface layer of carburized 38CrAlMo6-10 steel sub-jected to nanostructurization by a heat treatment process. *Arch. Metall. Mater*. 2014. № 59. Pp. 1685–1690. URL: https://doi.org/10.2478/amm-2014-0285

6. Zhi C., Zhao A. M., He J. G., Zhao F. Q., Che Y. J. Thermodynamic analysis and strength-toughness research of nanobainite. *Chin. J. Eng.* 2016. № 38. Pp. 691–698. URL: https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2016.05.014

7. Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H., Mawella K. J. A., Jones D. G., Brown P. Very strong low temperature bainite. *Materials science and technology*. 2002. № 18 (3). Pp. 279–284. URL: https://doi.org/10.1179/026708301225000725

8. Rosalia Rementeria, Jose A. Jimenez, Sébastien Y. P. Allain, Guillaume Geandier, Jonathan D. Poplawsky, Wei Guo, Esteban Urones-Garrote, Carlos Garcia-Mateo, Francisca G. Caballero Quantitative assessment of carbon allocation anomalies in low temperature bainite. *Acta Materialia*. 2017. № 133. Pp. 333–345. URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.048

9. Jean-Christophe Hell, Moukrane Dehmas, Sébastien Allain, Juscelino Mendes Prado, Alain Hazotte, Jean-Philippe Chateau. Microstructure-properties relationships in carbide-free bainitic steels. *ISIJ international*. 2011. № 51 (10). Pp. 1724–1732. URL: https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1724

10. Samy Aoued, Frédéric Danoix, Sébastien Y. P. Allain, Steve Gaudez, Guillaume Geandier, Jean-Christophe Hell, Michel Soler, Mohamed Gouné. Microstructure evolution and competitive reactions during quenching and partitioning of a model Fe–C–Mn–Si alloy. *Metals*. 2020. № 10 (1). Pp. 137. URL: https://doi.org/10.3390/met10010137

11. Chih-Yuan Chen Microstructure characterization of nanocrystalline bainitic steel during tempering. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. № 762. Pp. 340–346. URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.174

12. Caballero F. G., Hung-Wei Yen, Miller M. K., Jer-Ren Yang, Cornide J., Garcia-Mateo C. Complementary use of transmission electron microscopy and atom probe tomography for the examination of plastic accommodation in nanocrystalline bainitic steels. *Acta Materialia*. 2011. № 59 (15). Pp. 6117–6123. URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.024

13. Sahand Golchin, Behzad Avishan, Sasan Yazdani. Effect of 10 % ausforming on impact toughness of nano bainite austempered at 300 °C. *Materials Science and Engineering : A.* 2016. № 656. Pp. 94–101. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.025

14. Закей В. Ф., Паркер Е. Р. Успехи в разработке сплавов на основе железа. *Fundamental aspects of structural alloy design.* Ed.: R. I. Jaffee, B. A. Wilcox. Battelle Institute Materials Science Colloguia, 1975. Pp. 86–111.

15. Francisca G. Caballero, Rosalia Rementeria, Lucia Morales-Rivas, Miguel Benito-Alfonso, Jer-Ren Yang, David de Castro, Jonathan D. Poplawsky, Thomas Sourmail and Carlos Garcia-Mateo Understanding Mechanical Properties of Nano-Grained Bainitic Steels from Multiscale Structural Analysis. *Metals*. 2019. № 9. Pp. 426. URL: https://doi.org/10.3390/met9040426

16. Toji Yuki, Matsuda Hiroshi, Raabe Dierk. Effect of Si on the acceleration of bainite transformation by pre-existing martensite. *Acta Materialia*. 2016. № 116. Pp. 250–262. URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.044

17. Kawata H., Hayashi K., Sugiura N., Yoshinaga N., Takahashi M. Effect of martensite in initial structure on bainite transformation. *Mater. Sci. Forum.* 2010. № 638–642 Pp. 3307–3312. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.3307

