

PACS numbers: 61.66.Dk, 61.72.Ff, 62.20.Qp, 75.30.Cr, 81.30.Kf, 81.40.Pq, 81.65.Lp

Вплив технологічних параметрів на фізико-механічні й експлуатаційні властивості зносостійкої аустенітної високومانганової криці

В. М. Сажнєв, Г. В. Сніжною

*Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64,
69063 Запоріжжя, Україна*

Проведеними дослідженнями проаналізовано вплив основних компонентів хемічного складу, методів модифікування, умов експлуатації та випробувань на фізико-механічні й експлуатаційні характеристики високоманганової криці. Уточнено концентрації Карбону та Мангану для забезпечення оптимального комплексу властивостей криці в залежності від умов експлуатації. Підтверджено, що для деталей, які працюють в умовах абразивного зношування за високих динамічних і статичних навантажень, найкращі показники властивостей криці 110Г13Л забезпечуються за середніх значень концентрацій Карбону та Мангану в межах стандарту. Для деталей, які працюють за низьких ударних навантажень, доцільним є застосування аустенітних зносостійких криць із концентраціями Мангану на нижньому, а Карбону на верхньому рівнях у межах стандартного хемічного складу. Це уможливить підвищити ресурс роботи деталей зі зниженням витрат манганових феростопів. Запропоновано методу комплексного модифікування високоманганових криць, що полягає у введенні Алюмінію, Титану та Ванадію і яке забезпечує переведення плівкових нітридів Алюмінію в тяжкотопкі комплексні нітриди Алюмінію, Титану та Ванадію компактної форми. Ці включення діють як модифікатори-інокулятори, створюючи центри кристалізації, що сприяє подрібнен-

Corresponding author: Hennadiy Valentynovych Snizhnoy
E-mail: snow@zp.edu.ua

*Zaporizhzhia Polytechnic National University,
64 Zhukovsky Str., UA-69063 Zaporizhzhya, Ukraine*

Citation: V. M. Sazhnyev and H. V. Snizhnoy, Influence of Technological Parameters on the Physical, Mechanical and Operational Properties of Wear-Resistant Austenitic High-Manganese Steel, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 4: 503–522 (2023) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.45.04.0503](https://doi.org/10.15407/mfint.45.04.0503)

ню структури, підвищенню надійності та довговічності виливків. Досліджено вплив температури випробувань на ударну в'язкість високоманганової криці через зміни концентрацій Карбону та Мангану як основного показника надійності роботи деталей машин за низьких температур. Запропоновано використання питомої парамагнетної сприйнятливості аустенітної матриці в якості параметра прогнозування властивостей криці за низьких температур.

Ключові слова: високоманганова криця, аустеніт, мартенсит, карбід, межа міцності, ударна в'язкість, зносостійкість.

The influence of the main components of the chemical composition, modification methods, operating conditions and tests on the physical, mechanical and operational characteristics of high-manganese steel is analysed. The concentrations of carbon and manganese are refined to ensure the optimal set of steel properties depending on the operating conditions. As confirmed, for parts operating under abrasive wear conditions under high dynamic and static loads, the best properties of the 110Г13Л steel are provided at average values of carbon and manganese concentrations within the standard. For parts operating at low impact loads, it is advisable to use austenitic wear-resistant steels with manganese concentrations at the lower levels and carbon at the upper levels within the standard chemical composition. This is increasing the service life of parts, while reducing the cost of manganese ferroalloys. A method is proposed for the complex modification of high-manganese steels, which consists in the introduction of aluminium, titanium and vanadium and ensures the conversion of aluminium film nitrides into refractory complex aluminium, titanium and vanadium nitrides of a compact form. These inclusions act as inoculant modifiers, which form crystallization centres, contribute to the refinement of the structure, increase the reliability and durability of castings. The effect of test temperature on the impact strength of high-manganese steel with a change in the concentration of carbon and manganese, as the main indicator of the reliability of machine parts at low temperatures, is studied. It is proposed to use the specific paramagnetic susceptibility of the austenitic matrix as a parameter for predicting the properties of steel at low temperatures.

