

УДК 623.445.1:669.14:669-155.3

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250619.37.320

РОЗРОБКА ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ОСНОВНИХ ЖОРСТКИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОТИКУЛЬОВИХ БРОНЕЖИЛЕТІВ

ДЕЙНЕКО Л. М.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
ЛОБОДА П. І.², *д. т. н., проф.*,
АНДРЕЄВ А. О.³, *д. т. н., проф.*,
СТОЛБОВИЙ В. О.⁴, *к. т. н., с. н. сп.*,
РОМАНОВА Н. С.⁵, *к. т. н., доц.*,
БОРИСЕНКО А. Ю.⁶, *к. т. н., с. н. сп.*

^{1*} Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна, тел. +38 (044) 236-79-89, ORCID ID: [0000-0001-6718-9635](https://orcid.org/0000-0001-6718-9635)

³ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, вул. Академічна, 1, 61108, Харків, Україна, тел. +38 (067) 575-63-06, e-mail: aandreev@kipt.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-5530-2853

⁴ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, вул. Академічна, 1, 61108, Харків, Україна, тел. +38 (099) 788-56-22, e-mail: stolbovoy@kipt.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-7734-0642

⁵ Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: rnsrns@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

⁶ Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

Анотація. *Мета дослідження* – розробити параметри фінішної комплексної зміцнювальної технології обробки сталевих листових карт для основних частин індивідуальних бронезжилетів (захисні частини переду та спинки) типу В, яка здатна забезпечити металу плануємий рівень механічних властивостей на рівень V–VI класу захисту (ДСТУ XXX1: 201) та конструктивно-технологічні параметри обладнання для її реалізації (пічного, гартівного, охолоджувальних середовищ, установки для азотування в плазмі вакуумно-дугового розряду тощо). *Методики* – аналітична та експериментальна. *Результати роботи* – рекомендації щодо параметрів фінішної комплексної зміцнювальної технології обробки сталевих листових карт для основних частин індивідуальних бронезжилетів та конструктивно-технологічних параметрів обладнання для її реалізації в промисловості, у разі використання яких можливо отримувати основні частини для вітчизняних бронезжилетів V–VI класу захисту. *Наукова новизна* результатів досліджень визначається параметрами технології термічної обробки сталевих листових карт для основних частин індивідуальних бронезжилетів (для отримання гомогенної або гетерогенної броні) та особливостями конструктивно-технологічних параметрів обладнання для їх реалізації в промисловості. *Практична значимість* результатів досліджень полягає у можливості використання розробок для організації спеціалізованого підприємства з виробництва бронелістів для протикульових жилетів на рівень V–VI класу захисту.

Ключові слова: сталеві протикульові бронелісти; механічні властивості; термічна та хіміко-термічна обробка; азотування в плазмі вакуумно-дугового розряду; індивідуальний бронезжилет; основний жорсткий елемент

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОСНОВНЫХ ЖЕСТКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТИВОПУЛЕВЫХ БРОНЕЖИЛЕТОВ

ДЕЙНЕКО Л. Н.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
ЛОБОДА П. И.², *д. т. н., проф.*,
АНДРЕЕВ А. О.³, *д. т. н., проф.*,
СТОЛБОВОЙ В. О.⁴, *к. т. н., с. н. с.*,
РОМАНОВА Н. С.⁵, *к. т. н., доц.*,
БОРИСЕНКО А. Ю., *к. т. н., с. н. с.*

^{1*} Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоя Сикорского», пр. Победы, 37, 03056, Киев, Украина, тел. +38 (044) 236-79-89, ORCID ID: 0000-0001-6718-9635

³ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, ул. Академическая, 1, 61108, Харьков, Украина, тел. +38 (067) 575-63-06, e-mail: aandreev@kipt.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-5530-2853

⁴ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, ул. Академическая, 1, 61108, Харьков, Украина, тел. +38 (099) 788-56-22, e-mail: stolbovoy@kipt.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-7734-0642

⁵ Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: rnsrns@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

