

УДК 669-413:669.018

**Г. А. Кононенко**<sup>1</sup>, д.т.н., ст. дослідник, ORCID 0000-0001-7446-4105**Т. В. Кімстач**<sup>1,2</sup>, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8993-201X**О. А. Сафронова**<sup>1</sup>, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-4032-4275**Р. В. Подольський**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*<sup>2</sup> *Український державний університет науки і технологій*

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ БРОНЬОВОЇ СТАЛІ (ОГЛЯД)

**Анотація.** Постійне підвищення вимог до захисту бронетехніки, викликане удосконаленням високоефективних стрілецьких засобів ураження та диктує необхідність пошуку нових підходів до підвищення динамічної стійкості броньових сталей з використанням сучасних металургійних, матеріалознавчих та конструктивних досягнень. Розробка та проектування працездатних матеріалів та конструкцій броньового захисту є складною науково-технічною проблемою. Метою роботи є визначення перспективних напрямків удосконалення складів та технологій обробки високоміцних сталей для виготовлення товстолистового прокату відповідального призначення, що забезпечить підвищення експлуатаційних характеристик броні. В роботі розглянуті вимоги щодо фізико-механічних та балістичних характеристик листового прокату для виготовлення бронеперешкод. Проаналізовано вплив легування на властивості високоміцних сталей, що застосовуються в даний час для виготовлення засобів бронезахисту. Розглянуті сучасні тенденції до підвищення їх якості. Проаналізовано види термічного оброблення товстолистового прокату, їх вплив на формування структури та комплексу механічних властивостей, бронестійкості та живучості елементів спецпродукції. За результатами досліджень у роботі встановлено, що перспективним напрямом отримання високого комплексу міцності і в'язкості, а також балістичних характеристик конструкційних сталей є формування структури дрібнодисперсного бейнітного фериту без виділення карбідів цементитного типу в поєднанні зі стабільним залишковим аустенітом. Формування такої структури досягається завдяки комплексному легуванню сталі хімічними елементами, що дозволяють практично повністю пригнічити процеси утворення карбідів у бейнітному фериті (кремній, алюміній, кобальт, нікель).

**Ключові слова:** гомогенна товстолиста сталь, твердість, міцність, ударна в'язкість, бейнітний ферит, термічна обробка.

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

**Актуальність.** На сьогоднішній день активно розвиваються засоби захисту всіх видів бронетехніки від ураження стрілецькою зброєю, розробляються нові марки сталей із підвищеними показниками протиснарядної стійкості, що забезпечують зниження металоємності конструкцій за одночасного підвищення тактико-технічних характеристик виробу. При розробці броні основною метою є створення найлегшої та найпростішої її структури, що надійно захищає від пробивання [1], яка може бути досягнута шляхом комплексного вирішення наступних питань [2]:

- удосконалення традиційних та розробка нових хімічних складів броньових матеріалів;
- застосування більш досконалих методів виплавки, розкислення та розливання, що забезпечують чистоту сталі по неметалевим включенням та газам, а також сприятливу макроструктуру без зональної ліквіації та високу ізотропність властивостей;
- застосування інтенсивних методів термічної та термомеханічної обробок, що різко подрібнюють структуру та субструктуру сталі;
- удосконалення режимів зміцнюючої термічної обробки, що дозволить підвищити рівень механічних властивостей та характеристики балістичного захисту броні за рахунок формування структури нижнього безкарбідного бейніту;
- розробка режимів різання, зварювання, обладнання та інструменту для механічної обробки високоміцних сталей тощо.

Таким чином, завдання розробки нових видів та складів броньових матеріалів, підвищення їх механічних та експлуатаційних характеристик залишається актуальним.

**Мета дослідження.** На підставі аналізу літературних джерел визначити перспективні напрямки удосконалення складів та технологій обробки високоміцних сталей для виготовлення товстостінового прокату відповідального призначення. З урахуванням отриманих даних встановити шляхи підвищення експлуатаційних характеристик броні.

**Стан питання.** Основною завдання при проєктуванні нових броньових перешкод та броні для бронетехніки є розробка та впровадження нових матеріалів на основі високоміцних сплавів, що володіють комплексом механічних властивостей. В даний час забезпечення високої динамічної стійкості броні проти сучасних засобів ураження без збільшення її товщини і, відповідно, маси конструкції в цілому досягають за рахунок застосування різних неметалевих матеріалів (бронекераміки, високоміцних тканин і т.д.) [3-5]. Основним матеріалом для виготовлення броні є високоміцна сталь.

За способом виробництва броньову сталь поділяють на катану та литу. Катана броня перевершує литу протиснарядною стійкістю при

однаковій твердості [6].

За призначенням розрізняють броню: протикульову, протиснарядну та конструкційну.

Залежно від застосування, існує три основних види сталей для бронювання [7]:

- сталі для бронювання важкої техніки (танкова броня) Ці сталі повинні витримувати влучення без розколу великокаліберних снарядів (вимога живучості), а також забезпечувати вимоги щодо зварюваності (відпуск зварних з'єднань не допускається). Товщина листа від 80 до 380 мм. У танках товщина може досягати до 9,5 см. Така масивна броня здатна витримувати лобове попадання артилерійських снарядів, проте її застосування недоцільне у зв'язку зі значним обтяженням танка та великими витратами палива;

- сталі для бронювання легкої техніки. Ці сталі повинні витримувати без розколу попадання великокаліберних куль (вимога живучості), а також забезпечувати вимоги щодо зварюваності (за умови відпуску зварних з'єднань). Її стандартна товщина складає 50- 80 мм;

- сталі широкого спектра застосування. Вимоги до сталей: витримувати без розколів та появи тріщин у місцях влучення снарядів калібру 20 мм. Сюди належить матеріал, товщина якого не перевищує 50 мм. Застосовуються для виготовлення індивідуальних бронешитів, сейфів, металевих шаф.

