

УДК 662.313:623.91

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.280323.22.941

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ БРОНЬОВОЇ СТАЛІ ТА ЇЇ БАЛІСТИЧНОЮ СТІЙКІСТЮ (огляд)

КОНОНЕНКО Г. А.¹, *докт. техн. наук,*КІМСТАЧ Т. В.², *м. н. с.,*САФРОНОВА О. А.^{3*}, *м. н. с.,*ПОДОЛЬСЬКИЙ Р. В.⁴, *м. н. с.*

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, e-mail: 1375tatjana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

^{3*} Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁴ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Анотація. *Актуальність роботи.* Наразі активно розвивається промисловість у галузі виготовлення засобів захисту всіх видів бронетехніки від вогневого ураження стрілецькою та артилерійською зброєю. 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 тощо) у складі композицій із традиційною сталеву броню. Розроблення та проектування працездатних матеріалів та конструкцій броньового захисту – складна науково-технічна проблема, для вирішення якої необхідно встановити зв'язок між механічними властивостями броньової сталі та її стійкістю та живучістю. **Мета дослідження** – на підставі аналізу літературних джерел визначити взаємозв'язок між механічними властивостями сталеву броні та її стійкістю. **Методика.** Застосовано метод аналізу науково-технічної літератури щодо вимог до бронеперешкод. **Результати.** Виконано аналітичні дослідження взаємозв'язку між основними механічними властивостями сталеву броні та її балістичною стійкістю, що дозволить прогнозувати оптимальне поєднання значень механічних властивостей, яке забезпечить високу надійність бронезахисту. Підвищення твердості броньової сталі зазвичай знижує ударну в'язкість сталей. Зазначено, що балістична стійкість конструкційних та броньових сталей корелює з межею міцності на розтяг. Показано наявність тісного кореляційного зв'язку між характеристиками міцності матеріалів та їх опором поширенню тріщин за високошвидкісного (вибухового) навантаження. Для ряду матеріалів між передбаченими та вимірними балістичними характеристиками за високих деформацій, пов'язаних із балістичним ударом, існує тісний взаємозв'язок, у разі, коли як міра міцності матеріалу служить стискне напруження течії. Підвищення ударної в'язкості, особливо в класах високої та надвисокої твердості, – важливе завдання для розроблення броньової сталі. Межі твердості тому встановлюються для конкретних класів сталеву броні, щоб контролювати ударну в'язкість під час виробництва та знижувати ризик руйнування або інших крихких ушкоджень для конкретних складів сталі та областей застосування.

Ключові слова: *металева броня; міцність; твердість; робота удару; балістична стійкість*

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MECHANICAL PROPERTIES OF ARMOR STEEL AND ITS BALLISTIC RESISTANCE (overview)

KONONENKO G.A.¹, *Dr. Tech. Sc.,*KIMSTACH T.V.², *Junior Res.,*SAFRONOVA O.A.^{3*}, *Junior Res.,*PODOLSKY R.V.⁴, *Junior Res.*

¹ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Academician Starodubov Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

² Department of Heat Treatment of Metal for Mechanical Engineering, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Academician Starodubov Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: 1375tatyana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

^{3*} Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Academician Starodubov Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁴ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Academician Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Abstract. The relevance of the work. Today the industry is actively developing in the field of manufacturing means for protection of all types of armored vehicles against fire damage by small arms and artillery weapons. At present, ensuring high dynamic resistance of armor against modern weapons without increasing its thickness and, accordingly, the mass of the structure as a whole is achieved due to the use of various non-metallic materials (armor ceramics, high-strength fabrics, etc.) as part of compositions with traditional steel armor. The development and design of workable materials and structures of armor protection is a complex scientific and technical problem. To ensure high stability and survivability of armor, it is necessary to establish a relationship between the mechanical properties of armor steel and its ballistic characteristics. **Purpose.** Based on the analysis of literary sources, determine the relationship between the mechanical properties of steel armor and its ballistic characteristics. **Methodology.** The method of scientific and technical literature analysis regarding the requirements for armored obstacles is applied. **The results.** Analytical investigations of the relationship between the main mechanical properties of steel armor and its ballistic characteristics are conducted in the work, which will allow predicting the optimal combination of mechanical properties' values that will ensure high ballistic resistance. Increasing the hardness of armor steel usually reduces the impact toughness of steels. It is noted that the ballistic characteristics of structural and armor steels are correlated with the tensile strength limit. The existence of a correlation between the strength properties of materials and their resistance to crack propagation under high-speed (explosive) loading is shown. For a number of materials, there is a close relationship between predicted and measured ballistic characteristics at high deformations associated with ballistic impact, when compressive flow stress is used as a measure of material strength. Increasing impact toughness, especially in high and ultra-high hardness classes, is an important task in the development of armor steel. Hardness limits are therefore set for specific grades of steel armor to control impact toughness during production and reduce the risk of fracture or other brittle damage for specific steel compositions and applications.