⁶ Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

Аннотация. Цель исследования – разработать параметры финишной комплексной упрочняющей технологии обработки стальных листовых карт для основных частей индивидуальных бронежилетов (защитные части – передняя и задняя спинка бронежилета) типа В. Эта технология способна обеспечить металлу планируемый уровень механических свойств на уровне V–VI класса защиты (ДСТУ XXXI : 201) и может быть реализована на существующем оборудовании (печном, закалочном, установках для азотирования в плазме вакуумно-дугового разряда и др.). **Методы исследования:** аналитические и экспериментальные. **Результаты работы** – рекомендации по параметрам финишной комплексной упрочняющей технологии обработки стальных листовых карт для основных частей индивидуальных бронежилетов и по конструктивно-технологическим параметрам оборудования для реализации этой технологии в промышленности, что позволит получить отечественные бронежилеты V–VI класса защиты. **Научная новизна** результатов исследований определяется параметрами технологий термической обработки стальных листовых карт для основных частей индивидуальных бронежилетов (для получения гомогенной или гетерогенной брони) и особенностями конструктивно-технологических параметров оборудования для реализации этой технологии в промышленности. **Практическое значение** результатов исследований заключается в возможном использовании разработок для организации специализированного предприятия по изготовлению бронированных листов для противопулевых жилетов уровня V–VI класса защиты.

Ключевые слова: стальные противопулевые бронелисты; механические свойства; термическая и химико-термическая обработка; азотирование в плазме вакуумно-дугового разряда; индивидуальный бронежилет; основной жесткий элемент

DEVELOPMENT OF PARAMETERS OF COMPLEX PROCESS TECHNOLOGY OF BASIC RIGID ELEMENTS FOR BULLET-PROOF VESTS

DEINEKO L.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
LOBODA P.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
ANDREIEV A.O.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
STOLBOVYI V.O.⁴, *Ph. D., Sen. Res.*,
ROMANOVA N.S.⁵, *Ph. D., Ass. Prof.*,
BORYSENKO A.Yu.⁶, *Ph. D., Sen. Res.*

^{1*} National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Pr. Peremohy, 03056, Kyiv, Ukraine, tel. +38 (044) 236-79-89, ORCID ID: 0000-0001-6718-9635

³ National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, 1, Akademichna str., 61108, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (067) 575-63-06, e-mail: aandreev@kipt.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-5530-2853

⁴ National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, 1, Akademichna str., 61108, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (099) 788-56-22, e-mail: stolbovoy@kipt.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-7734-0642

⁵ National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: rnsrns@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

⁶ National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

Abstract. Purpose – to develop parameters of the finishing complex strengthening processing of steel sheet cards for the main parts of individual bullet-proof vests (protective parts – a front and a back of a bullet-proof vest) of type B. This technology is capable to provide to metal the planned level of mechanical properties at the level of V–VI class of protection (DSTU XXXI : 201) also it can be realized on the existing inventory (furnace, hardening, installations for nitriding in plasma of a vacuum electric arc discharge, etc.) within their design-process parameters. **Methodology** – analytical and experimental methods. **Results of work** are the recommendations about parameters of the finishing complex strengthening technology of processing of steel sheet cards for the main parts of individual bullet-proof vests and the recommendation about design-process parameters of an equipment for implementation of this technology in the industry that will allow to receive national bullet-proof vests of V–VI class of protection. **The scientific novelty** of results of research is defined by the parameters of technologies of heat treatment of steel sheet cards for the main parts of individual bullet-proof vests (for receiving homogeneous or heterogeneous armor) and features of design-process parameters of an

equipment for implementation of this technology in the industry. **Practical value** of results of research consists in possible use of developments for the organization of the specialized enterprise for manufacture of armored sheets for bullet-proof vests of level V–VI class of protection.

Keywords: steel bullet-proof armoured sheets; mechanical properties; heat treatment and chemical heat treatment; nitriding in plasma of vacuum and arc discharge; individual bullet-proof vest; basic rigid element

У патентній та технічній літературі за останні ~30–40 років опубліковано достатньо прикладів хімічного складу сталей, які можуть використовуватися як бронесталі для захисту від вражаючої дії куль, снарядів, осколків. Відносно параметрів технології виготовлення виробів із бронесталей (протикульових, протиснарядних), які в змозі безпечити людей і техніку від вражаючої дії на рівні V–VI класу захисту (ДСТУ XXXI : 201) Засоби індивідуального захисту бронежилети. Загальні технічні умови), дані у літературі практично відсутні.