Key words: high-manganese steel, austenite, martensite, carbide, tensile strength, impact strength, wear resistance.

(Отримано 8 лютого 2023 р.; остаточн. варіант — 28 лютого 2023 р.)

1. ВСТУП

Зносостійкі криці, самою розповсюдженою з яких є високоманганова криця типу 110Г13Л, використовуються для виготовлення деталей у гірничорудному, збагачувальному устаткуванні, сільськогосподарському, транспортному машинобудуванні. З цієї криці виготовляють зуби та коромисла ковшів екскаваторів, щокі, валки, біла, молотки, броні дробарок, футерувальні плити кульових,

стрижневих, вихрових млинів, хрестовини та стрілки для залізничного транспорту та трамвайних колій, ланки гусениць екскаваторів, тракторів і багато інших відповідальних деталей — усього більше 400 найменувань [1]. Усі ці деталі піддаються зношуванню; кожна деталь працює у специфічних умовах. Одна зношується за великих динамічних або статичних навантажень, друга — за навантажень, що вигинають, а третя піддається тільки абразивному стиранню. Можливе поєднання двох і більше типів руйнівної дії на один і той же деталь. Всім цим діям протистоїть унікальна здібність високоманганової криці зміцнюватися під час зовнішніх навантажень [2].

Стійкість деталей у тій чи іншій машині залежить від природи матеріалу, з яким вони контактують, а також від властивостей криці, таких як міцність, пластичність, ударна в'язкість, твердість, зносостійкість, холодостійкість; та обов'язковою умовою надійної роботи машини є забезпечення відсутності аварійних поломок її деталей, які або самі є робочими органами, або виконують бронефутерувальні функції деталей, які в роботі піддаються значному абразивному зношуванню під час статичних або динамічних навантажень.

Нині виробництво зносостійких деталей має забезпечувати максимальну економічну ефективність, враховуючи високу вартість манганових феростопів. Цю проблему вирішують двома шляхами: використанням економно легованих криць перлітного класу або варіюванням хемічним складом і технологічними засобами під час виробництва виливків із високоманганової криці аустенітного класу. З огляду на це, дослідження та розробка рекомендацій стосовно раціонального хемічного складу криці, її комплексного модифікування для різних умов експлуатації забезпечать надійність роботи деталей з пониженням витрат манганових феростопів і є актуальними.

2. АНАЛІЗА ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ

Аустенітна високоманганова криця, яку було запропоновано Гадфільдом, містить 1,2% Карбону, 12% Мангану [3], що після гартування у воді від 950–1000°C забезпечує стабільність аустеніту та достатньо високі значення фізико-механічних властивостей. Такий вміст основних компонентів високоманганової криці відповідає криці 110Г13Л. Але діючими стандартами та технічними умовами на крицю 110Г13Л, незважаючи на те, що рівень її міцнісних і пластичних властивостей, а також зносостійкість в значній мірі визначаються хемічним складом, допускаються достатньо широкі коливання меж вмісту основних елементів [1]. Пониження в криці концентрацій як Карбону, так і Мангану приводить до пониження ста-

більшості аустеніту, і за певних хемічних складів у криці можуть одночасно бути присутніми структури, відмінні від аустеніту [4], що стає причиною значних змін властивостей криці. А враховуючи, що статичні та динамічні навантаження на швидкозношувані змінні деталі різних машин значно відрізняються, то разом із пониженням стабільності аустеніту це впливає на зміцнення поверхневого шару деталей, що є найважливішим чинником їхньої зносостійкості. Відомо [4], що загальний ефект зміцнення складається із зміцнення від пластичної деформації твердого розчину, від фазових перетворень під час розпаду твердого розчину, від зміцнення нових фаз. Ступінь впливу кожного чинника визначається умовами експлуатації та хемічним складом криці [5, 6]. В [7, 8] наведено результати досліджень, які вказують на залежність магнетного стану криці, її фізико-механічних властивостей, формування мартенситу деформації від хемічного складу та ступеня деформації.