За внутрішньою будовою та механічними властивостями сталеву броню поділяють на два типи: гомогенну та гетерогенну [6]:

- гомогенна броня – захисний однорідний шар матеріалу, який має підвищену міцність і має по всьому перерізу відносно однорідний хімічний склад та властивості;

- гетерогенна броня – має різні механічні властивості по товщині листа.

У роботах [6,8] наголошується, що найбільшого поширення при виробництві сучасного спеціального обладнання набула гомогенна броня.

Гомогенна броня буває трьох типів [9-10]:

- високої твердості ( $\sigma_B$  – не менше 1500 МПа, твердість – 514 ... 363 НВ), застосовують як протикульову, а також для захисту від снарядів малих калібрів;

- середньої твердості ( $\sigma_B$  – не менше 950 МПа, твердість – 341 ... 285 НВ), використовують для виготовлення корпусів та веж сучасних основних бойових танків;

- низької твердості ( $\sigma_B$  – не менше 700 МПа, твердість – 255 ... 217 НВ), використовують для виготовлення окремих деталей корпусу, оскільки має хороші показники захищеності від великокаліберних снарядів, тому що має високу в'язкість.

Основними вимогами до броньової сталі є: висока стійкість (опір впливу куль та снарядів) та живучість (здатність не руйнуватися при багаторазових попаданнях снарядів).

Для забезпечення цих вимог листовий прокат із броньової сталі повинен мати високу міцність і твердість (до HRC 57-58) при збереженні пластичних характеристик та в'язкості (відносно звуження залежно від засобів ураження від 25 до 40%). Твердість сталі безпосередньо впливає на балістичний захист, а ударна в'язкість необхідна для забезпечення поглинання енергії вибухової хвилі. Твердість і ударна в'язкість – дві характеристики, які перебувають у постійному протиріччі [11].

Броньова сталь повинна мати також комплекс технологічних властивостей [12-13]: зварюваність та мінімальним зміцненням при зварюванні для забезпечення стійкості та живучості зварних з'єднань; оброблюваність різанням; технологічністю при правці, згинанні, штампуванні.

Важливим завданням для виготовлення броні є надання металу таких властивостей, щоб він міг рівномірно розподіляти кінетичну енергію, з якою він стикається при попаданні снаряда. Це дозволяє значно знизити точкове пошкодження, що, в кінцевому рахунку, і захищає броньову сталь від проникних пошкоджень [7].

**Результати.** Як зазначалося раніше, основним матеріалом для виготовлення броні є високоміцна легована сталь. Як основні легуючі елементи броньової сталі застосовують нікель, марганець, хром, молібден, кремній. Композиція легуючих елементів та їх вміст у броньових сталях різні та залежать від призначення броньових деталей. Хімічний склад та механічні властивості типових представників броньових сталей наведені у табл. 1 [2-3,14-19].

На якість броні найінтенсивніше впливає вуглець. Збільшення вмісту підвищує твердість, але різко збільшує крихкість, знижує в'язкість броні, погіршує її зварюваність. Погіршення зварюваності броньових сталей, при підвищенні вмісту вуглецю, проявляється у підвищеній схильності металу зони термічного впливу до утворення холодних тріщин внаслідок формування в металі загартованих структур та збільшення рівня залишкових напружень. Наявність таких факторів в зоні термічного впливу зварних з'єднань корпусів машин призводить до катастрофічного зниження їхньої динамічної живучості, особливо при низьких температурах. Зазначено [20], що зниження вмісту вуглецю нижче 0,27 % (мас.) недоцільне через зменшення твердості сталі, а підвищення його концентрації вище 0,48 % (мас.) [17] призводить до небажаного окрихчування, а також до підвищення значень вуглецевого еквівалента, що погіршує зварюваність металу.

Таблиця 1 – Хімічний склад та механічні властивості броньових сталей [2-3, 14-15, 17-19].

Марка сталі	Вміст елементів, % мас										Інші
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	B	S	P		
<i>Фінляндія</i>											
MiluxProtection 400	<0,24	<1,70	<0,70	<1,50	<0,70	<0,50	<0,004	<0,015	<0,030		–
MiluxProtection 500	<0,30	<1,70	<0,70	<1,50	<0,80	<0,50	<0,004	<0,015	<0,030		–
<i>Швеція</i>											
Armox 370T Class 1	<0,32	<1,20	<0,40	<1,00	<1,80	<0,70	<0,005	<0,030	<0,010		–
Armox 370T Class2											–
Armox 500 T	<0,32	<1,20	<0,40	<1,01	<1,81	<0,70	<0,005	≤0,010	<0,015		–
<i>США</i>											
4340 TOD, (40XH2MФ)	0,37-0,43	0,60-0,80	0,15-0,30	0,70-0,90	1,65-2,00	0,20-0,30	–	<0,040	<0,035		–
<i>Франція</i>											
MARS 190	<0,30	<1,00	<0,4	<1,10	<2,00	<0,45	–	<0,005	–		–
MARS 240	<0,30	<1,00	<0,4	<1,60	<1,80	<0,60	–	<0,020	<0,010		–
MARS 270	<0,35	<1,00	<0,4	<0,75	<3,10	<0,40	–	<0,020	<0,010		–
<i>СНТ</i>											
БТ70Ш	0,32-0,37	0,35-0,55	1,30-1,60	0,90-1,10	2,20-2,40	0,25-0,35	–	≤0,012	≤0,010		–
42СМ	0,40	0,50	1,35	1,50	1,60	0,40	–	–	–		–
71	0,29- 0,36	0,60- 1,00	1,20- 1,50	1,50-2,00	2,00-2,40	0,45-0,55	–	≤0,003	≤0,012		0,18-0,25 V 0,005-0,025 Ti 0,015-0,025 Al
44 (45XHМФА)	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	0,80-1,10	1,30-1,80	0,20-0,30	–	–	–		0,10-0,18 V

Продовження табл. 1.