Keywords: metal armor; strength; hardness; impact work; ballistic resistance

Вступ

Незважаючи на те, що в даний час для створення засобів броньового захисту використовується безліч різних матеріалів (неметалеві матеріали, високоміцні алюмінієві і титанові сплави), броньові сталі продовжуватимуть домінувати в конструкціях захисту транспортних засобів, залишаючись конкурентоспроможним матеріалом, який забезпечує високу балістичну ефективність бронеперешкод.

Для виготовлення сталеві броні найчастіше використовують високоміцні та ультрависокоміцні спеціальні сталі, що характеризуються високою твердістю, пластичністю та в'язкістю, а також достатньою надійністю, низькою вартістю, порівняно із бронєю з титану, алюмінію та сплавів на їх основі, а також універсальністю [1; 2].

Мета дослідження

На підставі аналізу літературних джерел визначити взаємозв'язок між механічними властивостями сталеві броні та її балістичною стійкістю, що дозволить прогнозувати оптимальне поєднання значень механічних властивостей, яке забезпечить високу надійність бронезахисту.

З практичної точки зору, броня необхідна для забезпечення оптимальної ефективності проти низки загроз на полі бою, включаючи загрози пробиття броні та уламків.

Основні вимоги до броньові сталі такі [3]:

- висока стійкість – опірність впливу куль та снарядів;

- живучість – здатність не руйнуватися в разі багаторазових влучень снарядів.

Для забезпечення цих вимог листовий прокат із броньової сталі повинен мати високу міцність та твердість при збереженні характеристик пластичності та в'язкості. 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, що перебувають у постійному протиріччі [3; 4]. Тому, для забезпечення високої стійкості та живучості броні, необхідно встановити зв'язок між основними факторами, найбільш важливими для балістичних і конструкційних характеристик броньової сталі. Таким чином, завдання встановлення зв'язку між механічними властивостями броньової сталі і її балістичними характеристиками стало актуальним.

Методика

На підставі інформаційно-аналітичного дослідження сучасної літератури виконано аналіз вимог до бронеперешкод.

Основні результати досліджень

Один із найпоширеніших механізмів руйнування гомогенної металевої броні – пластичне утворення отворів. Робота з формування пластичного отвору (W_{DNF}) дорівнює роботі з розширення отвору в броні до діаметра снаряда.

У працях [5; 6] запропоновано для опису взаємозв'язку між міцністю броні та її опором пробиванню броньбійними снарядами використовувати формулу:

$$W_{DNF} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_0 \cdot \sigma_0}{2}, \quad (1)$$

де D – діаметр снаряда, що не деформується, h_0 – товщина броньового листа, σ_0 – відповідне напруження плинності за стиснення (міра міцності матеріалу).

Оцінки напруження плинності за великих квазістатичних деформацій залежать від фактичної швидкості зміцнення [7], і у випадку, що розглядається, використовується одновісне квазістатичне

напруження плинності за дійсної деформації 1,0 [6].

Слід зазначити, що дана формула не застосовується для сферичних куль, наприклад, свинцевих куль із середньою висотою, і краще застосовувати інші методи прогнозування взаємозв'язку між міцністю броні та її опором ураженню броньбійними снарядами. Якщо снаряд деформується, як у випадку з кульовими снарядами, наприклад, свинцевими снарядами з мідною оболонкою, тоді виконана робота та балістична границя значно переоцінюються рівнянням (1), і краще застосовувати інші методи прогнозування [8].

Порівнявши рівняння (1) до кінетичної енергії проникного снаряда, можна оцінити швидкість взаємодії (v) або балістичну стійкість матеріалу броні за формулою [7]:

$$v = \sqrt{\frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_0 \cdot \sigma_0}{m}}, \quad (2)$$

де m – маса снаряда, $\sqrt{\frac{\pi \cdot D^2}{m}}$ – константа для конкретного вражаючого елемента (ϵ константою для даного снаряда).

Ця залежність може бути використана для оцінювання обмеження за балістичною стійкістю гомогенної металевої броні за її взаємодії з серцевинами снарядів (куль), що не деформуються [6]. При розрахунку враховують виключно пластичну деформацію (пластична течія), а такі характеристики, як інерція, тертя, форма наконечника тощо ігнорують. Тобто ключовим фактором балістичної стійкості броні постає пластична деформація. Однак, можуть виникати й інші механізми руйнування, наприклад, закупорювання в разі адіабатного зсуву або навіть крихке руйнування [3].

Процес підвищення твердості у всій історії розвитку виробництва броні розглядався як один із найбільш очевидних шляхів підвищення її стійкості. Однак ефективність підвищеної твердості залежить від умов обстрілу: від товщини броні, кута

обстрілу, калібру і типу снарядів, їх конструкції та якості.