Криці із пониженим вмістом Мангану мають меншу стабільність аустеніту та здатні більшою мірою змінювати свої властивості під навантаженням внаслідок перетворень, що перебігають під час пластичної деформації. За мікроударного навантаження (багаторазових ударів) розпад аустеніту відбувається ще більш інтенсивно [4]. Відповідно, диференційований підхід до вмісту в криці основних елементів хемічного складу в залежності від умов експлуатації дасть змогу підвищити ефективність її використання.

Як відомо, одним із способів підвищення якісних властивостей високоманганових криць є модифікування. Аналіз літературних даних показує, що найбільш ефективними модифікаторами високоманганової криці є елементи, які утворюють фази втілення типу MeC та MeN з високою температурою дисоціації та переходу в твердий розчин. Нітридо- та карбідоутворювальні елементи подрібнюють зерно аустеніту, підвищують однорідність структури, вихідну твердість, зносостійкість, міцнісні властивості.

Найбільш широке застосування для модифікування криці 110Г13Л одержали Титан, Ванадій, Кальцій, РЗМ [1], але концентрації їх у криці за даними різних авторів значно відрізняються. Представляли інтерес дослідження впливу модифікаторів на структуру, неметалеві включення та властивості високоманганової криці за різних концентрацій Мангану.

Достатньо висока холодостійкість високоманганової криці уможливорює нормально працювати деталям за низьких температур. В таких умовах найбільш важливим показником роботоздатності стає відсутність аварійних поломок деталей, яка забезпечується, в першу чергу, рівнем ударної в'язкості криці. Тому було б бажано контролювати метал кожного топлення на ударну в'язкість під час виготовлення деталей, що працюють за низьких температур. Але контроль фізико-механічних властивостей високоманганової

криці дуже утруднюється трудомістким процесом виготовлення зразків для випробувань. Для вирішення цієї проблеми автором [1] на основі вивчення літературних даних і власних досліджень було запропоновано емпіричну формулу для приблизного визначення ударної в'язкості в залежності від ряду чинників: концентрацій у металі Карбону, Фосфору, Титану; балу зерна аустеніту; сумарного вмісту в шлаку перед випуском топленьня закису заліза та закису мангану; температури випробування зразків. За допомогою цієї формули можна з достатнім рівнем достовірності розраховувати ударну в'язкість криці без проведення випробувань на копрі. Але в цій формулі не було враховано такі важливі чинники, як режим термічного оброблення, наявність пор, рихлості, тріщин у зразках, заміщення криці неметалевими включеннями, стан поверхні зразків та ін. А інколи вони можуть стати вирішальним чинником.

3. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета роботи — встановити залежності фізико-механічних властивостей і зносостійкості від вмісту основних хімічних елементів, концентрацій модифікаторів, температури випробувань, парамагнетного стану аустенітної матриці високоманганової криці.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: дослідити вплив Карбону та Мангану на структуру, властивості та фазовий склад високоманганової криці; дослідити залежність зношування високоманганової криці від хімічного складу й умов експлуатації; встановити вплив модифікування на структуру, неметалеві включення та властивості високоманганової криці; встановити наявність кореляційного зв'язку між парамагнетною структурою аустенітної матриці й ударною в'язкістю криці за негативних температур.

4. МАТЕРІЯЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Випробування проводили на литих зразках (без механічного оброблення), загартованих у воді від температури у 1050°C. Хімічний склад досліджуваних високоманганових криць наведено у табл. 1. Криці витоплювали в індукційній тигльовій печі з основною футеровкою. Концентрація Мангану в крицях варіювалася в межах 7,5–14,5%, Карбону — 0,8–2,2%. Вміст інших елементів основного хімічного складу підтримувався на середньому рівні в межах стандарту для криці 110Г13Л. Розкиснення криць проводили Алюмінієм із розрахунку його залишкового вмісту в металі у 0,015–0,020%. Концентрації модифікаторів складали: Титану — 0,05–0,15%, Ванадію — 0,10–0,15%, Кальцію — 0,05–0,1% (в перерахунку на ме-

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад і вміст газів високоманганових криць 110Г13Л, 110Г10Л, 110Г8Л (% мас.).**TABLE 1.** Chemical composition and gas content of high-manganese steels 110Г13Л, 110Г10Л, 110Г8Л (% mas.).