Марка сталі	Товщина, мм	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_v$ , МПа	Твердість, НВ	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	Ударна в'язкість
<i>Фінляндія</i>							
MiluxProtection 400	30-120	1100	1400	380-480	8		30 по Шарпі, -40°C, Дж
MiluxProtection 500		1250	1600	450-540	8		25 по Шарпі, -40°C, Дж
<i>Швейція</i>							
Аппох 370Т Class 1	40-80	850	950-1150	300-350	12		30 по Шарпі, -40°C, Дж
Аппох 370Т Class2	3-150	800	900-1100	280-330	13		40 по Шарпі, -40°C, Дж
Аппох 500 Т	3-80	1250	1450-1750	480-540	8		32 по Шарпі, -40°C, Дж
<i>США</i>							
4340 TOD, (40ХН2МФ)	–	470	745	–	22	50	–
<i>Франція</i>							
MARS 190	51-500	–	900	≤388	–	–	–
MARS 240	38-50	1100	1600	450-534	9	–	16 по Шарпі, -40°C, Дж
MARS 270	25-75	–	1700	477-534	–	–	–
<i>СНГ</i>							
БГ70ПШ	–	1650-1750	1850-2000	470-500	10,5-13,0	35-40	0,55-0,65 МДж/м <sup>2</sup>
42СМ	–	814-853	961-1020	–	16-18	63-71	0,69-1,08 МДж/м <sup>2</sup>
71	–	1470- 1660	1750- 1960	476-538	≥7	≥15	КСУ <sup>+20</sup> , ≥68,6 Дж/см <sup>2</sup> КСУ <sup>-40</sup> , ≥29,4 Дж/см <sup>2</sup>
44 (45ХНМФА)	–	1550-1700	2050-2100	560-610	8-10	30-40	0,5-0,6 МДж/м <sup>2</sup>

Використання при виготовленні зварювальної броні для танко- та суднобудування (товщиною 20...100 мм) сталі з концентрацією вуглецю понад 0,4% вимагає застосування досить складних режимів зварювання та термічної обробки зварних з'єднань.

Введення в броньову сталь як легуючих елементів марганцю, нікелю, хрому і молібдену сприятливо позначається на зносостійкості сталі. Однак вміст цих елементів має бути суворо обмежений, виходячи з економічних та технологічних аспектів вирішення питання щодо розробки матеріалу.

Марганець збільшує характеристики міцності і підвищує прогартовуваність броні. Слід зазначити, що прогартовуваність по всій товщині листа є важливою та обов'язковою умовою високої зносостійкості сталі для відповідальних виробів. Марганець надає гарних ливарних якостей. При збільшенні вмісту його в сталі до 2% (мас.), монотонно підвищується тимчасовий опір руйнуванню при розтягуванні, але підвищення границі плинності зберігається при додаванні Mn тільки до 1,5% (мас). Ударна в'язкість знижується зі збільшенням концентрації Mn і особливо інтенсивно при вмісті його вище 1,5% (мас.). Підвищення вмісту марганцю призводить до подрібнення зерна фериту та збільшення частки зміцнюючої фази, а при концентрації більше 1,7% (мас.) відбувається утворення дрібнозернистого бейніту та острівцевого мартенситу.

Нікель збільшує в'язкість і міцність броні, покращує зварюваність, підвищує прожарювання. Однак підвищення вмісту нікелю вище 2% (мас.) призводить до зниження температури початку мартенситного перетворення, що підвищує кількість залишкового аустеніту та може несприятливо впливати на зварюваність сталі. У роботі [2] виявлено важливу закономірність, що зв'язує живучість броні при температурі - 40 °C із вмістом нікелю. Встановлено [2], що для забезпечення задовільної живучості при твердості 401 HB за Брінеллем необхідно не менше 4,0% (мас.) Ni; для 363 HB – 3% (мас.) Ni, а для 321 HB, що характерно для серійної броні, достатньо 2% (мас.) Ni.

Хром підвищує міцність, пластичність конструкційних сталей, особливо у поєднанні з нікелем, зменшує схильність сталі до перегріву, покращує прожарювання. Але разом з тим хромисті сталі чутливі до відпускнуї крихкості, уникнути появи якої можна за рахунок їх додаткового легування молібденом. Хром підвищує корозійну стійкість сталі, збільшує її електричний опір та зменшує коефіцієнт лінійного розширення.

Молібден зменшує крихкість броньової сталі при відпуску, полегшує механічну обробку і збільшує мартенситну та бейнітну прогартовуваність (особливо в присутності нікелю) [21]. Сприяє

подрібненню зерна, підвищує корозійну стійкість.

Перспективним напрямом отримання високого комплексу міцності і в'язкості конструкційних сталей є формування структури дрібнодисперсного бейнітного фериту без виділення карбідів цементитного типу в поєднанні зі стабільним залишковим аустенітом [22-24]. Формування такої структури досягається завдяки комплексному легуванню сталі хімічними елементами, що дозволяють практично повністю придушити процеси утворення карбідів у бейнітному фериті (кремній, алюміній, кобальт, нікель) [23, 25-26] та/або відповідної термічної обробки. У роботі [27] зазначено, що для одержання структури безкарбідного бейніту конструкційні сталі доцільно легувати марганцем та кремнієм (або алюмінієм) у певному співвідношенні. За даними роботи [28] легування кремнієм сплавів системи ХЗГЗМФС сприяє протіканню бейнітного перетворення за безкарбідною схемою.

Однак при вмісті Si більше 2% (мас.) дуже проблематично отримати структуру нижнього безкарбідного бейніту при безперервному охолодженні. Це пов'язано з тим, що із збільшенням концентрації кремнію знижується стійкість переохолодженого аустеніту в області перлітного перетворення і підвищується в області бейнітного перетворення.

