

**Г. А. Кононенко**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7446-4105

**Т. В. Кімстач**, м.н.с., ORCID 0000-0002-8993-201X

**О. А. Сафронова**, м.н.с., ORCID 0000-0002-4032-4275

**Р. В. Подольський**, м.н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641

**О. В. Пучіков**, с.н.с., ORCID 0000-0003-4119-6399

**О. П. Клинова**, провідний інженер

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

## СУЧАСНІ ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ БРОНЕПЕРЕШКОД (ОГЛЯД)

**Анотація.** 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 при одночасному підвищенні тактико-технічних характеристик виробу. Постійне підвищення вимог до захисту бронетехніки, викликане удосконаленням високоефективних стрілецьких засобів ураження, 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 на підставі аналізу літературних джерел основних тенденцій розробки та удосконалення сучасних металевих матеріалів для виготовлення бронеперешкод, які мають високу динамічну стійкість проти сучасних високоефективних стрілецьких засобів ураження. У роботі проведений аналіз найбільш широко використовуваних металевих матеріалів для виготовлення бронеперешкод, представлена інформація про їх переваги та недоліки, дана оцінка перспектив подальшого розвитку цієї галузі. Зазначено, що поточна концепція розробки озброєння спрямована на використання високотехнологічних матеріалів та інноваційних методів, які дозволяють покращувати захисні функції без збільшення маси та розмірів броньового захисту. В даний час для створення засобів бронезахисту використовується безліч різних матеріалів: металеві пластини на основі сталей, титану, алюмінію та їх сплавів, арамідні або поліетиленові волокна, а також кераміки на основі карбідів бору, кремнію та інші. Відповідно до існуючої концепції підвищення ефективності броньового захисту та забезпечення поєднання вогневої потужності, захищеності та мобільності, використання перспективних матеріалів для створення броньового захисту дає додатковий резерв для підвищення бойової та військово-економічної ефективності військової техніки.

**Ключові слова:** броньові сталі, динамічна стійкість, бронетехніка, сплави на основі алюмінію, титанові сплави.

**Посилання для цитування:** Сучасні перспективні металеві матеріали для бронеперешкод (огляд) / Г. А. Кононенко, Т. В. Кімстач, О. А. Сафронова,

Р. В. Подольський, О. В. Пучіков, О. П. Клинова // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 325-342. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-325-342.

**Сучасний стан проблеми.** Розробка нових та удосконалення існуючих вражаючих засобів диктує необхідність в створенні і впровадженні більш сучасних бронеперешкод та захисту від ураження. Існує велика група засобів ураження та боеприпасів проникаючої дії і, залежно від типу цілі та її захищеності, можуть мати різний конструктивний вигляд, використовувати для ураження різні фізичні механізми. Істотною загрозою в цьому випадку становлять кумулятивні снаряди та снаряди кінетичної дії. Механізм проникнення обох видів снарядів має певні фізичні відмінності, тому розрахунок параметрів захисту від даних видів боеприпасів слід проводити по-різному. Захист від кумулятивних снарядів переважно залежить від наявності простору в конструкції і від її ваги. Оптимальний захист від боеприпасів кінетичної дії вимагає потовщення броні для того, щоб зруйнувати сердечник, що проникає [1, 2]. На практиці бронювання, по можливості, має чинити захисну дію подвійного призначення. Вирішення завдання підвищення рівня захищеності визначає підхід до створення всієї системи зразків озброєння та військової техніки. У зв'язку з цим, проблема розробки нових видів і складів броньових матеріалів та підвищення їх механічних та експлуатаційних властивостей є актуальною.

**Мета дослідження.** На підставі аналізу літературних джерел визначити основні тенденції у розробленні та удосконаленні сучасних металевих матеріалів для виготовлення бронеперешкод, які мають високу динамічну стійкість проти сучасних високоефективних стрілецьких засобів ураження.

**Основні результати наукових досліджень.** Сучасне підвищення захищеності військової техніки може забезпечуватися за рахунок застосування нових, перспективних бронезахисних матеріалів. В даний час для створення засобів бронезахисту використовується безліч різних матеріалів: металеві пластини на основі сталей, титану, алюмінію та їх сплавів, арамідні або поліетиленові волокна, а також кераміки на основі карбідів бору, кремнію та ін. У серійному виробництві для виготовлення броні найчастіше використовують високоміцні та ультрависокоміцні спеціальні сталі з тимчасовим опором розриву  $\sigma_b = 1500\text{-}2350$  МПа, з метою легування, в абсолютній більшості випадків, Cr-Ni-Mo та інш. та обмеженням верхнього допустимого вмісту вуглецю (не більше 0,30 % для товщин до 100 мм) [3, 4].

Однією з головних характеристик броньових сталей, що визначає опір проникненню засобів ураження, є твердість, яка забезпечує необхідний балістичний захист. Наряду з високою твердістю броньові сталі повинні

мати досить високі показники пластичності і в'язкості (відносне звуження залежно від засобів ураження від 25 до 40 %) [5], це необхідно для забезпечення поглинання енергії вибухової хвилі, що призводить до деформації металу, але не до його розриву або розколу [5,6]. При цьому, для забезпечення маневреності та високої швидкості транспортних засобів захисний матеріал не повинен бути занадто важким.

Однією з важливих технологічних характеристик броньових сталей є зварюваність [7]. Стійкість металу в області зварних з'єднань повинна дорівнювати стійкості основного матеріалу, що забезпечує цілісність конструкції броньового захисту при впливі засобів ураження. Складністю при зварюванні сталей для броні є висока схильність металу шва і зони термічного впливу до появи холодних і гарячих тріщин, а також утворення структур, які знижують опір зварних з'єднань крихкому руйнуванню. Броньова сталь повинна також мати хорошу оброблюваність різанням, технологічність при правці, згинанні, штампуванні [8, 9].