Між твердістю монолітної броньової сталеві пластини та її балістичними

характеристиками існує складний взаємозв'язок, який схематично показано на рисунку 1 [9].

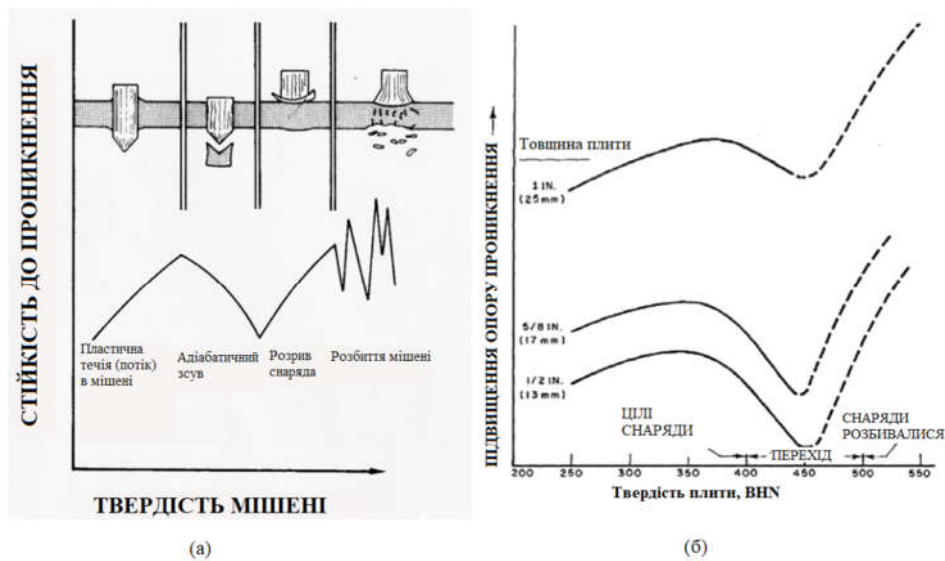


Рис. 1. Взаємозв'язок між твердістю монолітної пластини з броньової сталі та її ефективністю проти броньових снарядів: а – залежність між твердістю плити та опором до пробивання, виражена феноменологічно [10]; б – залежність між твердістю плити й опором до пробивання, яка задана через значення твердості [11]

Початкове підвищення броньової стійкості, що відбувається зі збільшенням твердості пластини на рисунку 1, а є результатом збільшення опору пластичній деформації в процесі формування отвору. Після певного моменту підвищення твердості пластини відбувається зниження захисту через сприйнятливості матеріалу до руйнування за низькоенергетичного адіабатичного зсуву. При ударі матеріал пластини під снарядом швидко прискорюється, створюючи стрибок швидкості, що зумовлює пластичну локалізацію в адіабатичних умовах [12]. Відсутність термічної дифузії спричинює високі температури, які долають ефекти зміцнення від деформації та швидкості деформації, викликаючи катастрофічне падіння міцності.

Смуги адіабатичного зсуву (ASB) поширюються на товщину пластини, що спричинює її руйнування за нижчих рівнів енергії порівняно з іншими класичними моделями руйнування. Ще більше підвищення твердості пластини зумовлює

посилення балістичних характеристик, що, швидше за все, пов'язано з руйнуванням снаряда. За дуже високих значень твердості недостатня в'язкість може спричинити крихке руйнування сталевих листів. Автори статті [11] запропонували аналогічний взаємозв'язок між твердістю гомогенної сталеві пластини та її опором до пробивання снарядами, значення твердості були наведені для різних режимів руйнування.

На підставі досліджень, проведених у працях [9; 13–15], зроблено висновок, що балістична стійкість пов'язана з твердістю сталеві броні, однак за певних значень твердості, залежно від виду снаряда та механізму руйнування, цей зв'язок може зменшуватися або збільшуватися. Ще один важливий вплив твердості броні полягає в тому, чи достатньо вона висока, щоб деформувати чи розбити снаряд, що значною мірою впливає на ефективність броні. З практичної точки зору твердість – це міра міцності, яку можна легко виміряти

для кожної пластини, і її можна використовувати для гарантії якості.

Дослідження, проведені в праці [11], показали, що балістичні характеристики конструкційних і броньових сталей корелюють із твердістю і границею міцності при розтягуванні, але не з границею плинності.

Однак, як показано в праці [6], існує значуща кореляція між механічними властивостями та балістичною стійкістю для ряду матеріалів. Використання напруження течії доцільне при розгляді більших деформацій, пов'язаних із балістичним ударом, особливо через утворення пластичних витків та інших механізмів руйнування.

Woodward [6; 10] продемонстрував сильну кореляцію між прогнозованими та вимірними балістичними характеристиками для ряду матеріалів, коли квазістатичне напруження течії за стиснення в разі високих деформацій, тобто напруження течії за істинної деформації $\sigma_{0,1}$, а не границя плинності за стиснення σ_y використовувалася як міра міцності матеріалу.