Слід зазначити, що до складу броньових сталей провідних світових виробників (див. таблицю 1) для забезпечення високого рівня міцності та твердості, а також підвищення прогартовуваності додається бор. Оптимальною кількістю бору з точки зору забезпечення цієї характеристики, є 0,0003-0,01% (мас.). Ефективне також введення в сталь бору для підвищення границі пропорційності. За даними [29] найбільш ефективно використання бору спільно з міддю; так, присадка до 0,5% (мас.) Си в мікролегування (до 0,003% (мас.)) в сталь дозволяє підвищити розчинність бору в аустеніті і запобігти виділенню крихкої фази, що містить бор, на границях аустенітних зерен. У сталях із більш високим вмістом бору (0,003–0,005 % (мас)), додатково легуваних міддю, бориди рівномірно виділяються в середині та по границям зерен у вигляді невеликих рівновісних включень. Сталь з бором і міддю після термічної обробки має більш високу міцність і, особливо, ударну в'язкість у порівнянні з сталлю, що містить бор без міді. Однак мікролегування сталей бором ускладнює технологію отримання металу практично на кожному переділі і вимагає досить високої культури виробництва, що є стримуючим фактором широкого його використання.

До зарубіжних сталей висувають більш жорсткі вимоги до вмісту шкідливих домішок (сірки та фосфору), які знижують пластичність та



сприяють розвитку відпускної крихкості.

Для отримання дрібнозернистої сталі найбільш ефективне комплексне мікролегування двома карбід- або нітридоутворюючими елементами, у яких температура переходу відповідних фаз у твердий розчин різна. Таким чином, підвищення комплексу механічних властивостей та бронестійкості броні можливе за рахунок ефективного мікролегування елементами V, Ti, Nb.

У роботі [30] запропоновано додаткове введення до складу броньової сталі, % (мас.): (0,01-0,05%) Al, (0,005-0,020%) N, ( $\leq 0,05$ ) Nb та ( $\leq 0,50$ ) Cu, що при певному співвідношенні основних легуючих елементів, сприяє отриманню високих характеристик міцності броньової сталі, при досить високому рівні пластичності і в'язкості. Броня, виготовлена із запропонованої сталі, характеризується підвищеною протиснарядною стійкістю та живучістю.

Істотне значення в підвищенні якості броньової сталі має застосування сучасних методів виплавки: електрошлакового (ЕШП), вакуумного дугового (ВДП), вакуумно-індукційного (ВІП) переплавів. Численними дослідженнями показано, що ці методи виплавки зменшують вміст неметалевих включень і газів [31].

Броньовий захист повинен мати рівень механічних властивостей, що дозволяють їй тривалий час перебувати під постійним обстрілом без проникнення снарядів. Цей рівень досягається термічною обробкою броньових листів. Термічна обробка товстостісового прокату для виготовлення елементів конструкцій суден, бронетехніки, елементів броні стаціонарних об'єктів та інших металовиробів відповідального призначення є технологічною операцією, що визначає кінцевий комплекс механічних властивостей готового виробу.

Одним із найважливіших показників якості броньового захисту є твердість. Найбільш поширений спосіб отримання високої твердості – це загартування сталі та низький відпуск. Однак після низького відпуску броньові сталі при снарядному обстрілі мають схильність до крихких руйнувань після зварювання внаслідок зварювальних напружень [2].

Утворення тріщин і відколів у низьковідпущеній сталі пояснюється високим рівнем залишкових загартованих напружень, що зростають із збільшенням товщини броні (при товщині 80 мм напруження досягають  $80 \text{ кгс/мм}^2$  [32]). Крім того, мартенситна структура [33] відрізняється наявністю в мікрообсязі сталі "пікових" напружень, що значно перевершують середнє зональне напруження. Це пов'язано з неоднорідністю структури по границям та об'єму зерна, утворенням пружно спотворених областей з малорухливими дислокаціями, які є концентраторами напружень та осередками зародження тріщин. Всі ці

явища посилюються з підвищенням вмісту вуглецю в сталі.

Більш перспективним способом підвищення твердості, заснованим на дисперсійному твердінні легованої сталі, є загартування з високим відпуском. При цьому можуть бути отримані механічні властивості, аналогічні властивостям низько відпущених сталей, але при цьому магі значно вищий опір крихкому руйнуванню, у зв'язку з повним усуненням напружень загартування [2]. Загартування з високим (500-650 °С) відпуском зумовлює отримання високих характеристик пластичності та запасу в'язкості матеріалу, що забезпечують живучість (відсутність схильності до крихких руйнувань-розколів та тильних сколів). При цьому рівень характеристик міцності ( $\sigma_v$  - тимчасовий опір руйнуванню при розтягуванні) знаходиться, як правило, в межах 850-1100 МПа.

Підвищення фізико-механічних властивостей можливе також за рахунок зміни структури броньової сталі (отримання зерна з балами 11-12) [2].

Разом з тим останніми роками стали відомі дослідження іноземних фахівців, спрямовані на підвищення комплексу механічних властивостей, бронестійкості та живучості елементів спецпродукції.

Одним з перспективних напрямків отримання надвисокоміцних сталей ( $\sigma_v \leq 2000$  МПа з задовільним рівнем пластичності), при економному їх легуванні, є також технологія термічної обробки Quenching-and-Partitioning (Q-n-P) або TRIP-effect. Ця технологія застосовується на складнолегованих сталях: 30X9H8M4Г2С2, 25Н25М4Г1 та інші. Після загартування з 1000-1100 °С у сталях формується аустенітна структура, оскільки температура початку мартенситного перетворення має значення менше нуля градусів. При наступній пластичній деформації (ступінь обтиснення 50-80%) при 450-600 °С (нижче за температуру рекристалізації) відбувається наклеп аустеніту та його збіднення вуглецем і легуючими елементами за рахунок виділення карбідів (дисперсійне зміцнення). В результаті збільшуються температури  $M_n$  і  $M_s$  ( $M_s$  перевершує 20 °С). У процесі охолодження аустеніт стає метастабільним і при повторній деформації зазнає мартенситного перетворення. В результаті загартування, наклепу та деформаційного старіння аустеніт TRIP-сталі набуває оптимальних механічних властивостей: високу міцність ( $\sigma_b=1800-2000$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1400-1700$  МПа), хорошу пластичність  $\delta \geq 20\%$ . Недоліки даної технології полягають у високій легованості сталі, необхідності потужного обладнання для проведення деформації за порівняно низьких температур і труднощів у зварюванні.