Для військових об'єктів броньова сталь використовується у вигляді листового прокату і плит: катаних, катаноківаних або литих товщиною до 200 мм і більше. Залежно від спектру застосування, існує три основні види сталей броньового захисту: сталі для бронювання важкої техніки, сталі для бронювання легкої техніки; сталі широкого спектра застосування [10]. Типовими представниками сталей для бронювання важкої техніки є броньові сталі марки MARS 190 (Франція) та ARMOX 370S (Швеція). Сталі ARMOX 300S та ARMOX 400S також відносяться до зазначеного класу міцності, але при цьому через нижчий вміст вуглецю необхідний рівень міцності (твердості) реалізується на цих сталях за рахунок гартування та низького відпустку. В якості сталей, що використовуються до цього класу у країнах СНД слід віднести 42СМ, БТ70Ш.

Типовими представниками сталей для бронювання легкої техніки є броньові сталі марки MARS 240 (Франція), ARMOX 500S (Швеція), 2П, 7 (СНД). Типовими представниками класу сталей широкого спектра застосування є броньові сталі марки MARS 270 (Франція), ARMOX 560S (Швеція), 77 та 88 (СНД).

Склад і механічні властивості деяких марок и броньових сталей представлені у табл. 1 [11-17].

Основний вплив на властивості сталі має вуглець, який забезпечує помірне підвищення міцності сталі. Але його концентрація повинна бути в металі не зварювальної легкої броні на рівні 0,4...0,45 % (мас.), а в сталевій броні, яка зварюється, на рівні до 0,2- 0,25 % (мас.) (і навіть менше). При виготовленні броні для танко- та суднобудування (товщиною 20...100 мм) використовують зварювальну броню з концентрацією вуглецю навіть більше ніж 0,4 % (мас.), але це вимагає застосування досить складних режимів зварювання та термічної обробки зварних з'єднань.

Таблиця 1 – Хімічний склад і механічні властивості броньових сталей [11-17].

Марка сталі	Номинальний хімічний склад	Товщина, мм	Вуглецевий еквівалент	σ <sub>в</sub> , МПа	НВ
MARS 190	0,30C-1,10Cr-2,0Ni-0,45Mo	2 - 50 51 - 500	≤ 0,30 ≤ 0,33	1100 900	≤ 388
MARS 240	0,285C-1,50Cr-1,50Ni-0,30Mo	≤ 38 38 - 50	≤ 0,32	1700 1650	477 - 534 450 - 534
MARS 270	0,35C-0,75Cr-3,10Ni-0,40Mo	< 25 25 - 75	≤ 0,37	2000 1700	534 - 601 477 - 534
MARS 300	0,50C-0,80Si-4,0Ni-0,40Mo	≤ 8	≤ 0,54	2180	578 - 655
ARMOX 300 S	0,18C-1,5Mn-0,4Cr-0,65Mo-0,003B	5 - 60	≤ 0,20	900	280 - 340
ARMOX 400 S				1150	360 - 420
ARMOX 370 S	0,28-1Mn-0,8Cr-1,1Ni-0,65Mo-0,002B	5 - 12,9	≤ 0,30	1300	390 - 440
		13 - 22			350 - 400
		22,1 - 34,9			330 - 380
		35 - 59,9			300 - 350
		60 - 80			265 - 315
ARMOX 500 S	0,28-1Mn-0,8Cr-1,1Ni-0,65Mo-0,002B	6 - 13 13,1 - 50	≤ 0,30	1600	480 - 540 450 - 520
ARMOX 560 S	0,35-1Mn-1,2Cr-3Ni-0,65Mo-0,002B	6 - 20	≤ 0,38	1850	534 - 601
ARMOX 600 S	0,45-0,8Mn-0,8Cr-2,5Ni-0,65Mo-,002B	4 - 10	≤ 0,50	2150	570 - 640
БТ70Ш	0,37C-0,55Mn-1,60Si-1,10Cr-2,40Ni-0,35Mo	—	—	1850-2000	470-500
42СМ	0,40C-0,50Mn-1,35Si-1,50 Cr-1,60 Ni-0,40 Mo	—	—	961-1020	—
2П	—	4 - 7	≤ 0,29	1550	444 - 514
		8 - 14		1450	388 - 495
		15 - 22		1400	363 - 495
77	—	8 - 20	≤ 0,37	1900	477 - 532

Хром підвищує міцність, пластичність конструкційних сталей, особливо в поєднанні з нікелем, зменшує схильність сталі до перегріву, покращує прогартовуваність. Але разом з тим, хромисті сталі чутливі до відпускнуї крихкості, уникнути появи якої можна за рахунок додаткового їх легування молібденом. Ступінь підвищення міцності і в'язкості сталі сильно залежить від кількості хрому. Нікель збільшує в'язкість і міцність броньової сталі, покращує зварюваність, підвищує прогартовуваність, підвищує опір сталі крихкому руйнуванню, зменшує чутливість до концентраторів напружень [15]. Марганець збільшує міцність і підвищує прогартовуваність броньової сталі. Молібден, марганець та кремній підвищують міцність та твердість, не знижуючи в'язкості. Крім того, марганець надає хороші ливарні якості, а молібден зменшує крихкість броні при відпуску, полегшує механічну обробку та збільшує прогартовуваність броні [18-22]. Кремній зміцнює сталь і більше, ніж інші легуючі елементи, підвищує міцність сталі і знижує її в'язкість. Кількість кремнію у сталі має бути достатньою, але не знижувати стійкість проти утворення тріщин [15].

Як було зазначено у роботі [23], що до складу броньових сталей Швеції та Фінляндії для забезпечення високого рівня міцності і твердості, а також підвищення прогартовуваності додається бор. Встановлено, що вже перші добавки бору в кількості 0,001 % викликають різке підвищення прогартовуваності. При подальшому підвищенні вмісту бору аж до 0,008 % прогартовуваність змінюється незначно [24]. Добавка в сталь 0,002- 0,004 % бору поліпшує її будову, усуваючи дендритну структуру. Добавка бору від 0,002 % до 0,007 % підвищує ударну в'язкість після гартування і низького відпуску. Зростає твердість і зносостійкість, гаряча пластичність злитків . При вмісті бору близько 0,01 % і вище в сталі починається проявлятися червоноламкість [24]. Однак мікролегування сталей бором ускладнює технологію отримання металу практично на кожному переділі і вимагає досить високої культури виробництва, що і є стримуючим фактором його широкого використання.