Використання напруження течії доцільне, якщо врахувати великі деформації, пов'язані з дією балістичного удару, особливо через утворення пластичного отвору та багато інших механізмів руйнування. Крива квазістатичного істинного напруження стиснення-істинної деформації майже плоска за таких великих деформацій, отже, ця міра напруження течії також значною мірою нечутлива до точного значення деформації [16].

З аналізу залежностей, наведених на рисунку 2 [17], випливає, що за високих швидкостей навантаження напруження течії за великих пластичних деформацій не залежить від швидкості навантаження. Що пов'язано з одночасним перебігом деформаційного ущільнення, за рахунок підвищення напруження в металі і термічного знеміцнення. Показано, що початкове напруження течії прагне наблизитися до значення квазістатичного

напруження течії за великих пластичних деформацій.

Відбувається зміцнення за швидкістю деформації, але загальна форма кривої напруження – деформація змінюється в результаті термічного знеміцнення внаслідок адіабатичного нагрівання, пов'язаного з великою високошвидкісною пластичною деформацією. Іншими словами, крива течії є комбінацією збільшення напруження течії внаслідок зміцнення за певної швидкості деформації, а також зменшення через термічне знеміцнення, що разом може викликати зміни виду кривих напруження – деформація за високих швидкостей навантаження.

Різниця між квазістатичними властивостями за стиснення та розтягу загартованої та відпущеної сталі є диференціалом міцності [18]. Це також стосується динамічного навантаження [19]. Різниця міцності виникає через різну реакцію матеріалу між навантаженням на стиснення і розтягу через низку потенційних причин, таких як: наявність мікроскопічних металургійних тріщин і тріщин загартування; рух дислокації проти границь зерен або включень; ефекти текстури та анізотропії, що виникають внаслідок попередньої пластичної деформації.

Крім того, за дії розтягувального навантаження мікротріщини поширюються, таким чином збільшуючи об'єм матеріалу і, отже, отримаємо більшу пластичну деформацію. Під навантаженням на стиснення мікротріщини примусово закриваються, що зумовлює менші вимірювані пластичні деформації. Будь-яка збережена фаза аустеніту, що залишилася після процесів загартування та відпуску, також матиме іншу поведінку під час розтягування порівняно зі стисненням [6]. Відмінності в поведінці напруження-деформація між стисненням і розтягом можуть бути досить значними для загартованих і відпущених сталей, і моделі Джонсона–Кука [20] і Церіллі–Армстронга [21] здатні представляти поведінку матеріалу за репрезентативної швидкості деформації.

Броньова сталь доступна в діапазоні товщин, і, як наслідок, властивості матеріалу змінюються по перерізу через труднощі в досягненні достатньої швидкості загартування під час термічної обробки для досягнення стабільної та високої твердості по всій товщині пластини. Це спостерігається для RHA (катана гомогенна броня), яка може бути товщиною від 2,5 до 150 мм. Більш товсті листи броні виготовляються з більш високим вмістом

легувальних елементів, щоб підвищити їх здатність до загартування, але зміни складу не завжди можуть повністю компенсувати такі значні зміни товщини, що спричинює зниження твердості в середині поперечного перерізу для більш товстих пластин.

Автори публікації [22] вказали, як на динамічні властивості RHA впливає твердість, що є змінною залежно від товщини пластини, де більш товсті пластини мають меншу поверхневу твердість.

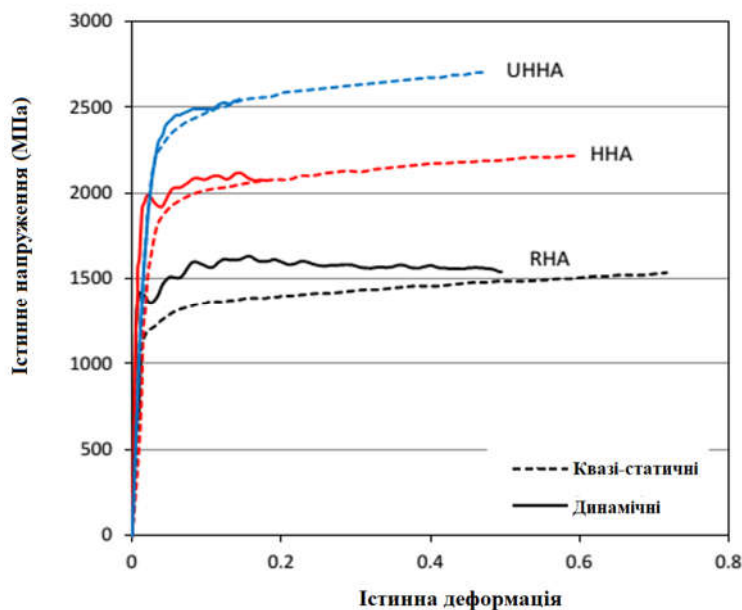


Рис. 2. Криві істинного напруження стиску – деформації для броньових сталей MARS: MARS 190 (RHA), MARS 240 (HHA) і MARS 300 (UHHA) зі швидкостями динамічної деформації 4800 с⁻¹, 3800 с⁻¹ і 1500-2500 с⁻¹ відповідно [11]