Для протикульної броні компанія Tata Steel отримала ліцензію на використання "super-bainitic" високоміцних броньових сталевих листів Pavise™ SBS 600, що представляють новий тип надміцного захисту.

Після термообробки та введення добавок матеріал набуває надвисокої міцності бейніту. "Super-bainitic" сталь має границю міцності при розтягуванні 2500 МПа, твердість HV 600-670 при досить високому рівні ударної в'язкості. Але метал такого виробу має недостатній рівень в'язкості та пластичності для протиснарядної броні. Крім цього, такий високий рівень міцності та твердості складно досягти при товщині прокату понад 40 мм.

Типовими представниками цього класу є броньові сталі марки MARS 190 (Франція) та ARMOX 370S (Швеція). Найкращі зарубіжні виробники товстого листа для броні важкої техніки використовують сталі, вимоги до яких регламентуються стандартом MIL-A-12560 "Armorplate, steel, wrought, homogeneous. For use in combat-vehicles and for ammunition testing». Середні значення границі міцності таких сталей лише на рівні 900 МПа при товщині листа 51-500 мм і твердості - до 388HV. Обмеження твердості пов'язане з необхідністю забезпечення достатнього рівня пластичності та в'язкості.

У роботі [34] сталеві листи RHA (прокатані зразки сталі з гомогенної броні) піддавалися різним ізотермічним та відпускним термообробкам для отримання зразків з бейнітною та бейнітно-мартенситною змішаною мікроструктурою (рис 1).

Сталі RHA (MIL-A-12560) були піддані ізотермічній термообробці при трьох різних температурах, одна з яких (360°C) була вищою за температуру початку утворення мартенситу  $M_s$  336°C, а дві інші 320°C і 270°C мали нижчу температуру  $M_s$ . Для оцінки характеристик балістичного захисту було визначено втрати кінетичної енергії кулями 12,7 мм, (табл. 2). Балістичний захист та властивості цих зразків були порівняні з характеристиками звичайного зразка RHA. Було виявлено, що зразки з переважно бейнітною мікроструктурою забезпечують більш високий балістичний захист, ніж звичайний зразок RHA. Це спостереження дозволило встановити, що можна поліпшити балістичні властивості з допомогою бейнітних мікроструктур навіть у броньовій сталі звичайного хімічного складу. Також автори роботи помітили, що результати звичайних випробувань на твердість і удар нехаєй не вказують безпосередньо на характеристики балістичного захисту, але ці виміри все ж таки дають уявлення про переважну механічну поведінку, яку слід очікувати при балістичних випробуваннях.

Перспективність одержання мікроструктури бейніту була підтверджена ізотермічною обробкою зразка при 360°C. Забезпечення підвищення балістичного захисту приблизно на 10% вище порівняно із звичайним зразком RHA із мікроструктурою відпущеного мартенситу. При зниженні температури  $M_s$  балістичні характеристики ізотермічно оброблених зразків знижувалися.

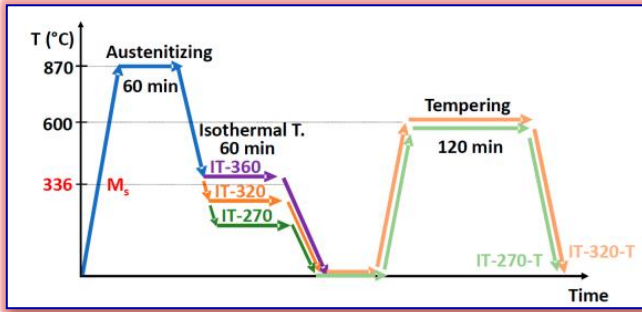


Рисунок 1 - Режими термічної обробки броньової сталі [34].

Таблиця 2 – Балістичні характеристики броньової сталі [34]ю

Обробка	Середня втрата кінетичної енергії кулі, %	Зміна балістичних характеристик по відношенню до зразка RHA, %
RHA	31,0±2,3	-
IT-360	34,0±2,0	+9,9
IT-320	32,3±0,7	+4,2
IT-270	25,2±1,4	-18,6
IT-270-T	29,0±0,2	-6,5
IT-320-T	28,8±1,5	-7,2

## Висновки

1. Основними вимогами до механічних властивостей листового прокату з броньової сталі є висока міцність та твердість (до HRC 57-58), при цьому збереження пластичних характеристик та в'язкості (відносне звуження залежно від засобів ураження від 25 до 40%). Висока стійкість (опір впливу кулі і снарядів) та живучість (здатність не руйнуватися при багаторазових попаданнях снарядів) також є важливими характеристиками листового прокату для броньової сталі.

2. Основним матеріалом для виготовлення броні є міцна легована сталь. Основними елементами є нікель, марганець, хром, молібден, кремній. Як легуючі елементи застосовують введення марганцю, нікелю, хрому і молібдену, для підвищення зносостійкості сталі. Введення цих елементів має бути суворо обмежене виходячи з економічних та технологічних аспектів вирішення питання щодо розробки матеріалу

3. В силу достатньої надійності та універсальності знайшли широке застосування для виготовлення броньових захистів конструкційної броні з високоміцної сталі, які поряд з високою твердістю мають досить високі показники пластичності та в'язкості. Перспективним напрямом

отримання високого комплексу міцності і в'язкості конструкційних сталей є формування структури дрібнодисперсного бейнітного фериту без виділення карбідів цементитного типу в поєднанні зі стабільним залишковим аустенітом. Формування такої структури досягається завдяки комплексному легуванню сталі хімічними елементами, що дозволяють практично повністю пригнічити процеси утворення карбідів у бейнітному фериті (кремній, алюміній, кобальт, нікель).