Бронежилет (згідно з ДСТУ XXXI : 201) є засіб індивідуального захисту людини у вигляді жилета, який забезпечує захист торса людини від дії холодної та вогнепальної зброї і складається з матеріалів, здатних затримати кулю та розсіяти її енергію. Згідно з класифікацією за конструктивним виконанням ці індивідуальні жилети складаються із захисних частин переду і спинки та можуть мати амортизувальні елементи для погашення енергії удару та зменшення дії засобу ураження на тіло людини. У матеріалах статті розглядають технологічні параметри обробки основних частин бронежилетів (переду та спинки) типу В – жорсткі бронежилети із захисною структурою на основі жорстких захисних елементів (1-го виду – захисні елементи взаєморухомі та стиковані між собою або розташовані з утворенням перекриття).

Для отримання в металі легкої протикульової броні високого рівня механічних властивостей, які гарантують захист людини або техніки, доцільно проводити ефективну зміцнювальну термічну або хіміко-термічну обробку на стадії готових виробів (передні і задні пластини бронежилетів) або напівфабрикатів (пластини для виготовлення корпусів БТР, БМП, обшивки літаків, вертольотів та ін.). Цей принцип у роботі прийнятий за основу розробки параметрів промислової технології у зв'язку з тим, що досягти в металопрокаті (в умовах прокатних станів) планованого співвідношення міцності – пластичності – в'язкості ($\geq \sigma_b \sim 1\ 700$ МПа, HRC $\sim 49\text{...}50$, $\delta_5 \sim 14\%$, $\psi \sim 50\%$, KCU ~ 80 Дж/см²); дуже складно.

Основні завдання, що стоять перед дослідниками такі:

– експериментально визначити раціональний тип протикульової броні високої твердості за складом металу для виготовлення виробів V–VI класу броньованого захисту людей (гомогенна чи гетерогенна броня) та рекомендувати для промислового використання раціональні хімічні склади 2–3 марок сталей і параметри технології

термомеханічної обробки виготовлення листового прокату для використання його у якості матеріалу для основних частин індивідуальних бронежилетів (захисні частини переду та спинки) типу В, який здатний забезпечити отримання планованого рівня механічних властивостей для бронежилетів V–VI класу захисту;

– експериментально визначити можливість використання нових зміцнювальних технологій обробки сталевих карт – термічної обробки (гомогенна катана броня) та комбінованої технології (азотування + термічне зміцнення) отримання високоміцних сталевих пластин із поверхневим азотованим шаром товщиною 2...3 мм (гетерогенна катана азотована з однієї площини броня) для протикульових жилетів та корпусів легкоброньованих машин від пробивної дії куль зі сталевим термозміцненим сердечником за допомогою полігонних випробувань пластин;

– дослідити структуру та властивості металу на різних стадіях комплексної технології обробки пластин;

– розробити параметри фінішної термічної або комбінованої обробки пластин із броньованої сталі на V–VI рівні захисту (які в змозі забезпечити досягнення високоміцного стану матеріалу і завдяки цьому гарантувати ефективний протикульовий захист людей та техніки за зниженні товщини пластин);

– розробити основні вимоги до конструктивно-технологічних параметрів обладнання для її реалізації (пічного, гартівного, охолоджувальних середовищ, установки для азотування в плазмі вакуумно-дугового розряду тощо).

Головні вимоги до броні – це поєднання високої стійкості (опірності проникненню куль або снарядів) із живучістю та здатністю витримувати багаторазову дію засобів ураження і при цьому не руйнуватися і не давати тріщин та сколів із внутрішнього боку броньованих пластин. Стійкість і живучість броньованих сталей досягаються головним чином шляхом їх легування і відповідної термічної (комбінованої) обробки. Броня повинна також зварюватись і мати прийнятну для промисловості технологію виробництва.

До основних легуючих елементів броньованої сталі належать: нікель, марганець, хром, молібден, кремній та ін. Наприклад, у 60 – 80-ті роки минулого століття використовували співвідношення цих легуючих елементів згідно з таблицею 1.