Руйнування броньової плити під час балістичного удару можна описати як таке, що відбувається, коли її пластичність недостатня для того, щоб витримувати деформації, пов'язані з вигином, який виникає внаслідок удару, а також згинання, які в комплексі є кращим механізмом для руйнування [23]. Бувають випадки, коли пластина ламається з незначною помітною деформацією, що також може поєднуватися з іншими механізмами руйнування.

З практичної точки зору функціонал матеріалу для таких вимогливих умов, як стійкість до балістичних або вибухових навантажень, залежить від того, як він реагує на наявність вм'ятин або тріщин.

Вм'ятини провокуватимуть високі локальні напруження та високе локальне

збільшення швидкості деформації в корені виїмки [24]. Важливо, що ямки також зумовлюють тривимірний багатовісьовий напружений стан, особливо чутливий безпосередньо до вм'ятин і тим більше до тріщин.

Високоміцні матеріали, включаючи деякі броньові сталі (де пластичність навіть за одновісного напруження може бути дуже низька), часто мають невеликі локальні пластичні зони і, отже, дуже високі локальні напруження, які є ініціаторами тріщин [24].

Навіть за низьких зовнішніх зусиль може виникнути високе локальне напруження, що може спричинити швидке виникнення, поширення мікротріщин і руйнування. Сталі з високим деформаційним зміцненням і високою

деформацією руйнування більш доцільні у використанні, оскільки вони можуть створювати великі пластичні зони перед тріщинами, що зароджуються, та забезпечити більший опір їх поширенню та розповсюдженню. Перевага таких сталей полягає в тому, що більша пластична зона в корені надрізу або тріщини розширює область пружного навантаження в область, де напруження будуть набагато меншими. Тому такі сталі мають значно більшу стійкість до руйнування.

Броньові сталі мають ортотропні механічні властивості (властивості, що різняться уздовж трьох взаємно-ортогональних осей обертової симетрії), зокрема, в'язкість, яка значно вища в поздовжньому та поперечному напрямках пластини порівняно з коротким поперечним (по товщині) напрямком. Це викликано сегрегацією легувальних елементів, зокрема, неметалевих включень на основі сірки, в процесі лиття, а також ортотропною деформацією мікроструктури в процесі прокатки. Усе це викликає появу мікроструктурних смуг у сталях. Leach і Woodward [25] показали, що балістична стійкість і механізм руйнування загартованої і відпущеної сталі змінюються залежно від орієнтації мікроструктурних смуг у пластині.

Міцність – важливий показник для товстих броньових плит через тривісний напружений стан, викликаний більш високим обмеженням товстіших секцій [11]. За таких обставин напружений стан через вм'ятину (заглиблення) наближається до плоскої деформації, а не до плоского напруження, причому перший стан має менше напруження руйнування [25]. Більш товсті броньові сталі, як правило, повинні мати більш високий вміст легувальних елементів у сплаві, щоб підвищити їх ударну в'язкість і краще керувати тривісними напруженими станами [11].

Дослідження низки авторів [26; 27] показали, що деформація руйнування чутлива до напруженого стану (тобто ступеня тривісності), у ряді високоміцних сталей були значні відмінності між

деформаціями руйнування в площині та через товщину. Інші фактори, такі як температура і швидкість навантаження або швидкість деформації, також можуть сильно знизити в'язкість [24]. Whittington та ін. [28], наприклад, досліджували пластичну морфологію руйнування броньової сталі РНА і виявили, що збільшення швидкості деформації зумовлює менше утворення пластичних пустот і навпаки.

Автори [24] стверджують, що результати лабораторних випробувань Шарпі не можна використовувати для точних прогнозів поведінки реальних броньованих конструкцій за польових температур.

Хоча тест Шарпі – важливий практичний засіб для оцінення та класифікації надійності різних броньових сталей, в основному це емпіричний тест із невизначеною тривісною умовою на надрізі, і тому його не можна використовувати для прогнозування початку крихкого руйнування [24]. Удари або вибухи створюють дуже високі локальні напруження, які можуть легко спричинити тріщини. Те, чи такі тріщини поширюються та спричинюють крихке руйнування, залежить від характерних для матеріалу властивостей поширення тріщин, які не вимірюються тестом Шарпі.