### Перелік посилань

1. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 323 p.
2. Високовський С. І., Гуглін Н.Н., Левін Л. С., Маресєв М. І., Філорік'ян Б. К. Про шляхи підвищення протиснарядної стійкості катаної сталевї бронї для танків. Запитання оборонної техніки. Серія XX. Випуск 63. 1976 г. URL : [http://btvt.info/5library/vop\\_1976\\_btk1.htm](http://btvt.info/5library/vop_1976_btk1.htm)
3. Королько С. В. Аналіз і оцінка можливостей застосування сучасних матеріалів для броньованої техніки та захисту особового складу від ураження. *Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 2(42). С. 163-167.
4. Рыбин А. А., Летников А. Ю., Сидоров И. И. Экспериментальный анализ механического поведения полимерных нитей в исходном состоянии и в составе тканей при импульсных нагрузках. *Вопросы оборонной техники*. 2001. № 3. С. 125-126.
5. Дашевская О. Б., Чухин Б. Д., Хромушин В. А. Перспективы совершенствования тканевой защиты для создания средств индивидуальной бронезащиты. *Актуальные проблемы защиты и безопасности*. 2000. Т. 2. 300 с.
6. Шадрин И. Д., Хмельников Е. А., Вендер И. И., Заводова Т. Е., Смагин К. В. Анализ броневой защиты танков. *ИНТЕРЭКСПО*. 2018. № 7. С. 167-177.
7. Як використовується броньова сталь. URL: <https://promplace.ru/vidy-metallov-i-klassifikaciya-staty/bronevaya-stal-1516.htm> (дата звернення 29.10.2023).
8. Броня гомогенна в сучасних танках: міцність, рикошетоспроможність. URL: <https://fb.ru/article/279425/bronya-gomogennaya-v-sovremennyih-tankah-prochnost-rikoshetosposobnost> (дата звернення 29.10.2023).
9. Загорянский В. Г. Оптимизация характеристик противопульной биметаллической брони по критерию предельной скорости пробития. *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2015. № 1 (42). С. 28-34.
10. Тищенко В. І., Грецьких О. В. Особливості дослідження окремих зразків патронів вогнепальної зброї. *Актуальні проблеми вдосконалення чинного законодавства України: Збірник наукових статей*. 2019. №. 49. С. 89-99.
11. Crouch I. G., Cimpoeu S. J., Li H., Shanmugam D. Armour steels. *The Science of Armour Materials*. 2017. P. 55-115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100704-4.00002-5>
12. Barenyi I., Hires O., Liptak P. Changes in Mechanical Properties of Armoured UHSLA Steel ARMOX 500 After Over Tempering. *Problems of Mechatronics, Armament, Aviation, Safety Engineering*. 2013. № 4. P. 7-14.
13. Barenyi I. Secondary processing of UHSLA ARMOX 500 steel with heat based technologies. *University Review*. 2012. Vol. 6, № 2. P. 6-9.

14. Як використовується броньова сталь. URL: <https://promplace.ru/vidy-metallov-i-klassifikaciya-staty/bronevaya-stal-1516.htm> (дата звернення 30.10.2023).
15. The Science of Armour Materials. Edited by Ian G. Crouch. Duxford: Woodhead Publishing, 2016. 754 p.
16. Зносостійка та захисна сталь МІІІLUX. URL: [https://emk24.ru/wiki/spetsialnye\\_stali/iznosostoykie-stali-miilux\\_8710245/](https://emk24.ru/wiki/spetsialnye_stali/iznosostoykie-stali-miilux_8710245/) (дата звернення 30.10.2023).
17. Ultra High Hard Armor–Mars 240 For Sale. Bozhong Metal. URL: <http://surl.li/ppcoz> (дата звернення 30.10.2023).
18. Баби́нец А. А., Рябцев И. А., Панфи́лов А. И. Материалы для индивидуальной бронезащиты (Обзор) *Автоматическая сварка*. 2018. №8. С. 45-51.
19. Чукин М. В., Салганик В. М., Полецков П. П., Бережная Г. А., Гущина М. С., Кузнецова А. С., Алексеев Д. Ю. Аналіз технічних вимог, що пред'являються до наноструктурованого високоміцного листового прокату. URL: <http://surl.li/pprcj> (дата звернення 30.10.2023).
20. Броньована листовая сталь. URL: <https://b-steel.ru/listovoj-prokat-armox>. (дата звернення 30.10.2023).
21. Khan W., Tufail M., Chandio A. D. Characterization of Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Behavior of Ballistic Steels. *Materials*. 2022. №15(6). <https://doi.org/10.3390/ma15062204>
22. Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H. Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. №8. P. 251-257.
23. Kaletin A. Yu., Schastlivtsev V. M., Kareva N. T., Smirnov M. A. Embrittlement of structural steel with a bainitic structure upon tempering. *Fiz. Met. Metalloved.* 1983. №56. P. 366–371.
24. Liu B., Li W., Lu X., Jia X., Jin X. The effect of retained austenite stability on impact-abrasion wear resistance in carbide-free bainitic steels. *Wear*. 2019. Vol. 428–429. P. 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.032>
25. Kaletin Yu. M., Ryzhkov A. G., Kaletin A. Yu. Alloying and heat treatment of steels with bainitic structure. *Springer*. 1987. №29. P.731–735.
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*. 2016. №47A. P. 1028-1039.
27. Setia P., Venkateswaran T., Tharian K. T., Jain J., Sudhanshu S. Singh, Shashank Shekhar Influence of Si content on the microstructure and mechanical properties of silicon stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. P. 142141. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142141>
28. Simonov Y., Georgiev M., Syuzeva E. Onditions of the formation of lower carbidefree-bainite under continuous slow cooling. Scientific proceedigs XII international congress "Machines, technologies, materials". 2015. P. 84-87.
29. Андреев А. К., Ермаков Б. С. Материалы для низкотемпературной техники: учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО. 2016. 355 с.
30. Hakan Atapek S. Development of a New Armor Steel and its Ballistic Performance. *Defence Science Journal*. 2013. № 63(3). P. 271-277. <https://doi.org/10.14429/dsj.63.1341>