Таблиця 1

**Приблизне співвідношення легуючих елементів у складі броньованої сталі /
Approximate ratio of alloying elements in armored steel**

Легуючі елементи	C	Ni	Mn	Cr	Mo	Si
Масове співвідношення, %	0,3...0,5	0,6...5,0	0,2...0,8	0,4...2,1	0,1...0,4	0,1...0,4

Для виробництва броні використовується широкий спектр конструкційних матеріалів, що володіють необхідними механічними властивостями, головні з яких – твердість, міцність, відносне видовження, температура плавлення, модуль пружності. В цілому механічні показники матеріалів для виробництва броні повинні мати високий рівень. Незважаючи на те, що як матеріали для виробництва сучасної броні можуть бути запропоновані дисперсійно зміцнені сплави на основі міді, алюмінію; високоміцні титанові сплави або композити (титанова матриця плюс волокна); високоміцні композити з берилієвою матрицею; композиційні матеріали, зміцнені волокнами металів і ниткоподібними кристалами; пластики, наповнені орієнтованими волокнами вуглецю, оксиду алюмінію, бору й інші матеріали. У проєкті планується використовувати високоміцні сталі, які застосовують у промислово розвинутих країнах для виготовлення легкої (протикульової) броні, призначеної для захисту людей і обладнання легкоброньованих об'єктів (легких танків, БТР, БМП, літаків, вертольотів, бронекатерів та ін.).

Вітчизняні промислові підприємства мають деякі сталі та технології виготовлення листового прокату (у т. ч. і термомеханічної обробки) з броньових сталей в умовах металургійних підприємств, але їх кількість обмежена, а рівень механічних властивостей пластин із металопрокату зарубіжних виробників та співвідношення міцності – пластичності – в'язкості не дозволяє відібрати з них найбільш підходящі протикульові сталі для

виготовлення виробів V та VI рівня захисту, які відповідають вимогам у товщинах ~ 4,5...6 мм.

Слід зазначити, що в останні 7–10 років багато металургійних підприємств різних країн світу виготовляють листовий металопрокат товщиною від 2 мм до 80 мм подвійного призначення (як зносостійкий для промислового використання і у той же час як прокат, як можливо використовувати як броньовані вироби – пластини бронезилетів, прокат для виготовлення зварних корпусів бронетехніки). При цьому маються на увазі зносостійкі сталі, концентрація вуглецю у складі яких не перевищує 0,45 %. Як приклад можна навести листовий металопрокат зі сталей типу Хардокс (Hardox), Ramor 500; 550; 600; Weldox та інші). Сталь Хардокс (Hardox) уперше почали виготовляти у 70-х роках минулого століття, потім її постійно удосконалювали. Сталь має шість класів твердості (за Бринелем) : 350, 400, 450, 500, 550 і 600 HB, її міцність забезпечується ефективним гартуванням із деформаційного нагріву (можливо з частковим наслідуванням ефекту ВТМО) в лінії стана та відпуском. Залежно від хімічного складу сталі використовують відпуск до 250 °С, або до 450...500 °С.

Хімічний склад та механічні властивості таких сталей наведено в таблицях 2 та 3. Планується дослідити також властивості бронесталей виробництва різних країн, типу 3 (РФ по ТУ 7399-002-14621835-06, перевищує аналоги 55X4H3C2ГМ і 45XH2МФА); 71, 96 (45X2HMФБА), С500, сталь 1 (ГОСТ В21967-90), 2П, ARMSTAL 500 (Польща), RAMOR 450 та Protection 500 (Фінляндія), Quardian 500 (Бельгія) та ін.

Таблиця 2

**Хімічний склад часто використовуваних зносостійких машинобудівних сталей /
Chemical composition welded and wear-resistant steels which are often used**

Марка сталі	Хімічний склад, масова частка, % (Аналіз ковша. Проби, максимальні значення)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hardox HiTuf	0.20	0.60	1.60	0.020	0.020	0.70	2.0	0.70	0.005
Hardox 400 ¹	0.15	0.70	1.60	0.025	0.010	0.50	0.25	0.25	0.004
Hardox 450 ²	0.18	0.25	1.30	0.015	0.004	0.10	0.10	0.04	0.003
Hardox 450	0.26	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60	0.005
Hardox 500	0.30	0.70	1.60	0.020	0.010	1.50	1.50	0.60	0.005
Hardox 550	0.37	0.50	1.30	0.020	0.010	1.40	1.40	0.60	0.004