Підвищення комплексу механічних властивостей та живучості броні можливе за рахунок ефективного мікролегування елементами V, Ti, Nb, Ca, Cu, Al. Легування карбонітридоутворюючими елементами забезпечує здрибнення та досягнення однорідного по розміру зерна аустеніту наслідок гальмування його росту у процесі високотемпературного нагріву, а також покращує рівномірність властивостей у шві та у зоні термічного впливу зварювання. До закордонних сталей пред'являють більш жорсткі вимоги щодо вмісту шкідливих домішок (сірки і фосфору), які знижують пластичність і сприяють розвитку відпускнуї крихкості.

Слід відмітити, що пошуки складу сталей для виготовлення кращого типу броні продовжуються. Так, наприклад, Німецька компанія IBD

Deisenroth Engineering працювала спільно зі своїми постачальниками над розробкою нової високоміцної азотистої сталі. У порівняльних випробуваннях з існуючою сталлю Armoх500Z High Hard Armour вона показала, що захист від стрілецьких боєприпасів калібру 7,62x54R може бути досягнутий за рахунок застосування листів, що мають товщину близько 70 % від товщини, необхідної при використанні попереднього матеріалу. Британська Лабораторія оборонної науки та технології DSTL у співпраці з компанією Coras анонсувала броньову сталь, названу Super Bainite. Виготовляється вона за допомогою процесу, відомого як ізотермічне загартування, вона не вимагає дорогих присадок для запобігання тріщиноутворенню в процесі виробництва. Новий матеріал створюється за рахунок нагрівання сталі до 1000 °С, наступного охолодження до 250 °С, потім витримування за цієї температури 8 годин перед остаточним охолодженням до кімнатної температури.

Одним із важливих завдань при бронюванні техніки є зниження маси броні при збереженні/підвищенні балістичного захисту. Використанням тільки броньових сталей цю проблему вирішити не можна. Тому, на сьогоднішній день для виготовлення бронезахисту перспективними матеріалами є дисперсійно зміцнені сплави на основі алюмінію та високоміцні титанові сплави. Незважаючи на те, що алюміній досить м'який метал, броня з його сплавів стала широко застосовуватися для бойової техніки і за багатьма показниками перевершила сталеву броню [25]. Ефективність застосування алюмінію визначається його перевагою перед сталеву броню при забезпеченні захисту від бронейних куль калібру 127 і 145 мм, а також від малокаліберних снарядів. Крім того, алюміній більш технологічний, забезпечений сировинною базою, добре зварюється, має унікальний протимінний та протиуламковий захист [26].

Вперше використання сплавів на основі алюмінію в якості броні для БТТ почалося в США при виготовленні бронетранспортера М113 з алюмінієвим бронекорпусом товщиною 44 мм, який дотепер перебуває на озброєнні країн НАТО. В якості броні був використаний сплав 5083 системи Al-Mg-Mn. Сплав 5083 - конструкційний, корозійностійкий, що зварюється, середньої міцності ( $\sigma_b = 300$  МПа). Найближчим аналогом даного сплаву є сплав АМг5 [27]. Наступним етапом розвитку алюмінієвого бронекорпусного виробництва США став перехід на використання алюмінієвого броньового сплаву 7039 системи Al-Zn-Mg. Ця броня застосовується в бронекорпусах легкого танка М551 та БМП ХМ723 [28]. В Англії для бронювання легкого танка «Скорпіон» та цілого сімейства машин на його базі використовують алюмінієвий сплав Е74S. Товщина броні – 20...60 мм. У Франції розроблено алюмінієву броню - сплав А-Z5-G. З неї виготовлено бронекорпус БМП АМХ-10Р.

У країнах СНД для виготовлення алюмінієвого корпусу плаваючого

танка ПТ-76 використовували конструкційний алюмінієвий сплав Д20.

В якості зварювальної протикульної броні використовують алюмінієвий високоміцний сплав системи Al-Zn-Mg, який в термообробленому стані забезпечує оптимальне поєднання міцності і пластичності. Сплав був стандартизований під найменуванням АБТ-101 (алюмінієва танкова броня) або маркою 1901. Сплав АБТ-101- це термозміцнений деформований складнолегований зварювальний сплав системи Al-Zn-Mg з сумарним вмістом Zn і Mg до 9 % і їх відношенням 2:1. Сплав став основою для проектування цілої серії легкоброньованих бойових машин (БМД-1, БМД-2, БМД-3).

Подальшим етапом розвитку алюмінієвої броні стало створення сплаву АБТ-102 (марка 1903) та шарового матеріалу ПАС-1. Створення цих матеріалів дозволило розробити та запустити у серійне виробництво бойову машину піхоти – БМП-3. Алюмінієва броня даної машини забезпечила економію маси не менше ніж 1500 кг у порівнянні з рівностійким корпусом з броньової сталі [25]. Важливим фактором ефективності використання алюмінієвої броні є можливість її формоутворення шляхом пресування. Прикладом є ребриста, верхньолобова, надмоторна панель зі сплаву АЦМ, яка використовується на БМП-1 і БМП-2, а також профіль «борт - підкрилок», який вирішив серйозну проблему захисту одного з найбільш небезпечних та протяжних зварних швів бойової машини десанту – БМД-1 і БМД-2, «ніша кулеметного гнізда» цих машин та ряд інших профілів [27].

Деякі марки алюмінієвих сплавів, що застосовуються для виробництва броні та їх характеристика представлені у табл. 2 та 3. З аналізу даних табл. 2 і 3 випливає, що алюмінієві сплави АБТ-101 (1901) і АБТ-102 (1903) містять більше Zn і Mg (від 6,8 до 9,2 %) в порівнянні з закордонними сплавами (від 5,0 до 8,8 %). Сплав АБТ-101 містить марганцю в два рази менше, ніж алюмінієві зарубіжні сплави, а сплав АБТ-102, практично не містить його зовсім. Найбільш високий рівень механічних властивостей мають сплави 7020 та 7085, системи легування Al-Zn-Mg та Al-Zn-Mg-Cu.