Марка криці	№	Вміст елементів, % мас.										Присадка Ca, %	Вміст газів, %	
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	Ti	РЗМ	V		O ₂	N ₂
Г13Л	1	1,36	13,100	0,660	0,0900	0,0270	29	0,013	–	–	–	–	0,00800	0,0096
	2	1,36	13,150	0,680	0,0900	0,0220	300	0,180	150	–	–	–	0,0075	0,013
	3	1,38	13,150	0,700	0,0900	0,0230	300	0,18	–	–	–	0,10	0,0076	0,013
	4	1,30	13,050	0,680	0,0900	0,0130	300	0,16	–	0,03	–	–	0,0050	0,013
	5	1,38	13,1	0,700	0,0900	0,0180	280	0,18	–	–	0,15	–	0,0090	0,010
	6	1,38	13,630	0,680	0,0900	0,0210	300	0,150	0,075	–	0,15	–	0,0064	0,011
	7	1,38	10,501	0,00	0,11	0,0180	300	0,15	–	–	–	–	0,0080	0,014
Г10Л	8	1,40	10,551	0,00	0,12	0,0180	300	0,160	150	–	–	–	0,0063	0,014
	9	1,39	10,550	0,90	0,11	0,0200	310	0,16	–	–	–	0,10	0,0060	0,010
	10	1,39	10,660	0,94	0,11	0,0240	300	0,15	–	0,03	–	–	0,0057	0,010
	11	1,42	10,601	0,08	0,11	0,0260	300	0,18	–	–	0,15	–	0,0087	0,011
	12	1,34	10,551	0,06	0,11	0,0260	290	0,150	0,075	–	0,15	–	0,0067	0,013
	13	1,26	7,95	0,610	0,0920	0,0160	300	0,15	–	–	–	–	0,0060	0,011
	14	1,26	7,95	0,580	0,0920	0,0140	300	0,150	150	–	–	–	0,0076	0,015
Г8Л	15	1,26	7,84	0,620	0,0920	0,0160	300	0,17	–	–	–	0,10	0,0050	0,012
	16	1,26	7,84	0,670	0,0920	0,0180	290	0,16	–	0,03	–	–	0,0045	0,011
	17	1,28	7,84	0,620	0,0920	0,0180	300	0,16	–	–	0,15	–	0,0050	0,011
	18	1,26	7,84	0,610	0,0920	0,0140	300	0,150	0,075	–	0,15	–	0,0055	0,014

талевий із силікокальцію), РЗМ — 0,02–0,04%.

Випробування на розрив проводили на машині марки УРМ-50. Для визначення ударної в'язкості зразки з U-подібним надрізом випробували на маятниковому копрі МК-30А. Міряння твердості проводили на Бринеллевому приладі, мікротвердості — на приладі ПМТ-3. Визначення ударно-абразивної зносостійкості проводили в лабораторному кульовому млині за відношенням втрат маси еталонних і дослідних зразків. Для визначення густини було застосовано методу гідростатичного зважування. Корозійну стійкість визначали в модельному середовищі з рН = 9, що відповідало виробничим умовам збагачувальних процесів чорної та кольорової металургії. Мікроструктурну аналізу та дослідження неметалевих включень проводили на металографічному мікроскопі МИМ-8 та

електронному мікроскопі УЭМВ-100К. Питому парамагнетну сприйнятливості аустеніту досліджуваних криць, низькій вміст феромагнетних фаз визначали чутливою магнетометричною методою [9, 10].