Закінчення таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hardox 600	0.47	0.70	1.00	0.015	0.010	1.20	2.50	0.70	0.005
Hardox Extreme	0.47	0.50	1.0	0.015	0.020	1.20	2.50	0.80	0.005
30ХГСА (ГОСТ 4543)	0,28– 0,34	0,9– 1,2	0,8– 1,1	≤0,025	≤0,025	0,8– 1,1	≤0,3	≤0,15	V≤0,05;W≤0,2; Cu≤0,3;Ti≤0,03 N≤0,008
30ХГСН2А (30ХГСНА) хромансиль	-	0,27– 0,34	0,9–1,2	1,0–1,3		0,9– 1,2	1,4– 1,8		
18ХГНМФР	0,16– 0,20	0,17– 0,37	1,2–1,5	≤0,02	≤0,015	0,7– 1,0	0,5– 0,8	0,20– 0,35	0,001–0,005–В 0,07–0,15 – V

Примітка :

1 - Максимальне значення для листа товщиною 20 мм

2 - Товщина листа 0,7–2,10 мм

Зносостійкі сталі – це категорія сталей, яка характеризується підвищеною міцністю і твердістю, а також високою стійкістю до стирання і постійного зносу (абразивний знос, знос ковзання, ударний знос). Відомо, що чим вищий тимчасовий опір сталі, тим вища її зносостійкість. При цьому за даними ЦНДІЧормету, зносостійкість сталі при стиранні з підвищенням рівня тимчасового опору з 450...500 Н/мм² до 700...800 Н/мм² в умовах роботи (наприклад, платформ кар'єрних 200-тонних самоскидів) збільшується незначно (до 30...50 %) і тільки підвищення тимчасового опору сталі до 1 050...1 200 Н/мм² викликає різке (у 3...5 раз)

збільшення зносостійкості. Причому дослідження зносостійкості сталі в умовах змінного ударно-абразивного зношування за методикою стендових випробувань різальних елементів землерийних машин показали, що опір зносу залежить не тільки від твердості сталі. У разі абразивного зносу стійкість проти зносу буде визначатися також рівнем в'язких властивостей, відносного подовження й однорідності структури. На рисунку 1 показано зносостійкість сталей, оброблених на однакову твердість, але які володіють різною ударною в'язкістю і пластичністю.

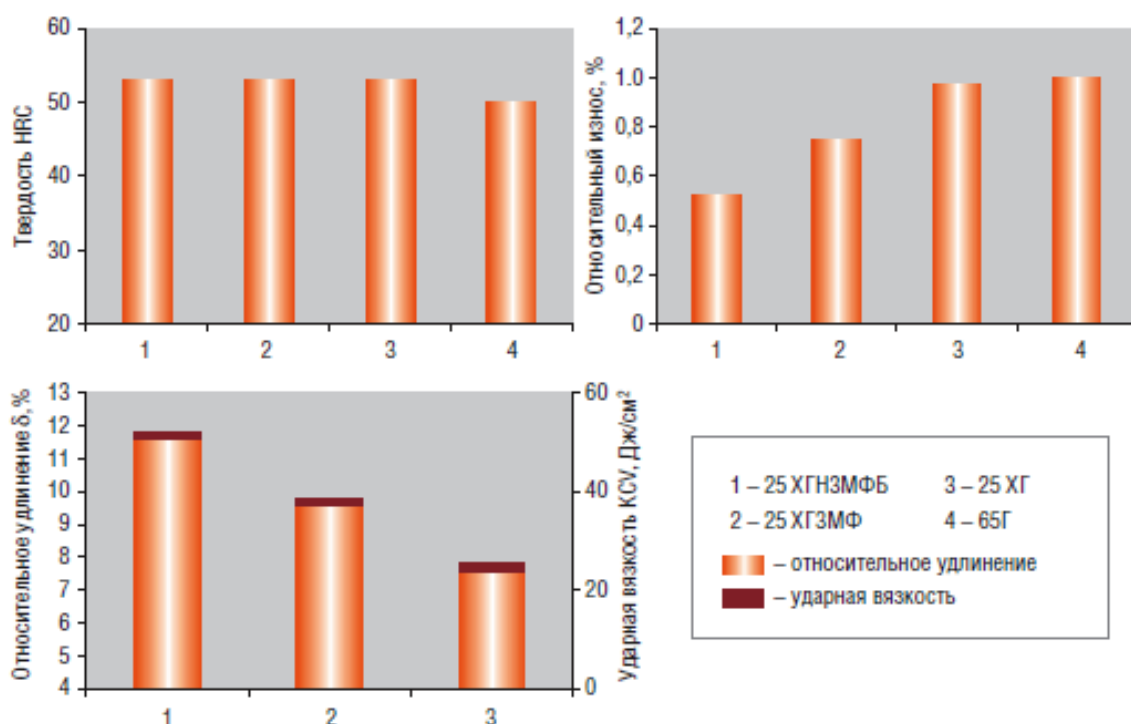


Рис. 1. Відносна зносостійкість сталей залежно від ударної в'язкості і пластичності [1] /
Fig. 1. The relative wear resistance steels depending on impact elasticity and plasticity