В даний час ведуться активні роботи зі створення гетерогенних бронеплит із застосуванням алюмінію. Застосування алюмінієвої броні під час використання у засобах індивідуального бронезахисту є перспективним. Як недоліки алюмінієвої броні слід виділити її високу вартість порівняно з бронєю із сталі. Але сучасні технології та сплави з іншими матеріалами дозволили значно скоротити розрив у ціні. Алюмінієва броня є чутлива до високої температури, і при пожежі втрачає значну частину своїх захисних властивостей. Для підвищення міцності доводиться нарощувати шар дюралевої броні, тому серйозну протитанкову броню з дюралю не виробляють. Танки та інші бойові машини з високим рівнем захисту використовують у якості броні сталь [25]. Хоча алюмінієвій

броні не вдалося витіснити сталеву, вона зайняла гідне місце і відмінно справляється з високими вимогами, які до неї пред'являються.

Таблиця 2 – Хімічний склад алюмінієвої броні [28-32].

Країна	Марка сплаву	Zn	Mg	Mn	Cr
		Вміст елементів, % мас			
США	5083	0,25	4,0...4,9	0,4...1,0	0,05...0,25
США	7039	3,5...5,0	2,0...3,8	0,1...0,7	0,05...0,25
Англія	E74S	3,8...4,8	2,0...3,0	0,2...0,4	0,20
Франція	A-Z5-g	4,0...5,0	1,0...1,4	0,05...0,5	0,10...0,35
Німеччина	21/62	5,5...6,5	1,5...2,0	0,1...0,5	0,10...0,50
СНГ	1901	5,4-6,2	2,4-3,0	0,1-0,3	0,12-0,25
СНГ	1903	4,7-5,3	2,1-2,6	0,05-0,15	9,12-0,25

Продовження табл. 2.

Країна	Марка сплаву	Ti	Zr	Fe	Si	Cu
		Вміст елементів, % мас				
США	5083	0,15	—	0,40	0,40	0,10
США	7039	0,10	0,20	0,40	0,30	0,10
Англія	E74S	—	0,20	0,40	0,35	0,10
Франція	A-Z5-g	0,08 ... 0,20 Ti+Zr		0,40	0,35	0,20
Німеччина	21/62	0,10...0,20 Ti+Zr		0,50	0,50	0,10
СНГ	1901	0,03-0,10	0,07-0,12	≤03	≤0,2	≤0,2
СНГ	1903	0,03-0,10	0,07-0,12	≤035	≤0,25	≤0,2

В якості конструкційних матеріалів в сучасній техніці широко використовують титанові сплави, які мають істотну перевагу в порівнянні з традиційними матеріалами на основі заліза та алюмінію завдяки поєднанню ряду унікальних фізико-механічних властивостей. До цих властивостей відносяться: висока питома міцність, корозійна стійкість в атмосфері, морській воді та ряді агресивних середовищ, знижені модулі пружності, тепломіцність, немагнітність, задовільна технологічність. У той же час, як зазначається авторами [32], титанові сплави мають ряд якостей, що перешкоджають широкому їх використанню для виготовлення навантажених деталей транспортних машин наземного застосування. Слід відзначити недостатню зносостійкість і низькі антифрикційні характеристики титанових деталей, знижені характеристики витривалості при циклічному навантаженні, високу чутливість до концентраторів напружень і невисоку контактну міцність при статичних і циклічних навантаженнях.

Таблиця 3 – Механічні властивості алюмінієвої броні для бронетанкової техніки [28-32].

Марка сплаву	Система легування	Вид термообробки	Товщина листа, мм	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа	Межа пластичності, $\sigma_{0.2}$ , МПа	Відносне подовження, $\delta$ , %	Застосування
5083	Al-Zn+Mn	H131 нагартування	6-78	310	255	$\geq 9$	Для протимінного захисту
5059	Al-Zn+Mn	H136	6-78	365	270	$\geq 8$	
5456	Al-Zn-Mn	H151	6-78	340	306	$\geq 6$	
6061	Al-Zn-Si		6-76	380	248	$\geq 10$	Не зварюваний для накладної броні
7039	Al-Zn-Mg	T6 Гартування + штучне старіння	–	422	359	$\geq 9$	Корпусна броня, крім морського застосування
7017	Al-Zn-Mg		12-102	415	345	$\geq 8$	Загального призначення, що зварюється
7020	Al-Zn-Mg		12-102	630	530	$\geq 8$	Для навісних деталей, не зварюється
7085	Al-Zn-Mg-Cu	T711	12-50	537	503	$\geq 12$	Протикольова броня
1901	Al-Zn-Mg	Гартування, 1-я і 2-я сходинки старіння		480	440	$\geq 8$	
1903	Al-Zn-Mg			460	430	$\geq 10$	

Сплави на основі титану умовно можна розділити на зварювальні середньої міцності з границею міцності  $\sigma_B < 1000$  МПа і високоміцні з границею міцності  $\sigma_B > 1000$  МПа. Сплави, що зварюються, мають структуру, яка складається з  $\alpha$ -фази або  $\alpha$ -фази з невеликим (до 2 % за об'ємом) вмістом  $\beta$ -фази [33]. За результатами досліджень броньових характеристик титанових сплавів стосовно виробів бронетанкової техніки та засобів індивідуального бронезахисту [32] було встановлено, що із серійних титанових сплавів оптимальним комплексом броньових властивостей (стійкістю та живучістю) та технологічних характеристик (деформованістю та зварюваністю) володіють сплави ОТ4-1, ВТ4 та ВТ23.

Закордоном для виготовлення броні та деталей бронетехніки активно використовують сплави Ti-6Al-4V, АТІ-Ti-425ТМ, Ti-62S ТМ [34]. Прикладом аналогічних російських сплавів є титанові сплави VST 2 (VST-2E) та VST-2B. Автори [35] вказують на перспективність використання сплаву VST-2B для виготовлення елементів засобів індивідуального бронезахисту різного призначення, а також броньових кришок, люків, навісних деталей бронювання корпусів. Фізико-механічні властивості титанових сплавів наведені в табл. 4 [32].

Слід відзначити, що певні технологічні, економічні та інші аспекти не дозволяють широко використовувати титанові сплави для виготовлення особливо навантажених виробів броньової техніки. Крім деяких деталей легкоброньованої техніки титан у танковій справі практично не застосовується. Проте цей матеріал виявився дуже ефективним як протикульний захист і сьогодні йому практично немає альтернативи для захисту від пістолетних куль зі сталевим сердечником.