Herzig та ін. [29] провели випробування Шарпі, а також вибухові випробування, які вимірювали поширення тріщин для ряду сталей і показали, що результати таких випробувань змінюються залежно від температури (до -40°C від температури навколишнього середовища). Важливо, що було показано, що існує хороша кореляція між властивостями в'язкості матеріалу та його стійкістю до розповсюдження тріщини за високого (вибухового) навантаження.

Висновки

За результатами аналізу встановлено, що між балістичними характеристиками та твердістю сталевих броньових сталей існує тісний взаємозв'язок, який, залежно від типу снаряда та механізму руйнування, може дещо збільшуватись або зменшуватись.

Підвищення твердості броньової сталі зазвичай знижує ударну в'язкість сталей. Межі твердості тому встановлюються для конкретних класів сталевої броні, щоб контролювати ударну в'язкість під час виробництва та знижувати ризик руйнування або інших крихких ушкоджень для конкретних складів сталі та сфер застосування.

Показано, що балістична стійкість конструкційних та броньових сталей корелює з границею міцності на розтяг. Для ряду матеріалів між передбаченими та вимірними балістичними характеристиками за високих деформацій, пов'язаних із балістичним ударом, існує тісний

взаємозв'язок, у разі, коли як міра міцності матеріалу служить стискне напруження течії за істинної деформації $1,0 \sigma_0$.

Показано існування кореляційного зв'язку між властивостями міцності матеріалів і їх опором поширенню тріщин за високошвидкісного (вибухового) навантаження.

Підвищення ударної в'язкості, особливо за високої та надвисокої твердості, – важливе завдання для розроблення броньової сталі. На значення ударної в'язкості значний вплив мають температура та швидкість навантаження чи швидкість деформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кононенко Г. А., Кімстач Т. В., Сафронова О. А., Подольський Р. В., Пучіков О. В., Клинова О. П. Сучасні перспективні металеві матеріали для бронеперешкод (огляд). *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*, 2022. Вип. 36. С. 325–342. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-325-342.
2. Børvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *Intern. J. of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36, №. 7. Pp. 948–964. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.0032.
3. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 323 p.
4. Перчун Г. І., Самофалова А. О., Кононенко Г. А. Методи визначення балістичної стійкості пластин броні. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2015. Вип. 30. С. 337–342.
5. Taylor G. I. The Formation and Enlargement of a Circular Hole in a Thin Plastic Sheet. *Quart J. Mech. and Appl. Math.* 1948. Vol. 1. Pp. 103–124.
6. Woodward R. L. The Penetration of Metal Targets by Conical Projectiles. *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 20. 1978. Pp. 349–359.
7. Tabor D. The Hardness of Metals. Oxford : Clarendon Press, 1951. 108 p.
8. Cimpoeu S. J. The Mechanical Metallurgy of Armour Steels. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Mechanical-Metallurgy-of-Armour-Steels-Summary-Cimpoeu/4817ae3537beb38f47ec33a86b716561c5dbcee1>.
9. Ryan S., Li H. Jun., Edgerton M., Gallardy D., Cimpoeu S. J. Ballistic evaluation of an Australian ultra-high hardness steel. *Proceedings of 29th International Symposium on Ballistics*. 2016. Pp. 1773–1778.
10. Woodward R. L. Materials for Projectile Disruption. *Materials Forum*. 1988. № 12. Pp. 26–30.
11. Manganello S. J., Abbott K. H. Metallurgical Factors Affecting the Ballistic Behaviour of Steel Targets. *J. Mat.* 1972. Vol. 7. Pp. 231–239.
12. Ferman-Coker M. Numerical Simulation of Adiabatic Shear Bands in Ti–6Al–4V Alloy Due to Fragment Impact. *Proceedings of the 24th Army Science Conference*. Orlando : Physics, 2004. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/NUMERICAL-SIMULATION-OF-ADIABATIC-SHEAR-BANDS-IN-V-Ferman-Coker/629ca4900b53b404b1ac167b9479123a6f547920>.
13. Gooch W. A., Burkins M. S., Squillacioti R., Stockman Koch R., Oscarsson H., Nash C. Ballistic Testing of Swedish Steel for U. S. Armor Applications. *21st Int. Symposium on Ballistics*. Adelaide, Australia, 19–23 April, 2004. Vol. 1. Pp. 174–181.
14. Showalter D. D., Gooch W. A., Burkins M. S., Koch R. S. Ballistic Testing of SSAB Ultra-High hardness Steel for Armor Applications. *24th Int. Symposium on Ballistics*. New Orleans, LA, 22–26 September, 2008. Vol. 1. Pp. 634–642.
15. U. S. Military Specification. MIL-A-46099C. Armor Plate. Steel. Roll-Bonded, Dual Hardness (0.187 Inches to 0.700 Inches Inclusive), 14 September 1987. 24 p.
16. Cimpoeu S. J. The Mechanical Metallurgy of Armour Steels. Land Division Defence Science and Technology Group. 2016. 36 p.
17. Nahme H., Lach N. Dynamic Behavior of High Strength Armor Steels. *J. Phys IV France*. 1997. Vol. 7. Pp. 377.
18. Spitzig W. A., Sober R. J., Richmond O. Pressure Dependence of Yielding and Associated Volume Expansion for Tempered Martensite. *Acta Metall.* 1975. Vol. 23. Pp. 885–893.
19. Meyer L.W., Abdel-Malek S. Strain rate dependence of strength-differential effect in two steels. *Le Journal de Physique IV*ю Vol. 10. Pr9-63-Pr9-68. 2000. 31 p.