Із результатів досліджень ЦНДІЧормету на прикладі 4 марок сталей відомо, що найбільшу зносостійкість показала сталь 25ХГНЗМФБ (1), яка володіє високою в'язкістю і пластичністю – її стійкість удвічі перевершує зносостійкість взятої для порівняння яка широко застосовуваної сталі 65Г (4). Зі зниженням в'язкості і пластичності дослідних сталей 25ХГЗМФ (2) і 25ХГ (3) їх зносостійкість зменшувалася відповідно. Підвищена зносостійкість сталі з високою в'язкістю і пластичністю в порівняно зі сталями з меншими зазначеними характеристиками, за однакової їх міцності, пояснюється тим, що в'язкі матеріали краще чинять опір відриву мікроскопічних шматочків металу від поверхні листа за впливу твердих мінералів, наприклад, під час навантаження і розвантаження породи.

Установлено також, що якщо сталь володіє неоднорідною структурою, що складається із суміші мартенситу (бейніту) і полігонального фериту, її зносостійкість зменшується, незважаючи на високу твердість. Важливою і обов'язковою умовою високої зносостійкості сталі для відповідальних виробів постає її прогартованість на всю товщину листа. Твердість сталі по товщині листа не повинна знижуватися.

Відомо, що після спеціальної термічної обробки з отриманням дрібного аустенітного зерна (11–12 балів) і певного типу субструктурної побудови можуть бути отримані унікально високі рівні механічних властивостей у сталі, з якої можуть виготовлятися протикульові вироби. На підставі аналізу впливу хімічного складу на зносостійкість установлено, що введення в сталь хрому, нікелю і молібдену сприятливо позначається на зносостійкості. Однак вміст цих елементів повинен бути строго обмежений, виходячи з економічних і технологічних аспектів вирішення питання про розробку матеріалу.

Введення кремнію несприятливо позначається на зносостійкості, тому бажано, щоб його вміст у сталі був мінімальним. За підвищеної концентрації кремнію в листових сталях виникає небезпека розшарування прокату при підвищенні ступеня деформації і зниженні температури прокатки на останніх проходах або при проведенні подальшої зміцнювальної термічної обробки (або під час зварювання). Основні обмеження, які перешкоджають зменшенню його вмісту на стадії металургійного циклу, – це технологічні особливості виплавки сталі, зокрема, необхідність її повного розкиснення, але при цьому в металі зростає кількість неметалевих включень (чим вища чистота металу, тим менший його знос), що знижують міцність від утоми високоміцних сталей. Кремній також надає металу підвищену схильність до знеуглецювання під час нагрівів, знижену мартенситну прогартованість, прискорення до перестарювання та т. ін.

У працях А. Г. Рахштадта показано, що за підвищення вмісту кремнію понад $\approx 0,6\%$ він чинить негативний вплив на межу пружності сталі за рахунок стабілізації залишкового аустеніту. До позитивних якостей кремнію можна віднести здатність зміцнювати ферит і затримувати знеміцнення сталі під час відпуску – відомо, що кремній затримує виділення цементиту до температури відпуску $\approx 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ за рахунок підвищення стійкості ϵ -карбиду. Кремній також стабілізує субструктуру мартенситу. Аналіз зносостійких сталей подвійного призначення говорить про те, що максимальна концентрація кремнію в них рідко перевищує $0,7..0,8\%$, а в деяких перебуває в межах до $\sim 0,3\%$.

Розробляючи концепцію створення комплексної технології фінішної зміцнювальної обробки катаних листових карт із товщиною $4,5..6\text{ мм}$ для бронезилетів V та VI рівня захисту виходили з доцільності дослідження рівня властивостей гомогенного і гетерогенного металу, тому одночасно передбачено розробляти три різні технології їх обробки:

- зміцнювальна термічна обробка катаних заготовок (для гомогенної броні);
- комбінована (хіміко-термічна + зміцнююча термічна) обробка (для гетерогенної катаної броні);
- комбінована обробка (зміцнювальна термічна обробка + нанесення високоміцного шару матеріалу на поверхню пластини).