5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМАНГАНОВОЇ КРИЦІ

5.1. Вплив Карбону та Мангану на властивості високоманганової криці

Межі вмісту основних хемічних елементів, які встановлено стандартом для зносостійкої аустенітної криці 110Г13Л, вміщують у себе оптимальні концентрації Мангану та Карбону у криці Гадфільда й охоплюють ще достатньо широкі інтервали, що приводить до значних змін у стабільності аустеніту та, відповідно, у властивостях криці. Крім того, в сучасних умовах під час виготовлення виливків із криці 110Г13Л найчастіше топлення проводять методом перетоплення відходів з використанням відпрацьованих деталей як основного компонента шихти. Після розтоплення шихти в дуговій печі вміст Мангану в металі знижується нижче нижнього рівня хемічного складу криці 110Г13Л, а Карбону, навпаки, піднімається на верхній рівень, а інколи і вище нього. Тому компенсувати недолік Мангану треба металевим манганом або низьковуглецевим фероманганом, що значно підвищує собівартість криці. В результаті, щоб понизити вартість, виливки виготовляють із криць з Манганом на нижньому рівні або нижче, а Карбону — на верхньому або вище, тобто далеко від класичного складу криці Гадфільда.

Результати досліджень впливу Карбону та Мангану на фізико-механічні властивості високоманганової криці наведено на рис. 1, а на ударно-абразивну зносостійкість — на рис. 2. Дослідження показали, що всі фізико-механічні властивості знижувалися з зниженням концентрації Мангану. Межа міцності високоманганових криць з підвищенням вмісту Карбону монотонно зростала (рис. 1, а), що пояснюється підвищенням їхньої здібності до зміцнення при зростанні концентрації Карбону.

Криві, що описують зміни показників пластичності, ударної в'язкості та твердості мали екстремальний характер. Спочатку за рахунок підвищення стабільності аустеніту та зменшення кількості мартенситних фаз із зростанням вмісту Карбону [4] пластичні характеристики (рис. 1, б, в) й ударна в'язкість (рис. 1, г) зростали, а твердість зменшувалася (рис. 1, д).

Після перевищення концентрації Карбону з інтервалу 1,2–1,3%, який є дуже близьким до межі розчинності Карбону в аустеніті, криві змінювали нахил у протилежному напрямку за рахунок збі-

льшення кількості залишкових карбідів, які не піддаються розчиненню під час гартування [1] і які, по-перше, самі негативно впливають на фізико-механічні властивості криці, а по-друге, впливають на рух дислокацій і, відповідно, на перебудову ґратниці [4].

В той же час, показник зносостійкості змінювався в залежності від концентрації Карбону та Мангану не так однозначно, як фізико-механічні властивості. Більш висока зносостійкість криць із пониженням вмісту Мангану (рис. 2) пов'язана з їхньою більшою здібністю до зміцнення за механічного впливу на поверхневий шар.

Вірогідно, що наявність мартенситу деформації в поверхневих шарах криць Г10Л і Г8Л приводить до більш високого їхнього зміцнення і, відповідно, зростання опору абразивному зношуванню. Криця Г8Л, що має найменшу стійкість аустеніту, мала б показувати найбільш високі значення зносостійкості. Але показник зносостійкості цієї криці за ударно-абразивного зношування в кульовому млині був нижче, ніж у криці Г10Л за будь-яких концентрацій Карбону. Крім того, з пониженням вмісту Карбону нижче межі утворення первинного мартенситу [4] зносостійкість криці Г8Л була навіть нижче, ніж у криці Г13Л. Наявність двох типів мартенситів деформації (ϵ і α') у високоманганових крицях підтверджується в роботах [11, 12].