31. Григоренко Г. М., Зубер Т. О., Костін В. А., Позняков В. Д. Структура та властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних спеціальних сталей. *Металознавство та обробка металів*. 2018. №4. С. 27-34. <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.027>

32. Немчинский Л. Л. *Металловедение (сборник статей)*. Судпромгиз. 1960, № 4, с. 27.

33. Вылежнев В. Ц, Саррак В. И., Этин Р. И. *Проблемы металлов*. 1972. № 1. с. 190.

34. Konca E. A Comparison of the Ballistic Performances of Various Microstructures in MIL-A-12560 Armor Steel. *Metals*. 2020. №10. P. 446. <https://doi.org/10.3390/met10040446>.

### References

1. Rosenberg, Z. & Dekel, E. (2012). *Terminal Ballistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 323

2. Vysokovskiy, S. I., Huhlin, H.N., Levin, L. S., Maresiev M. I., & Filorikian B. K. (1976). Pro shliakhy pidvyshchennia protysnariadnoi stiikosti katanoi stalevoi broni dlia tankiv [About ways to increase the anti-projectile resistance of rolled steel armor for tanks]. *Questions of defense equipment. Series XX*, 63. [http://btvt.info/5library/vop\\_1976\\_btk1.htm](http://btvt.info/5library/vop_1976_btk1.htm)

3. Korolko, S. V. (2015). Analiz i otsinka mozhlyvostei zastosuvannia suchasnykh materialiv dlia bronovanoi tekhniki ta zakhystu osobovoho skladu vid urazhennia [Analysis and assessment of the possibilities of using modern materials for armored vehicles and protecting personnel from damage]. *Weapon systems and military equipment*, 2(42), 163-167

4. Rybin, A. A., Letnikov, A. Yu. & Sidorov, I. I. (2001). Eksperimentalnyi analiz mehanicheskogo povedeniya polimernykh nitey v ishodnom sostoyanii i v sostave tkaney pri impulsnykh nagruzkah [Experimental analysis of the mechanical behavior of polymer threads in the initial state and as part of fabrics under pulsed loads]. *Defense technology issues*, 3, 125-126

5. Dashevskaya, O. B., Chuhin, B. D. & Hromushin, V. A. (2000). Perspektivy sovershenstvovaniya tkanevoy zaschityi dlya sozdaniya sredstv individualnoy bronezaschityi [Prospects for improving fabric protection for the creation of personal armor protection]. *Current problems of protection and safety*, 2, 300

6. Shadrin, I. D., Hmelnikov, E. A., Vender, I. I., Zavodova, T. E. & Smagin, K. V. (2018). Analiz bronevoy zaschityi tankov [Analysis of armor protection of tanks]. *INTEREXPO*, 7, 167-177

7. Yak vykorystovuietsia bronova stal [How armor steel is used]. <https://promplace.ru/vidy-metallov-i-klassifikaciya-staty/bronevaya-stal-1516.htm>

8. Bronia homohenna v suchasnykh tankakh: mitsnist, rykoshetospromozhnist [Armor is homogeneous in modern tanks: strength, ricochet capacity]. <https://fb.ru/article/279425/bronya-gomogennaya-v-sovremennyih-tankah-prochnost-rykoshetospobnost>

9. Zahorianskyi, V. H. (2015). Optimizatsiya harakteristik protivopulnoy bimetallicheskojbroni po kriteriyu predelnoy skorosti probitya [Optimization of the characteristics of bulletproof bimetallic armor according to the criterion of maximum

penetration speed]. *Processing of solid and laminated materials*, 1 (42), 28-34

10. Tyshchenko, V. I. & Hretskykh, O. V. (2019). Osoblyvosti doslidzhennia okremykh zrazkiv patroniv vohnepalnoi zbroi [Peculiarities of the investigation of the surrounding explosions of fire-fighting cartridges]. *Current problems in the thorough development of official legislation in Ukraine: Collection of scientific articles*, 49, 89-99

11. Crouch, I. G., Cimpoeru, S. J., Li, H. & Shanmugam, D. (2017). Armour steels. *The Science of Armour Materials*, 55-115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100704-4.00002-5>

12. Barenyi, I., Hires, O. & Liptak, P. (2013). Changes in Mechanical Properties of Armoured UHSLA Steel ARMOX 500 After Over Tempering. Problems of Mechatronics. *Armament, Aviation, Safety Engineering*, 4, 7-14

13. Barenyi, I. (2012). Secondary processing of UHSLA ARMOX 500 steel with heat based technologies. *University Review*, 6(2), 6-9

14. Yak vykorystovuietsia bronova stal [How armor steel is used] <https://promplace.ru/vidy-metallov-i-klassifikaciya-staty/bronevaya-stal-1516.htm>

15. The Science of Armour Materials. (2016). Edited by Ian G. Crouch. Duxford: Woodhead Publishing, 754

16. Znosostiika ta zakhysna stal MIILUX [MIILUX wear-resistant and protective steel] [https://emk24.ru/wiki/spetsialnye\\_stali/iznosostoykie-stali-miilux\\_8710245/](https://emk24.ru/wiki/spetsialnye_stali/iznosostoykie-stali-miilux_8710245/)