20. Johnston G. R., Cook W. H. A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains. *7th Int. Symp. on Ballistics*. The Hague, Netherlands, 1983. Pp. 541–547.
21. Zerilli F. J., Armstrong R. W. J. *Appl. Physics*. 1987. Vol. 61. Pp. 1816–1825.
22. Ambuj Saxena, Shashi Prakash Dwivedi, Ashish K. Srivastava, Shubham Sharma, Nitin Kotkunde. A computational investigation on the influence of the l/d ratio and strain rate on the deformation behavior of rolled and homogeneous armor steel in the split Hopkinson pressure bar test process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 236, iss. 1. Pp. 138–148. DOI: 10.1177/09544089211036531.
23. Woodward R. L., Baldwin N. J. Oblique Perforation of Steel Targets by 30 Cal. AP M2 Projectiles. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1979. Vol. 21. Pp. 85–91.
24. Dieter G. E. *Mechanical Metallurgy*. 2nd Edn. McGraw-Hill, 1981. 120 p.
25. Leach P. W., Woodward R. L. The Influence of Microstructural Anisotropy on the Mode of Plate Failure during Projectile Impact. *Journal of Materials Science*. 1985. Vol. 20. Pp. 854–858.
26. Mackenzie A. C., Hancock J. W., Brown D. K. On the Influence of State of Stress on Ductile Failure. Initiation in High Strength Steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 1977. Vol. 9. Pp.168–188.
27. Sato K., Yu Q., Hiramato J., Urabe T., Yoshitake A. A method to investigate strain rate effects on necking and fracture behaviours of advanced high-strength steels using digital imaging strain analysis. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 75. Pp. 11–26.
28. Whittington W. R., Oppedal A. L., Turnage S., Hammi Y., Rhee H., Allison P. G., Horstemeyer M. F. Capturing the Effect of Temperature, Strain Rate and Stress State on the Plasticity and Fracture of Rolled Homogenous Armour (RHA) steel. *Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 594. Pp. 82–88.
29. Herzig N., Meyer N. W., Pursche F., Hüsing K. Relation between Dynamic Strength and Toughness Properties and the Behavior under Blast Conditions of High Strength Steels. *7th Int. Symp. on Impact Engng. ISIE 2010*. Warsaw, Poland, 4–7 July 2010. Pp. 15–28.

REFERENCES

1. Kononenko H.A., Kimstach T.V., Safronova O.A., Podolskyi R.V., Puchikov O.V. and Klynova O.P. *Suchasni perspektyvni metalevi materialy dlia bronepereshkod (ohliad)* [Modern promising metal materials for armored obstacles (review)]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. 2022, no. 36, pp. 325–342. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-325-342. (in Ukrainian).
2. Børvik T., Dey S. and Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *Intern. J. of Impact Engineering*. 2009, vol. 36, no. 7, pp. 948–964. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.0032.
3. Rosenberg Z. and Dekel E. *Terminal Ballistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, 323 p.
4. Perchun H.I., Samofalova A.O. and Kononenko H.A. *Metody vyznachennia balistychnoi stikosti plastyn broni* [Methods of determining the ballistic resistance of armor plates]. *Fundamentalnye y prykladnye problemy chornoj metallurhyy* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. 2015, no. 30, pp. 337–342. (in Ukrainian).
5. Taylor G.I. The Formation and Enlargement of a Circular Hole in a Thin Plastic Sheet. *Quart J. Mech. and Appl. Math.* 1948, vol. 1, pp. 103–124.
6. Woodward R.L. The Penetration of Metal Targets by Conical Projectiles. *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 20, 1978, pp. 349–359.
7. Tabor D. *The Hardness of Metals*. Oxford : Clarendon Press, 1951, 108 p.
8. Cimpoeru S.J. The Mechanical Metallurgy of Armour Steels. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Mechanical-Metallurgy-of-Armour-Steels-Summary-Cimpoeru/4817ae3537beb38f47ec33a86b716561c5dbcee1>.
9. Ryan S., Li H. Jun., Edgerton M., Gallardy D. and Cimpoeru S.J. Ballistic evaluation of an Australian ultra-high hardness steel. *Proceedings of 29th International Symposium on Ballistics*. 2016, pp. 1773–1778.
10. Woodward R.L. *Materials for Projectile Disruption*. Materials Forum. 1988, no. 12, pp. 26–30.
11. Manganello S.J. and Abbott K.H. Metallurgical Factors Affecting the Ballistic Behaviour of Steel Targets. *J. Mat.* 1972, vol.7, pp. 231–239.
12. Ferman-Coker M. Numerical Simulation of Adiabatic Shear Bands in Ti–6Al–4V Alloy Due to Fragment Impact. *Proceedings of the 24th Army Science Conference*. Orlando : Physics, 2004. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/NUMERICAL-SIMULATION-OF-ADIABATIC-SHEAR-BANDS-IN-V-Fermen-Coker/629ca4900b53b404b1ac167b9479123a6f547920>.
13. Gooch W.A., Burkins M.S., Squillacioti R., Stockman Koch R., Oscarsson H. and Nash C. Ballistic Testing of Swedish Steel for U.S. Armor Applications, 21st Int. Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 19–23 April, 2004, vol. 1, pp. 174–181.
14. Showalter D.D., Gooch W.A., Burkins M.S. and Koch R.S. Ballistic Testing of SSAB Ultra-High hardness Steel for Armor Applications. 24th Int. Symposium on Ballistics. New Orleans, LA, 22–26 September, 2008, vol. 1, pp. 634–642.