У високомангановій криці зі стабільним аустенітом процес дефо-

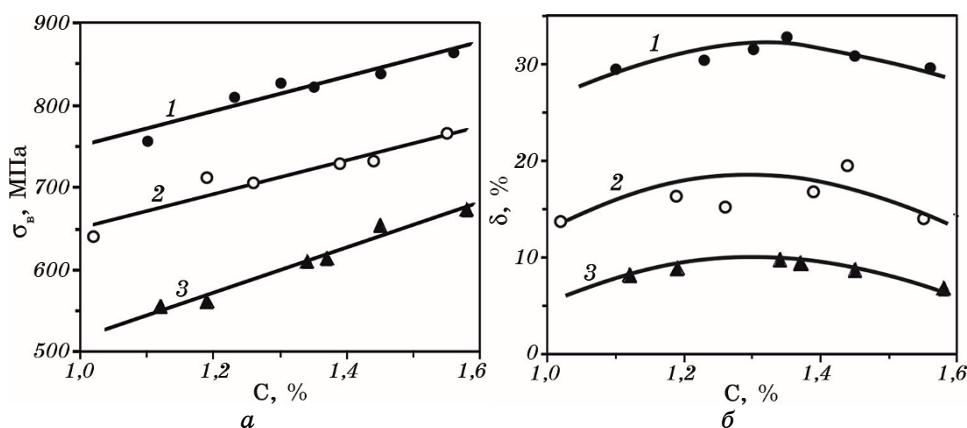
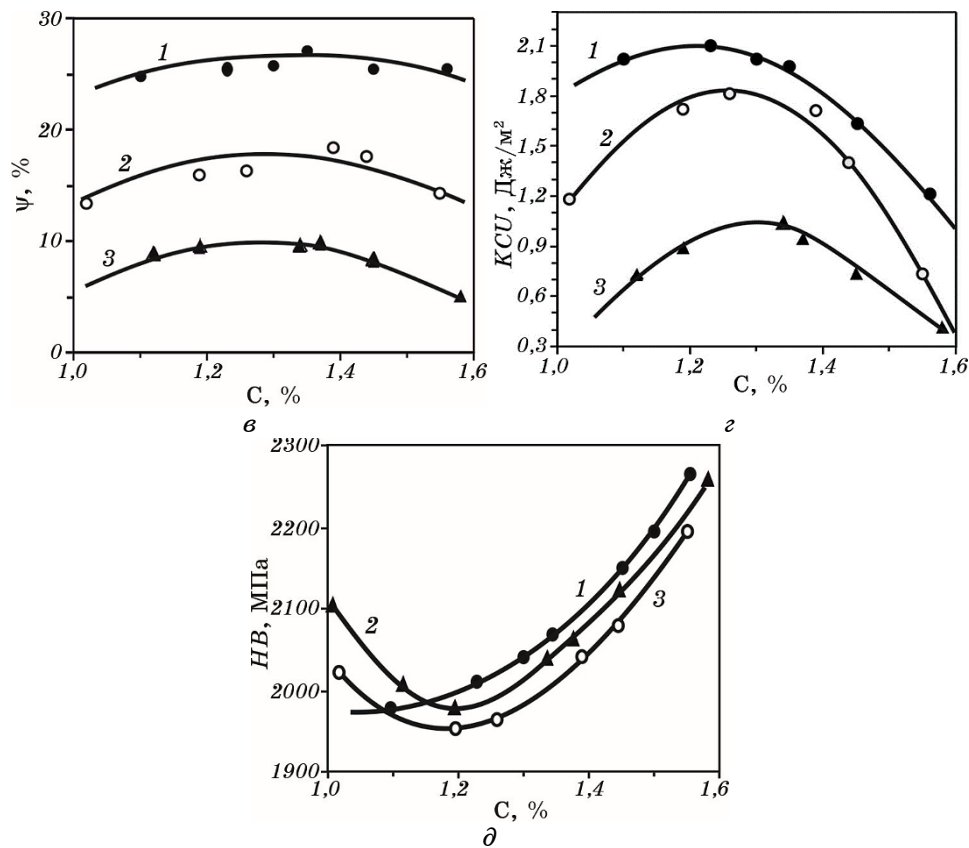


Рис. 1. Залежність фізико-механічних властивостей високоманганових криць (крива 1 — Г13Л, крива 2 — Г10Л, крива 3 — Г8Л) від вмісту Карбону: межа міцності σ_b (а), відносне видовження δ (б), відносне звуження Ψ (в), ударна в'язкість KCU (г), твердість HB (д).

Fig. 1. Dependence of the physical and mechanical properties of high-manganese steels (curve 1—Г13Л, curve 2—Г10Л, curve 3—Г8Л) on the carbon content: strength limit σ_b (a), relative elongation δ (b), relative narrowing Ψ (c), impact viscosity KCU (d), HB hardness (e).



Продовження рис. 1.

Continuation of Fig. 1.