18. Decheng Jia, Dongyun Sun, Qingchao Wang, Feng Liu, Yanguo Li, Sujuan Yuan, Zhinan Yang, Fucheng Zhang. Effects of Preformed Martensite on Microstructure and Mechanical Properties of Nanobainite Bearing Steel. *Metals*. 2023. № 13. Pp. 99. URL: https://doi.org/10.3390/met13010099

19. Peter Kirbiš, Ivan Anžel, Rebeka Rudolf, Mihael Brunc̆ko. Novel Approach of Nanostructured Bainitic Steels' Production with Improved Toughness and Strength. *Metals*. 2020. № 13. Pp. 1220. URL: https://doi.org/10.3390/ma13051220

20. Mateusz Morawiec, Jarosław Opara, Adam Grajcar. Nanobainite formation in high-Al medium-Mn steels : thermodynamic approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. URL: https://doi.org/10.1007/s10973-024-13441-9

21. Zhou Y. X., Song X. T., Liang J. W., Shen Y. F., Misra R. D. K. Innovative processing of obtaining nanostructured bainite with high strength – high ductility combination in low-carbon-medium-Mn steel : Process-structure-property relationship. *Materials Science and Engineering : A.* 2018. № 718. Pp. 267–276. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.120

22. Avanish Kumar, B. Blessto, Aparna Singh. Development of a low-carbon carbide-free nanostructured bainitic steel with extremely high strength and toughness. *Materials Science and Engineering : A.* 2023. № 877. Pp. 145–186. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145186

23. Speer John G., Edmonds David V., Rizzo Fernando C., Matlock David K. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation. *Solid State and Materials Science*. 2004. № 8. pp. 219–237. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.003

24. Speer J., Matlock D. K., De Cooman B. C., Schroth J. G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Materialia*. 2003. no. 51. pp. 2611–2622. DOI: https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00059-4

25. Santofimia M. J., Zhao L., Sietsma J. Overview of Mechanisms Involved During the Quenching and Partitioning Process in Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2011. № 42A. Pp. 3620–3626. URL: https://doi.org/10.1007/s11661-011-0706-z

26. Clarke A. J., Speer J. G., Miller M. K., Hackenberg R. E., Edmonds D. V., Matlock D. K., Rizzo F. C., Clarke K. D., De Moor E. Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition (Q&P) process : a critical assessment. *Acta Materialia*. 2008. № 56 (1). Pp. 16–22. URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.08.051

27. Xiaolu Gui, Guhui Gao, Haoran Guo, Feifan Zhao, Zhunli Tan, Bingzhe Bai. Effect of bainitic transformation during BQ&P process on the mechanical properties in an ultrahigh strength Mn–Si–Cr–C steel. *Materials Science and Engineering : A.* 2017. № 684. Pp. 598–605. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.097

28. Yuyin Huang, Qiangguo Li, Xuefei Huang, Weigang Huang. Effect of bainitic isothermal transformation plus Q&P process on the microstructure and mechanical properties of 0.2C bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A.* 2016. № 678. Pp. 339–346. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.011

29. Krzysztof Wasiaka, Monika Wesierska-Hincaa, Emilia Skoleka, Wieslaw A. Światnickia, Andrzej Wieczorekb. Effect of a novel Bainitization Quenching & Partitioning heat treatment on multiphase microstructure evolution and properties of carburized Cr–Mn–Si alloyed steel. *SSRN Electronic Journal*. 2022. URL: https://doi.org/10.2139/ssrn.4021764

REFERENCES

1. Hu J., Shi Y.N., Sauvage X., Sha G. and Lu K. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals. Science. 2017, no. 355, pp. 1292–1296. URL: https://doi.org/10.1126/science.aal5166

2. Zhou X., Li X.Y. and Lu K. Enhanced thermal stability of nanograined metals below a critical grain size. Science. 2018, no. 360, pp. 526–530. URL: https://doi.org/10.1126/science.aar6941

3. Bhadeshia H.K.D.H. The first bulk nanostructured metal. Sci. Technol. Adv. Mater. 2013, no. 14, pp. 014202. URL: https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/1/014202