15. U.S. Military Specification, MIL-A-46099C, Armor Plate, Steel, Roll-Bonded, Dual Hardness (0.187 Inches to 0.700 Inches Inclusive), 14 September 1987, 24 p.
16. Cimpoeru S.J. The Mechanical Metallurgy of Armour Steels. Land Division Defence Science and Technology Group, 2016, 36p.
17. Nahme H. and Lach N. Dynamic Behavior of High Strength Armor Steels. J. Phys IV France. 1997, vol. 7, pp. 377.
18. Spitzig W.A., Sober R.J. and Richmond O. Pressure Dependence of Yielding and Associated Volume Expansion for Tempered Martensite. Acta Metall. 1975, vol. 23, pp. 885–893.
19. Meyer L.W. and Abdel-Malek S. Strain rate dependence of strength-differential effect in two steels. Le Journal de Physique IV 10, Pr9-63-Pr9-68, 2000, 31 p.
20. Johnston G.R. and Cook W.H. A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains. 7th Int. Symp. on Ballistics. The Hague, Netherlands, 1983, pp. 541–547.
21. Zerilli F.J. and Armstrong R.W. J. Appl. Physics. 1987, vol. 61, pp. 1816–1825.
22. Ambuj Saxena, Shashi Prakash Dwivedi, Ashish K Srivastava, Shubham Sharma and Nitin Kotkunde. A computational investigation on the influence of the l/d ratio and strain rate on the deformation behavior of rolled and homogeneous armor steel in the split Hopkinson pressure bar test process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2022, vol. 236, iss. 1, pp. 138–148. DOI: 10.1177/09544089211036531.
23. Woodward R.L. and Baldwin N.J. Oblique Perforation of Steel Targets by 30 Cal. AP M2 Projectiles. International Journal of Mechanical Sciences. 1979, vol. 21, pp. 85–91.
24. Dieter G.E. Mechanical Metallurgy. 2nd Edn. McGraw-Hill, 1981, 120 p.
25. Leach P.W. and Woodward R.L. The Influence of Microstructural Anisotropy on the Mode of Plate Failure during Projectile Impact. Journal of Materials Science. 1985, vol. 20, pp. 854–858.
26. Mackenzie A.C., Hancock J.W. and Brown D.K. On the Influence of State of Stress on Ductile Failure. Initiation in High Strength Steels. Engineering Fracture Mechanics. 1977, vol. 9, pp. 168–188.
27. Sato K., Yu Q., Hiramato J., Urabe T. and Yoshitake A. A method to investigate strain rate effects on necking and fracture behaviours of advanced high-strength steels using digital imaging strain analysis. International Journal of Impact Engineering. 2015, vol. 75, pp. 11–26.
28. Whittington W.R., Oppedal A.L., Turnage S., Hammi Y., Rhee H., Allison P.G. and Horstemeyer M.F. Capturing the Effect of Temperature, Strain Rate and Stress State on the Plasticity and Fracture of Rolled Homogenous Armour (RHA) steel. Materials Science and Engineering. A. 2014, vol. 594, pp. 82–88.
29. Herzig N., Meyer N.W., Pursche F. and Hüsing K. Relation between Dynamic Strength and Toughness Properties and the Behavior under Blast Conditions of High Strength Steels. 7th Int. Symp. on Impact Engng, ISIE 2010, Warsaw, Poland, 4–7 July 2010, pp. 15–28.

Надійшла до редакції: 12.01.2023.