рмацийного двійникування є домінувальним механізмом зміцнення [13]. Але з підвищенням у криці вмісту Мангану за низького рівня пластичної деформації, якому відповідає ударно-абразивне зношування в кульовому млині, характеристики міцності понижуються, тому що Манган пригнічує утворення двійників [13]. Відповідно, зносостійкість криці Г13Л має нижчі показники зносостійкості, ніж нестабільні криці Г8Л і Г10Л, в яких проходить інший механізм зміцнення.

Аналогічні результати досліджень ударно-абразивної зносостійкості криці з 10% Мангану порівняно із крицею 110Г13Л було одержано в роботі [14], авторами якої було показано, що підвищення зносостійкості криці з метастабільним аустенітом досягається також додатковим економічним легуванням.

Дослідження змін мікротвердості вказаних криць до та після

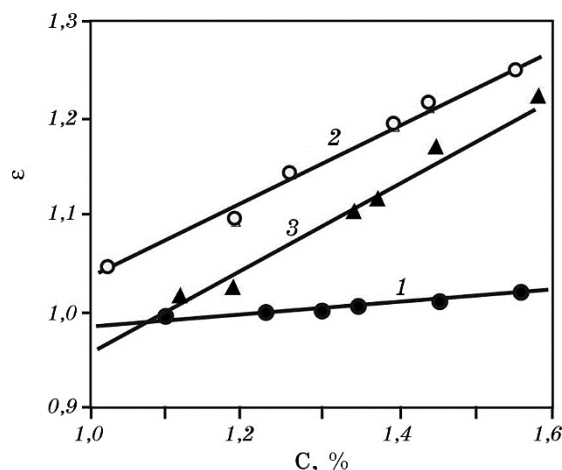


Рис. 2. Залежність зносостійкості високоманганевих криць від вмісту Карбону за випробувань у кульовому млині: 1 — Г13Л, 2 — Г10Л, 3 — Г8Л.

Fig. 2. Dependence of wear resistance of high-manganese steels on the carbon content during tests in a ball mill: 1—Г13Л, 2—Г10Л, 3—Г8Л.

зношування підтвердили можливість пониження стабільності аустеніту й утворення ε - і α' -мартенситних фаз з пониженням вмісту Мангану та Карбону (рис. 3).

До зношування мікротвердість поверхневого шару зразків із криці Г13Л зі збільшенням концентрації Карбону знаходилася приблизно на одному рівні. Наявність мартенситних фаз у крицях Г10Л і Г8Л за низьких концентрацій Карбону забезпечувала більш високі значення мікротвердості. З підвищенням стабільності аустеніту мікротвердість криць Г10Л і Г8Л монотонно знижувалася та досягала рівня криці Г13Л за високих концентрацій Карбону.

Після зношування найбільш високі значення мікротвердості мали зразки із криці Г8Л. З підвищенням концентрації Мангану за постійної концентрації Карбону значення мікротвердості знижувалися. Збільшення концентрації Карбону приводили до підвищення мікротвердості поверхневого шару у всіх досліджуваних крицях, але у крицях Г10Л і Г8Л зростання було більш інтенсивним, ніж у криці Г13Л. Це можна пояснити наступними причинами. В криці Г13Л збільшення вмісту Карбону викликає підвищення здатності до зміцнення, що пов'язано з посиленням ефекту блокування дефектів кристалічної будови атомами Карбону. В крицях Г10Л і Г8Л до цього додається утворення мартенситу деформації, твердість якого теж зростає з підвищенням концентрації Карбону.

Металографічні дослідження (рис. 4) показали, що структура досліджуваних криць у литому стані представляла собою аустеніт із

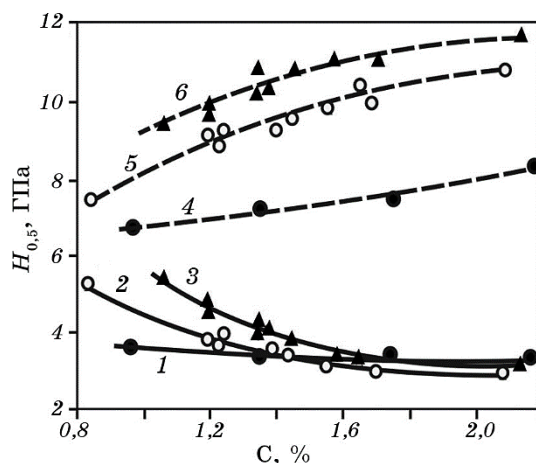


Рис. 3. Мікротвердість поверхневих шарів зразків високоманганових криць до (криві 1, 2, 3) та після (криві 4, 5, 6) зношування у кульовому млині: 1, 4 — Г13Л, 2, 5 — Г10Л, 3, 6 — Г8Л.