4. Zhao J., Hou C.S., Zhao G., Zhao T., Zhang F.C. and Wang T.S. Microstructures and mechanical properties of bearing steels modi-fied for preparing nanostructured bainite. J. Mater. Eng. Perform. 2016, no. 25, pp. 4249–4255. URL: https://doi.org/10.1007/s11665-016-2289-8

5. Wasliluk K., Skolek E. and S'witnicki W. Microstructure and properties of surface layer of carburized 38CrAlMo6-10 steel sub-jected to nanostructurization by a heat treatment process. Arch. Metall. Mater. 2014, no. 59, pp. 1685–1690. URL: https://doi.org/10.2478/amm-2014-0285

6. Zhi C., Zhao A.M., He J.G., Zhao F.Q. and Che Y.J. Thermodynamic analysis and strength-toughness research of nanobainite. Chin. J. Eng. 2016, no. 38, pp. 691–698. URL: https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2016.05.014

7. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H., Mawella K.J.A., Jones D.G. and Brown P. Very strong low temperature bainite. Materials Science and Technology. 2002, no. 18 (3), pp. 279–284. URL: https://doi.org/10.1179/026708301225000725

8. Rosalia Rementeria, Jose A. Jimenez, Sébastien Y.P. Allain, Guillaume Geandier, Jonathan D. Poplawsky, Wei Guo, Esteban Urones-Garrote, Carlos Garcia-Mateo and Francisca G. Caballero Quantitative assessment of carbon allocation anomalies in low temperature bainite. Acta Materialia. 2017, no. 133, pp. 333–345. URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.048

9. Jean-Christophe Hell, Moukrane Dehmas, Sébastien Allain, Juscelino Mendes Prado, Alain Hazotte and Jean-Philippe Chateau. Microstructure-properties relationships in carbide-free bainitic steels. ISIJ international. 2011, no. 51 (10), pp. 1724–1732. URL: https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1724

10. Samy Aoued, Frédéric Danoix, Sébastien Y.P. Allain, Steve Gaudez, Guillaume Geandier, Jean-Christophe Hell, Michel Soler and Mohamed Gouné. Microstructure evolution and competitive reactions during quenching and partitioning of a model Fe–C–Mn–Si alloy. Metals. 2020, no. 10 (1), pp. 137. URL: https://doi.org/10.3390/met10010137

11. Chih-Yuan Chen Microstructure characterization of nanocrystalline bainitic steel during tempering. Journal of Alloys and Compounds. 2018, no. 762, pp. 340–346. URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.174

12. Caballero F.G., Hung-Wei Yen, Miller M. K., Jer-Ren Yang, Cornide J. and Garcia-Mateo C. Complementary use of transmission electron microscopy and atom probe tomography for the examination of plastic accommodation in nanocrystalline bainitic steels. Acta Materialia. 2011, no. 59 (15), pp. 6117–6123. URL: https://doi.org/ 10.1016/j.actamat.2011.06.024

13. Sahand Golchin, Behzad Avishan and Sasan Yazdani. Effect of 10 % ausforming on impact toughness of nano bainite austempered at 300 °C. Materials Science and Engineering : A. 2016, no. 656, pp. 94–101. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.025

14. Zakei V.F. and Parker E.R. *Uspekhy v razrabotke splavov na osnove zheleza* [Advances in the development of iron-based alloys]. Fundamental Aspects of Structural Alloy Design. Ed.: R.I.Jaffee and B.A. Wilcox. Battelle Institute Materials Science Colloguia, 1975, pp. 86–111. (in Russian).