Таблиця 4 – Фізико-механічні властивості титанових сплавів [32].

Марка сплаву	Механічні властивості						Щільність $\rho$	Модулі пружності		Питома міцність $\sigma_B/\rho$
	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	КСУ	$\sigma_{-1}$		E	G	
	МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>	МПа	г/см <sup>2</sup>	ГПа	ГПа	км
	не менше									
ВТ3-1 поковка	931	-	8	20	30	490	4,50	113	45,1	20,1
ВТ3-1 пруток	1274	1176	6	18	20	600	4,50	113	45,1	29,0
VST-2 поковка	950	850	8	20	35	-	4,50	113	45,1	21,5

У роботі [33] представлені порівняльні характеристики працездатності сталей, сплавів алюмінію та титану при імпульсних ударних навантаженнях:

- питома жорсткість, яка визначає деформацію елемента конструкції

для сталі, сплавів алюмінію та титану практично однакова і становить відповідно  $2,7 \cdot 10^6$ ,  $2,9 \cdot 10^6$  та  $2,5 \cdot 10^6$  м. Отже, загальна деформація елемента конструкції, виготовленого з цих сплавів у рівній масі для схеми розтягування та стискання практично однакова;

- питома міцність при розтягуванні, що визначає опір кратероутворенню і зрізу, що становить для високоміцних сталей ( $\sigma_b = 1000 \dots 2000$  МПа), сплавів алюмінію ( $\sigma_b = 400 \dots 600$  МПа) і титану ( $\sigma_b = 1000 \dots 1400$  МПа), відповідно 26,0; 22,6 і 31,7 км, тобто в порівнянні зі сталлю на 10 % менше для сплавів алюмінію і на 20 % більше для сплавів титану;

- в'язкість руйнування для високоміцних низьколегованих сталей та сплавів титану практично однакова  $K_{1c} = 60 \dots 80$  МПа м<sup>1/2</sup>, для сплавів алюмінію в 2 рази менше  $K_{1c} = 30 \dots 40$  МПа м<sup>1/2</sup>. Розгін частинок ударною хвилею зростає із зменшенням щільності матеріалу і для тиску  $P = 50$  ГПа масова швидкість частинок становить [36] для сталей 1200 м/с, сплавів титану 1700 м/с та алюмінієвих сплавів 2200 м/с. Це визначає значно менший опір відколу  $\sigma_{від}$  при імпульсному ударному навантаженні легких сплавів [37], що становить для сплавів алюмінію 1000...2000 МПа, титану 3000...4000 МПа, сталей 4000...6000 МПа;

- залізо має приблизно в 2 рази меншу стисливість в порівнянні з алюмінієм, титан має проміжне значення стисливості, а ударне зміцнення (і окрихчування) низьколегованих високоміцних сталей менш інтенсивне, ніж сплавів алюмінію та титану.

## Висновки

1. Для створення засобів бронезахисту на сьогоднішній день розроблено широку гаму різних металевих матеріалів: металевих пластин зі сталей, а також титану, алюмінію та їх сплавів і роботи в цьому напрямку активно продовжуються.

2. Для виготовлення сталевих броні найчастіше використовують високоміцні та ультрависокоміцні спеціальні сталі, що характеризуються високою твердістю, пластичністю та в'язкістю, а також достатньою надійністю, низькою вартістю, в порівнянні зі бронєю з титану, алюмінію та сплавів їх основи, а також універсальністю.

3. Основна перевага алюмінієвих сплавів полягає у меншій щільності. За рахунок цього алюмінієва конструкція з тими ж параметрами деталей виявляється значно легше за сталеву. Така економія маси може використовуватися для скорочення вагових показників ББМ, нарощування броні зі збільшенням рівня захисту або для вирішення інших конструкторських завдань. Як недоліки алюмінієвої броні слід виділити її високу вартість порівняно з бронєю із сталі, а також значно менший опір відколу.

4. Титанові сплави, що використовуються як бронеперешкоди, відрізняються рядом унікальних фізико-механічних властивостей до яких відносяться: висока питома міцність, корозійна стійкість в атмосфері, морській воді та ряді агресивних середовищ, знижені модулі пружності, тепломіцність, немагнітність. Однак через високу вартість, цей матеріал застосовується тільки як спеціальний броньовий засіб. Та й у вигляді конструкційного матеріалу є численні обмеження.

5. Результати аналізу свідчать, що найбільш сприятливим поєднанням властивостей володіють середньолеговані високоякісні та особливо високоякісні сталі. Сплави алюмінію та титану можуть бути застосовані в тих випадках, коли характеристики по масі мають особливо важливе значення за умови додаткового докладного аналізу працездатності.

### Перелік посилань

1. Игнатова А. М., Артемов А. О. Аналитический обзор современных и перспективных материалов и конструкций бронепреград и защиты от поражения. *Фундаментальные исследования*. 2012. №6. С. 101-105.
2. Хильмес Р. Усовершенствование защиты бронированных машин. Возможности и границы повышения боеспособности. URL : [http://btvt.info/3attackdefensemobility/improve\\_armor.htm](http://btvt.info/3attackdefensemobility/improve_armor.htm).
3. Металл. Состав металла для брони. URL: <https://stal-kom.ru/sostav-metalla-dlya-broni/>
4. Юрасов И. В. К истории производства танковой брони в СССР. URL: [http://btvt.info/5library/vbtt\\_1974\\_05\\_armor\\_history.htm](http://btvt.info/5library/vbtt_1974_05_armor_history.htm)
5. Гладышев С. А., Григорян В. А. Броневые стали. Москва : Интермет Инжиниринг. 2010. 336 с.
6. Шадрин И. Д., Хмельников Е. А., Вендер И. И., Заводова Т. Е., Смагин К. В. *Анализ броневой защиты танков*. Интерэкспо гео-сибирь. 2018. № 7. С. 167-177.
7. Готальский Ю. Н. Сварка разнородных сталей. Київ : Техніка, 1981. 184 с.
8. Varenyi 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. No 4. P. 7-14.
9. Varenyi I. Secondary processing of UHSLA ARMOX 500 steel with heat based technologies. *University Review*. 2012. Vol. 6, no. 2. P. 6-9.
10. Как используется броневая сталь. URL: <https://promplacce.ru/vidy-metallov-i-klassifikaciya-staty/bronevaya-stal-1516.htm>
11. Григорян В. А., Кобылкин И. Ф., Маринин В. М., Чистяков Е. Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. Москва : Изд. РадиоСофт. 2008. 406 с.
12. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. 192 с.
13. Износостойкая и защитная сталь MIILUX. URL: [https://emk24.ru/wiki/spetsialnye\\_stali/iznosostoykie-stali-miilux\\_8710245](https://emk24.ru/wiki/spetsialnye_stali/iznosostoykie-stali-miilux_8710245)
14. Ultra High Hard Armor–Mars 240 For Sale Bozhong Metal. URL:

- <http://www.manufacturer.cc/product-detail/mil-dtl-46100-reve-14720288031294656.html>
15. Бабинец А. А., Рябцев И. А., Панфилов А. И. Материалы для индивидуальной бронезащиты (Обзор). *Автоматическая сварка*. 2018. №8. С. 45–51.
  16. Rosenberg Z., Dekel E. *Terminal Ballistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. 323 p.
  17. Высоковский С. И., Гуглин Н.Н., Левин Л. С., Маресев М. И., Филорикьян Б. К. О путях повышения противоснарядной стойкости катаной стальной брони для танков. *Вопросы оборонной техники*. Серия XX. Выпуск 63. 1976 г. URL: [http://btvt.info/5library/vop\\_1976\\_btk1.htm](http://btvt.info/5library/vop_1976_btk1.htm)
  18. Куцова В. З., Ковзель М. А., Носко О. А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2008. 348 с.
  19. Parusov E. V., Gubenko S. I., Sychkov A. B., Chuiko I. N., Sagura L. V., Denisenko A. I. Influence of the Structural Parameters of High-Carbon Steel on the Impact Strength. *Steel in Translation*. 2018. Vol 48, no.12. P. 812–817. DOI: 10.3103/S0967091218120100.
  20. Parusov E. V., Sukhomlin G. D., Gubenko S. I., Sychkov A. B., Denisenko A. I., Kamalova G. Ya. Evolution of the Defect Structure of Pearlitic Steel in Cold Deformation. *Steel in Translation*. 2018. Vol.48, no.7. P.472–477. DOI: 10.3103/S0967091218070124.
  21. Parusov E. V., Gubenko S. I., Sychkov A. B., Chuiko I. N., Sagura L. V., Kamalova G. Ya. Structural Evolution of Thin-Plate Pearlite in Wire-Blank Production. *Steel in Translation*. 2019. Vol.49. No. 5. P. 350–356. DOI: 10.3103/S0967091219050115
  22. Бабаченко О. І., Балаханова Т. В., Сафронова О. А., Кононенко Г. А. Дослідження впливу співвідношення вмісту Si/Mn на дендритну структуру сталей для залізничних осей. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2022. №1. С. 6-12.
  23. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Кімстач Т. В. Сталі для броньового захисту. *Матеріали IV Міжнародної конференції «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»*. 6-8 грудня 2021 р., Гельсінкі, Фінляндія. 2021. С. 129-135.
  24. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугунах и сталях / за ред. С.М. Винарова. Москва : Металлургиздат, 1961. 459 с.
  25. Алюминиевая броня для боевых машин. URL : <https://pulse.mail.ru/article/alyuminievaya-bronya-dlya-boevykh-mashin-8>.
  26. Арцруни А. А., Купрюнин Д. Г. , Зажилков А. А. Алюминиевая броня как альтернатива стальной брони. Область эффективности. URL : [http://btvt.info/5library/alumin\\_nii.htm](http://btvt.info/5library/alumin_nii.htm)
  27. Jena P. K., Savio S. G., Siva Kumar K., Madhu V., Mandal R. K., Singh A. K. An experimental study on the deformation behavior of Aluminium armour plates impacted by two different non-deformable projectiles. *Procedia Engineering 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics*. 2017. P. 222-229.
  28. Gooch W. A., Burkins M. S., Squillacioti R. J. Ballistic testing of commercial aluminum alloys and alternate processing techniques to increase the Availability of aluminum armor. *23<sup>rd</sup> International symposium on ballistics tarragona, Spain 16-20 April*. 2007. P.981-988.

29. Doherty K., Squillacioti R., Cheeseman B., Placzankis B., Gallardy D. Expanding the availability of lightweight aluminum alloy armor plate procured from detailed military specifications. *A reprint from the 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13 Pittsburgh, PA, 3–7 June)*. 2012. P. 541–546.
30. Грешта В. Л., Лисиця О. В., Степанова Л. П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗНТУ. 2014. 286 с.
31. Алюминий. Свойства и физическое металловедение : Справ. изд. / У. У. Энтони, Ф. Р. Элиот, М. Д. Болл, под ред. Дж.Е. Хэтча / Пер. с англ. М. : Metallurgia. 1989.
32. Купрюнин Д. Г., Гавзе А. Л., Чусов С. Ю. Использование титановых сплавов для конструкционных и броневых деталей изделий автобронетанковой военной техники и средств индивидуальной бронезащиты (СИБ). *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2018. № 7-8. С. 121-122.
33. Анастасиади Г. П., Сильников М. В. Работоспособность броневых материалов. СПб. : Астернон. 2004. 624 с.
34. Mil-dtl-46077g. Detail specification, armor plate, titanium alloy, weldable (28-SEP-2006) [SUPERSEDING MIL-A- 46077E]
35. Гавзе А. Л., Чусов С. Ю., Яньков В. П., Тетюхин В. В. Разработка новых экономнолегированных титановых сплавов для средств индивидуальной бронезащиты и изделий бронетехники. Перспективы их применения. *Титан*. 2013. № 1. С.46-48
36. Маккуин Р., Марш С., Тейлор Д., Фритц Д., Картер У. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследования ударных волн. Москва : Мир, 1973. 427 с.
37. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. Москва: Янус-К, 1996. 408 с.