17. Ultra High Hard Armor–Mars 240 For Sale. *Bozhong Metal*. <http://surl.li/ppcoz>

18. Babynets, A. A., Riabtsev, Y. A. & Panfylov, A. Y. (2018). Materialy dlya individualnoy bronezaschityi (Obzor) [Materials for personal armor protection (Review)]. *Automatic welding*, 8, 45-51

19. Chukin, M. V., Salganik, V. M., Poletskov, P. P., Berezhnaya, G. A., Guschina, M. S., Kuznetsova, A. S. & Alekseev, D. Yu. Analiz tekhnichnykh vymoh, shcho prediavlaiutsia do nanostrukturovanoho vysokomitsnogo lystovoho prokatu [Analysis of the technical requirements for nanostructured high-strength sheet metal]. <http://surl.li/ppcpj>

20. Bronovana lystova stal [Armored sheet steel]. <https://b-steel.ru/listovoj-prokat-armox>.

21. Khan, W., Tufail, M. & Chandio, A. D. (2022). Characterization of Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Behavior of Ballistic Steels. *Materials*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/ma15062204>

22. Caballero, F. G. & Bhadeshia, H. K. D. H. (2004). Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8, 251-257

23. Kaletin, A. Yu., Schastlivtsev, V. M., Kareva, N. T. & Smirnov M. A. (1983). Embrittlement of structural steel with a bainitic structure upon tempering. *Fiz. Met. Metalloved.*, (56), 366–371

24. Liu, B., Li, W., Lu, X., Jia, X. & Jin, X. (2019). The effect of retained austenite stability on impact-abrasion wear resistance in carbide-free bainitic steels. *Wear*, 428–429, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.032>

25. Kaletin, Yu. M., Ryzhkov, A. G. & Kaletin, A. Yu. (1987). Alloying and heat treatment of steels with bainitic structure. *Springer*, 29, 731–735

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*, 47A, 1028-1039

27. Setia, P., Venkateswaran, T., Tharian, K. T., Jain, J., Sudhanshu, S. Singh & Shekhar, S. (2022) Influence of Si content on the microstructure and mechanical properties of silicon stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 142141. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142141>

28. Simonov, Y., Georgiev, M. & Syuzeva, E. (2015). Onditions of the formation of lower carbide-free bainite under continuous slow cooling. *Scientific proceedings XII international congress "Machines, technologies, materials"*, 84-87

29. Andreev, A. K. & Ermakov B. S. (2016). Materialy dlya nizkotemperaturnoy tehniki: ucheb. posobie [Materials for low-temperature equipment: textbook. allowance]. ITMO University

30. Hakan Atapek, S. (2013). Development of a New Armor Steel and its Ballistic Performance. *Defence Science Journal*, 63(3), 271-277. <https://doi.org/10.14429/dsj.63.1341>

31. Hryhorenko, H. M., Zuber, T. O., Kostin, V. A. & Pozniakov, V. D. (2018). Struktura ta vlastyvoli metalu zony termichnoho vplyvu zvarnykh ziednan vysokomitsnykh spetsialnykh staley [The structure and properties of the metal of the heat-affected zone of welded joints of high-strength special steels]. *Metallurgy and metal processing*, 4, 27-34. <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.027>

32. Nemchinskiy, L. L. (1960). Metallovedenye (sbornyk staley) [Metallurgy (collection of articles)]. *Sudpromgiz*, 4, 27

33. Vyilezhnev, V. Ts, Sarrak, V. I. & Entin, R. I. (1972). *Metal problems*, 1, 190.

34. Konca, E. A. (2020) Comparison of the Ballistic Performances of Various Microstructures in MIL-A-12560 Armor Steel. *Metals*, 10, 446. <https://doi.org/10.3390/met10040446>

**G. A. Kononenko**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

**T. V. Kimstach**<sup>1,2</sup>, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8993-201X

**O. A. Safronova**<sup>1</sup>, Ph. D. Student, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4032-4275

**R. V. Podolskyi**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

<sup>2</sup> *Ukrainian State University of Science and Technology*

## **WAYS OF INCREASING THE STABILITY AND SURVIVAL OF ROLLED SHEET MADE OF ARMORED STEEL. (OVERVIEW)**

**Abstract.** The constant increase in the requirements for the protection of armored vehicles, caused by the improvement of highly effective weapons, dictates the need to find new approaches to increase the dynamic stability of armor steels using modern metallurgical, materials science and design achievements. The development and design of workable materials and structures of armor protection is a complex scientific and technical problem. The purpose of the work is to determine the promising directions for improving the composition and processing technologies of high-strength steels for the production of heavy-duty rolled steel, which will ensure an increase in the operational characteristics of armor. The work considers the

requirements for the physical, mechanical and ballistic characteristics of rolled steel for the production of armored barriers. The influence of alloying on the properties of high-strength steels, which are currently used for the manufacture of armor protection, is analyzed. Modern trends to improve their quality are considered. The types of thermal treatment of thick rolled products, their influence on the formation of the structure and complex of mechanical properties, armor resistance and survivability of elements of special products are analyzed. Based on the results of the research, it was established in the paper that the formation of a structure of finely dispersed bainite ferrite without the release of cementite-type carbides in combination with stable residual austenite is a promising direction for obtaining a high complex of strength and viscosity, as well as ballistic characteristics of structural steels. The formation of such a structure is achieved thanks to the complex alloying of steel with chemical elements that allow to almost completely suppress the processes of carbide formation in bainite ferrite (silicon, aluminum, cobalt, nickel).

**Key words:** homogeneous thick sheet steel, hardness, strength, impact strength, bainite ferrite, heat treatment.

**For citation:** Kononenko, G. A., Kimstach, T. V., Safronova, O. A., & Podolskyi, R. V. (2023). Ways of increasing the stability and survival of rolled sheet made of armored steel. (Overview). *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 447-464. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-447-464>

*Стаття надійшла до редакції збірника 15.09.2023 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*