15. Francisca G. Caballero, Rosalia Rementeria, Lucia Morales-Rivas, Miguel Benito-Alfonso, Jer-Ren Yang, David de Castro, Jonathan D. Poplawsky, Thomas Sourmail and Carlos Garcia-Mateo. Understanding Mechanical Properties of Nano-Grained Bainitic Steels from Multiscale Structural Analysis. Metals. 2019, no. 9, pp. 426. URL: https://doi.org/10.3390/met9040426

16. Toji Yuki, Matsuda Hiroshi and Raabe Dierk. Effect of Si on the acceleration of bainite transformation by pre-existing martensite. Acta Materialia. 2016, no. 116, pp. 250–262. URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.044

17. Kawata H., Hayashi K., Sugiura N., Yoshinaga N. and Takahashi M. Effect of martensite in initial structure on bainite transformation. Mater. Sci. Forum. 2010, no. 638–642, pp. 3307–3312. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.3307

18. Decheng Jia, Dongyun Sun, Qingchao Wang, Feng Liu, Yanguo Li, Sujuan Yuan, Zhinan Yang and Fucheng Zhang. Effects of Preformed Martensite on Microstructure and Mechanical Properties of Nanobainite Bearing Steel. Metals. 2023, no. 13, pp. 99. URL: https://doi.org/10.3390/met13010099

19. Peter Kirbiš, Ivan Anžel, Rebeka Rudolf and Mihael Brunčko. Novel Approach of Nanostructured Bainitic Steels' Production with Improved Toughness and Strength. Metals. 2020, no. 13, pp. 1220. URL: https://doi.org/10.3390/ma13051220

20. Mateusz Morawiec, Jarosław Opara and Adam Grajcar. Nanobainite formation in high-Al medium-Mn steels : thermodynamic approach. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024. URL: https://doi.org/10.1007/s10973-024-13441-9

21. Zhou Y.X., Song X.T., Liang J.W., Shen Y.F. and Misra R.D.K. Innovative processing of obtaining nanostructured bainite with high strength – high ductility combination in low-carbon-medium-Mn steel : Process-structure-property relationship. Materials Science and Engineering : A. 2018, no. 718, pp. 267–276. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.120

22. Avanish Kumar, B. Blessto and Aparna Singh. Development of a low-carbon carbide-free nanostructured bainitic steel with extremely high strength and toughness. Materials Science and Engineering : A. 2023, no. 877, pp. 145–186. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145186

23. Speer John G., Edmonds David V., Rizzo Fernando C. and Matlock David K. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation. Solid State and Materials Science. 2004, no. 8, pp. 219–237. URL: https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.003

24. Speer J., Matlock D.K., De Cooman B.C. and Schroth J.G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. Acta Materialia. 2003, no. 51, pp. 2611–2622. URL: https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00059-4

25. Santofimia M.J., Zhao L. and Sietsma J. Overview of Mechanisms Involved During the Quenching and Partitioning Process in Steels. Metallurgical and Materials Transactions : A. 2011, no. 42A, pp. 3620–3626. URL: https://doi.org/10.1007/s11661-011-0706-z

26. Clarke A.J., Speer J.G., Miller M.K., Hackenberg R.E., Edmonds D.V., Matlock D.K., Rizzo F.C., Clarke K.D. and De Moor E. Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition (Q&P) process : a critical assessment. Acta Materialia. 2008, no. 56 (1), pp. 16–22. URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.08.051

27. Xiaolu Gui, Guhui Gao, Haoran Guo, Feifan Zhao, Zhunli Tan and Bingzhe Bai. Effect of bainitic transformation during BQ&P process on the mechanical properties in an ultrahigh strength Mn–Si–Cr–C steel. Materials Science and Engineering : A. 2017, no. 684, pp. 598–605. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.097

28. Yuyin Huang, Qiangguo Li, Xuefei Huang and Weigang Huang. Effect of bainitic isothermal transformation plus Q&P process on the microstructure and mechanical properties of 0.2C bainitic steel. Materials Science and Engineering : A. 2016, no. 678, pp. 339–346. URL: https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.011

29. Krzysztof Wasiaka, Monika Wesierska-Hincaa, Emilia Skoleka, Wieslaw A. Swiatnickia and Andrzej Wieczorekb. Effect of a novel Bainitization Quenching & Partitioning heat treatment on multiphase microstructure evolution and properties of carburized Cr–Mn–Si alloyed steel. SSRN Electronic Journal. 2022. URL: https://doi.org/10.2139/ssrn.4021764

Надійшла до редакції: 12.05.2025.