## References

1. Ihnatova A. M., Artemov A. O. Analiticheskiy obzor sovremennykh i perspektivnykh materialov i konstruktsiy bronepregrad i zashchit ot porazheniya [Analytical review of modern and promising materials and structures of armored barriers and protection against defeat]. *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2012. No 6. P. 101-105.
2. Khilmes R. Usovershenstvovaniye zashchity bronirovannykh mashin. Vozmozhnosti i granitsy povysheniya boyesposobnosti [Improving the protection of armored vehicles. Possibilities and limits of increasing combat capability]. URL: [http://btvt.info/3attackdefensemobility/improve\\_armor.htm](http://btvt.info/3attackdefensemobility/improve_armor.htm).
3. Metall. Sostav metalla dlya broni [Composition of metal for armor]. URL: <https://stal-kom.ru/sostav-metalla-dlya-broni>.
4. Yurasov I. V. K istorii proizvodstva tankovoy broni v SSSR [On the history of the production of tank armor in the USSR]. URL: [http://btvt.info/5library/vbtt\\_1974\\_05\\_armor\\_history.htm](http://btvt.info/5library/vbtt_1974_05_armor_history.htm).
5. Gladyshev S.A., Grigoryan V.A. Bronevyeye stali [Armor steel]. Moskva: Internet Inzhiniring, 2010. 336 p.
6. Shadrin I. D., Khmelnikov E. A., Vender I. I., Zavodova T. E., Smagin K. V. *Analiz bronevoy zashchity tankov* [Tank armor analysis]. Interekspo geo-sibir. 2018. No 7.

- P. 167-177.
7. Gotalsky Yu. N. Svarka raznorodnykh staley [Welding of dissimilar steels]. Kyiv : Tekhnika, 1981. 184 p.
  8. 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*. 2013. No 4. P. 7-14.
  9. Barenyi I. Secondary processing of UHSLA ARMOX 500 steel with heat based technologies. *University Review*, 2012. Vol. 6. No 2. P. 6-9.
  10. Promplace Kak ispolzuyetsya bronevaya stal [How armor steel is used]. URL: <https://promplace.ru/vidy-metallov-i-klassifikaciya-staty/bronevaya-stal-1516.htm>.
  11. Grigoryan V. A., Kobylkin I. F., Marinin V. M., Chistyakov E. N. Materialy i zashchitnyye struktury dlya lokalnogo i individualnogo bronirovaniya [Materials and protective structures for local and individual reservations]. Moskva: Izd. RadioSoft, 2008. 406 p.
  12. Kobylkin I. F., Selivanov V. V. Materialy i struktury legkoy bronzashchity [Materials and structures of light armor protection]. Moskva: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2014. 192 p.
  13. Evropeyskaya metallurgicheskaya kompaniya. Iznosostoykaya i zashchitnaya stal MILUX [Wear-resistant and protective steel MILUX]. URL: [https://emk24.ru/wiki/spetsialnye\\_stali/iznosostoykie-stali-milux\\_8710245](https://emk24.ru/wiki/spetsialnye_stali/iznosostoykie-stali-milux_8710245).
  14. Shanghai Bozhong Metal Group Co., Ltd. Ultra High Hard Armor–Mars 240 For Sale. URL: <http://www.manufacturer.cc/product-detail/mil-dtl-46100-reve-14720288031294656.html>.
  15. Babinets A. A., Ryabtsev I. A., Panfilov A. I. Materialy dlya individualnoy bronzashchity (Obzor) [Materials for individual armor protection (Review)]. *Avtomatskaya svarka*. 2018. No 8. P. 45-51.
  16. Rosenberg Z., Dekel E. *Terminal Ballistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012, 323 p.
  17. Vysokovsky S. I., Guglin N. N., Levin L. S., Maresev M. I., Filorikyan B. K. *O putyakh povysheniya protivosnaryadnoy stoykosti katanoy stalnoy broni dlya tankov. Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya XX* [On ways to increase the anti-ballistic resistance of rolled steel armor for tanks. Issues of defense technology. Series XX], 1976. Issue 63. URL : [http://btvt.info/5library/vop\\_1976\\_btk1.htm](http://btvt.info/5library/vop_1976_btk1.htm).
  18. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Nosko O. A. *Lehovani stali ta splavy z osoblyvymy vlastyostiamy* [Alloy steels and alloys with special properties]. Dnipropetrovsk: NMetAU, 2008. 348 p.
  19. Parusov E. V., Gubenko S. I., Sychkov A. B., Chuiko I. N., Sagura L. V., Denisenko A. I. (2018). Influence of the Structural Parameters of High-Carbon Steel on the Impact Strength. *Steel in Translation*, 2018. Vol 48. No.12. P. 812–817. DOI: 10.3103/S0967091218120100.
  20. Parusov E. V., Sukhomlin G. D., Gubenko S. I., Sychkov A. B., Denisenko A. I., Kamalova G. Ya. Evolution of the Defect Structure of Pearlitic Steel in Cold Deformation. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No.7. P. 472–477. DOI: 10.3103/S0967091218070124.
  21. Parusov E. V., Gubenko S. I., Sychkov A. B., Chuiko I. N., Sagura L. V., Kamalova G. Ya. Structural Evolution of Thin-Plate Pearlite in Wire-Blank Production. *Steel in*