Один із перспективних напрямків отримання високоміцного протикульового броньового листа для жилетів V та VI рівня захисту – поєднання азотування і зміцнювальної термічної обробки.

Для збільшення ресурсу сталевих виробів традиційно після їх термообробки (гартування і високого відпуску) й отримання необхідних розмірів проводять їх азотування, що дозволяє збільшити твердість поверхні приблизно від 8 до $11..12\text{ ГПа}$. При цьому часто об'єднують операцію відпуску з азотуванням у зв'язку з тим, що температурні режими азотування і відпуску майже однакові. Такий поширений комбінований процес використовується у промисловості за атмосферного тиску і його часто називають у технічній літературі як азотування «пічним» способом. Цей процес має недоліки, один із найважливіших із котрих – низька швидкість зростання товщини азотованого шару. Застосування методу пічного азотування сталей із використанням аміаку за температур від 500 до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ дозволяє отримати за час обробки від 10 до 90 годин товщини азотованого шару в межах $0,2..0,6\text{ мм}$. Каталітичне азотування із застосуванням спеціальних каталізаторів для дисоціації аміаку дозволяє знизити тривалість обробки в печі вдвічі.

Останніми десятиліттями розроблені та впроваджені в промисловість процеси азотування у вакуумі в тліючому розряді і у вакуумно-дуговому газовому розряді [2; 3]. Під час азотування сталей у тліючому розряді утворюються фази $\text{Fe}_2\text{-3N}$, Fe_4N і

твердий розчин азоту в залізі. Однак значну частину азотованого шару становить крихка фаза Fe_2-3N , тому для підвищення його фізико-механічних властивостей і зменшення її вмісту азот розбавляють аргоном або воднем.

Іонне азотування в газовій плазмі вакуумно-дугових установок за температур від ~ 450 до 600 °C дозволяє скоротити час азотування до години, регулювати фазовий склад, змінюючи співвідношення робочих газів у суміші для досягнення необхідного ефекту, а також позбутися шкідливої дії аміаку, під час розкладання якого виділяється водень та провокує підвищення крихкості сталей. Нагрівання металевих виробів у вакуумі здійснюється за рахунок використання іонів газу або електронів. Вакуумно-дуговий газовий розряд під час азотування використовується в діапазоні тисків $0,01...0,5$ Па, що значно нижче, ніж тиск, що використовується в тліючому розряді. Тому вміст епсилон-фази за азотування в цьому розряді також істотно нижчий.

Для цього процесу властиві також деякі недоліки, наприклад, вироби складної конфігурації після такого азотування можуть мати деформації та жолоблення. До того ж такий процес азотування може реалізовуватися за температур $450...600$ °C, тому він не може бути використаний для сталевих деталей, які пройшли попередню обробку за режимом гартування + низький відпуск для отримання нормованого комплексу властивостей.

Отож у статті запропоновано змінити послідовність операцій зміцнення металу у процесі фінішної обробки сталевих карт для бронежилетів, тобто спочатку проводити азотування виробів (можливо, тільки однієї поверхні карти), а потім їх

термічну обробку за режимом гартування + низький або середній відпуск [3].

Для цього виріб зі сталі з припуском на розміри для подальшої чистої механічної обробки азотують вакуумно-дуговим способом [3], потім нагрівають у печі за звичайною технологією до температури аустенізації, гартують і піддають відпуску. Після цього видаляють припуск разом із дефектним окисним шаром (окалиною на поверхні) і отримують чисті розміри виробів. На обробленій поверхні забезпечується присутність азотованого шару, що містить γ' -фазу і твердий розчин азоту в залізі з твердістю вище стандартної для цієї марки сталі і товщиною в кілька сот мікрометрів.