- Translation*, 2019. Vol.49. No. 5. P. 350–356. DOI: 10.3103/S0967091219050115
22. Babachenko O. I., Balakhanova T. V., Safronova O. A., Kononenko G. A. Doslidzhennia vplyvu spivvidnoshennia vmistu Si/Mn na dendrytnu strukturu stalei dlia zaliznychnykh osei [Study of the influence of the Si/Mn content ratio on the dendritic structure of steels for railway axles]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2022. No. 1. P. 6-12.
  23. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A., Kimstach T. V. Stali dlia bronovoho zakhystu [Steel for armor protection]. *Materialy IV Mizhnarodnoi konferentsii «Innovatsiini tekhnologii v nautsi ta osviti. Yevropeyskyi dosvid»*. 2021. P. 129-135. (in Ukrainian).
  24. Vinarova C. M. (editor) Bor. kaltsiy. niobiy i tsirkoniy v chugune i stali [Bor. Calcium. Niobium and zirconium in iron and steel]. Moskva: Metallurgizdat, 1961. 459 p.
  25. Pulse. Alyuminiyevaya bronya dlya boyevykh mashin [Aluminum armor for combat vehicles]. URL: <https://pulse.mail.ru/article/alyuminievaya-bronya-dlya-boevykh-mashin-8>.
  26. Artsruni A. A., Kupryunin D. G., Zazhilov A. A. Alyuminiyevaya bronya kak alternativa stalnoy broni. Oblast effektivnosti [Aluminum armor as an alternative to steel armor. Efficiency area]. URL: [http://btvt.info/5library/alumin\\_nii.htm](http://btvt.info/5library/alumin_nii.htm)
  27. Jena P. K., Savio S. G., Siva Kumar K., Madhu V., Mandal R. K., Singh A. K. An experimental study on the deformation behavior of Aluminium armour plates impacted by two different non-deformable projectiles. *Procedia Engineering 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics*. 2017. P. 222-229.
  28. Gooch W. A., Burkins M. S., Squillacioti R. J. Ballistic testing of commercial aluminum alloys and alternate processing techniques to increase the Availability of aluminum armor. *23rd International symposium on ballistics tarragona*. 2007. P. 981-988.
  29. Doherty K., Squillacioti R., Cheeseman B., Placzankis B., Gallardy D. Expanding the availability of lightweight aluminum alloy armor plate procured from detailed military specifications. *A reprint from the 13th International Conference on Aluminum Alloys*. 2012. P. 541–546.
  30. Greshta V. L., Lisitsya O. V., Stepanova L. P. *Kolorovi metaly ta splavy na yikh osnovi : navchalnyi posibnyk* [Colored metals and alloys on their bases: manual]. Zaporizhzhia: ZNTU, 2014, 286 p.
  31. Aliuminii. Svoistva i fizicheskoe metallovedenie : Sprav. izd. / U. U. Entoni, F. R. Eliot, M. D. Boll, pod red. Dzh.E. Khetcha / Per. s angl. M. : Metallurgiya, 1989.
  32. Kupryunin D. G., Gavze A. L., Chusov S. Yu. (2018). *Ispolzovaniye titanovykh splavov dlya konstruktsionnykh i bronevykh detaley izdeliy avtobronetankovoy voyennoy tekhniki i sredstv individualnoy bronezashchity (SIB)* [The use of titanium alloys for structural and armor parts of products of armored military equipment and personal armor protection (PIB)]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu*, 2018. No 7-8. P. 121-122.
  33. Anastasiadi G. P., Silnikov M. V. *Rabotosposobnost bronevykh materialov* [The performance of armor materials]. Sankt-Peterburg: Asterion, 2004, 624 p.
  34. EverySpec LLC. Mil-dtl-46077g. Detail specification, armor plate, titanium alloy, weldable (28-SEP-2006) [SUPERSEDING MIL-A- 46077E] URL: [http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-DTL/MIL-DTL-46077G\\_13613](http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-DTL/MIL-DTL-46077G_13613).

35. Gavze A. L., Chusov S. Yu., Yankov V. P., Tetyukhin V. V. Razrabotka novykh ekonomnolegirovannykh titanovykh splavov dlya sredstv individualnoy bronezashchity i izdeliy bronetekhniki. Perspektivy ikh primeneniya [Development of new economically alloyed titanium alloys for personal armor protection and armored vehicles. Prospects for their application]. *Titan*, 2013. No 1. P. 46-48.
36. Makkuin R., Marsh S., Teylor D., Fritts D., Karter U. *Urvneniye sostoyaniya tverdykh tel po rezul'tatam issledovaniya udarnykh voln* [The equation of state of solids based on the results of the study of shock waves]. Moskva: Mir, 1973. 427 p.
37. Kanel G. I., Razorenov S. V., Utkin A. V., Fortov V. E. *Udarno-volnovyye yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Shock-wave phenomena in condensed media]. Moskva: «Yanus-K», 1996. 408 p.

**G. A. Kononenko**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105  
**T. V. Kimstach**, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-8993-201X  
**O. A. Safronova**, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4032-4275  
**R. V. Podolsky**, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641  
**O. V. Puchikov**, Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4119-6399  
**O. P. Klinova**, Lead Engineer

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

### **MODERN PERSPECTIVE METAL MATERIALS FOR ARMORED OBSTACLE (OVERVIEW)**

**Summary.** To date, means of protection of all types of armored vehicles against damage by small arms are actively being developed, new grades of steel with increased anti-projectile resistance indicators are being developed, which ensure a reduction in the metal content of structures while simultaneously increasing the tactical and technical characteristics of the product. The constant increase in requirements for the protection of armored vehicles, caused by the improvement of highly effective means of attack, dictates the need to find new approaches to increase the dynamic stability of armored steels using modern metallurgical, material science and construction 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, based on the analysis of literary sources, the main trends in the development and improvement of modern metal materials for the manufacture of armored obstacles, which have high dynamic resistance against modern highly effective small arms weapons. The paper analyzes the most widely used metal materials for the manufacture of armored barriers, presents information about their advantages and disadvantages, and provides an assessment of the prospects for further development of this industry. It is noted that the current concept of weapons development is aimed at the use of high-tech materials and innovative methods that allow improving protective functions without increasing the mass and dimensions of armor protection. Currently, many different materials are used to create armor protection: metal plates based on steel, titanium, aluminum and their alloys, aramid or polyethylene fibers, as well as ceramics based on boron carbides, silicon, and others. In accordance with the existing concept of increasing the effectiveness of armor protection and ensuring a

combination of firepower, security and mobility, the use of promising materials for the creation of armor protection provides an additional reserve for increasing the combat and military-economic efficiency of military equipment.

**Key words:** armor steels, dynamic stability, armored vehicles, aluminum-based alloys, titanium alloys.

**For citation:** Suchasni perspektyvni metalevi materialy dlia bronepereshkod (ohliad) [Modern perspective metal materials for armored obstacle (overview)] / G. A. Kononenko, T. V. Kimstach, O. A. Safronova, R. V. Podolsky, O. V. Puchikov, O. P. Klinova // *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 325-342. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-325-342.

*Стаття надійшла до редакції збірника 13.10.2022 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*