На рисунку 2 наведено дані для деталі (пуансон) зі сталі 40X діаметром 6,6 мм з припуском на сторону товщиною 0,3 мм. Пуанسونи встановлюють у камері установки «Булат-6», відкачують її до тиску 0,004 Па, напускають азот до тиску 0,3 Па, вмикають двоступеневий дуговий газовий розряд при струмі 100 А і, регулюючи негативний потенціал на виробі в межах $0...1$ 300 В, підтримують температуру 650 °C протягом 1 години. Потім розряд вимикають, розгерметизовують камеру, виймають пуанسونи і встановлюють їх у гартівну піч, яку нагрівають до температури 840 °C, а потім охолоджують зануренням у мастило. Після цього проводять відпуск нагріванням до температури 200 °C протягом 1,5 години. Після цих операцій деталі обточують до чистового розміру (діаметром 6 мм), видаляючи дефектний шар металу разом із припуском. Як видно з рисунка 2, поверхня пуансонів після обробки має твердість значно вищу, ніж твердість сталі 40X після звичайної високотемпературної обробки (загартування і відпуск).

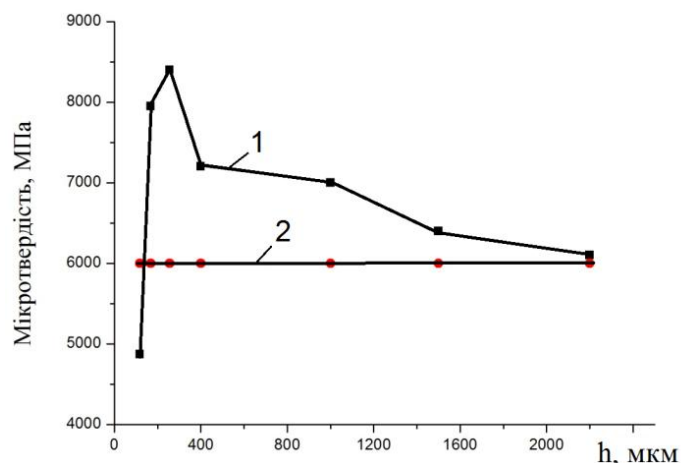


Рис. 2. Розподіл твердості пуансона зі сталі 40X по глибині (h) азотованого шару, час азотування – 1 година :
1 – азотований і загартований шар; 2 – твердість загартованого металу без азотування [3] /

Fig. 2. Distribution of hardness of a punch from steel 40X on depth (h) of an nitrated layer, nitriding time – 1 hour :
1 – nitrated and the tempered layer; 2 – hardness of the tempered metal without nitriding

Таким чином, запропонована технологія фінішної обробки сталевих карт для протикульових бронежилетів на рівень V–VI класу захисту може

забезпечити на азотованій поверхні виробу глибину шару 2...3 мм із твердістю ≥ 50 HRC після гартування і відпуску.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія машинобудування. Основи отримання вакуумно-дугових покриттів : підручник / [А. О. Андреев, В. М. Павленко, Ю. О. Сисоев]. – Харків : Нац. Аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського. – 2018. – 288 с.
2. Вакуумно-дуговые покрытия : учебник [А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев]. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2010. – 318с.
3. Спосіб хіміко-термічної обробки сталевих виробів : Патент України 117008U C23C 14/32 на корисну модель / А. О. Андреев, О. С. Жиров, О. В. Соболев, В. О. Столбовий та ін. – Бюл. № 11 від 12.06.2017. – 2017.

REFERENCES

1. Andreyev A.O., Pavlenko V.M. and Sisoyev Yu.O. *Tehnologiya mashinobuduvannya. Osnovi otrimannya vakuumno-dugovih pokrittiv : pidruchnik* [Technology of mechanical engineering. Basics of vacuum-arc coatings: a textbook]. Kharkiv : National Aerospace untitled M.Ye. Zhukovsky, 2018, 288 p. (in Ukrainian).
2. Andreyev A.A., Sablev L.P. and Grigorev S.N. *Vakuumno-dugovye pokrytiya* [Vacuum arc coating]. Kharkiv, NNC HFTI, 2010, 318 p. (in Russian).
3. Andreyev A.O., Jirov O.S., Sobol' O.V., Stolboviy V.O. and oth. *Patent Ukraïni 117008U C23C 1432 na korisnu model* [Patent of Ukraine 117008U C23C 14 \ 32 on the utility model]. *Sposib himiko-termichnoi obrobki stalevih virobiv* [Method of chemical and thermal treatment of steel products]. Byul. no. 11 from 12.06.2017, 2017. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 10.05.2019.