Fig. 3. Microhardness of surface layers of high-manganese steel samples before (curves 1, 2, 3) and after (curves 4, 5, 6) wear in a ball mill: 1, 4—Г13Л, 2, 5—Г10Л, 3, 6—Г8Л.

включенням великих карбідів. Збільшення вмісту Карбону в крицях більше 1,5% приводило до утворення суцільної сітки карбідів, розташованих переважно по межах зерен. Термічне оброблення, гартування у воді з 1050°C, незалежно від концентрації Мангану, забезпечувало одержання у зразках аустенітної структури з остаточними карбідами за високого вмісту Карбону.

5.2. Вплив модифікаторів на властивості високоманганових криць

Вплив різних модифікаторів досліджували в умовах порційної розливки рідкого металу. Для кожного варіанту оброблення визначали механічні властивості: ударно-абразивну зносостійкість, глибинний показник корозії, вміст Оксигену та Нітрогену у криці, проводили металографічну та мікрофрактографічну аналізи. Результати випробувань високоманганових криць (табл. 2) показали, що найбільш ефективно підвищення механічних властивостей та ударно-абразивної зносостійкості високоманганових криць забезпечували: Титан за його вмісту в металі 0,05–0,15%, Ванадій — 0,10–0,15% та спільні присадки Алюмінію, Титану та Ванадію з остаточною вмістом у вказаних межах. Істотне підвищення механічних властивостей було одержано також під час модифікування Кальцієм у кількості 0,05–0,1% (в перерахунку на металевий).

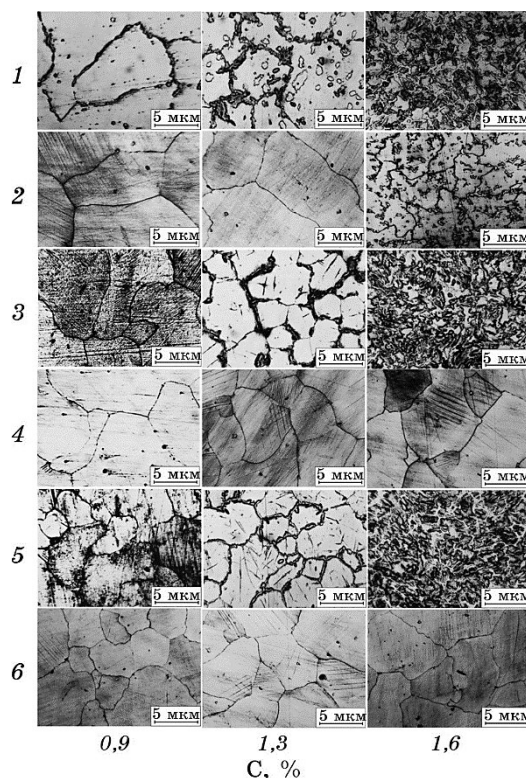


Рис. 4. Мікроструктура досліджуваних криць (1, 2 — Г13Л, 3, 4 — Г10Л, 5, 6 — Г8Л) у литому (1, 3, 5) і загартованому (2, 4, 6) станах за зростаючих концентрацій Карбону (0,9%, 1,3%, 1,6%).

Fig. 4. Microstructure of the studied steels (1, 2—Г13Л, 3, 4—Г10Л, 5, 6—Г8Л) in the cast (1, 3, 5) and hardened (2, 4, 6) states with increasing carbon concentrations (0.9%, 1.3%, 1.6%).

Глибинний показник корозії мав незначні зміни в залежності від вмісту модифікаторів, і, що особливо слід відмітити, пониження концентрації Мангану в криці не приводило до підвищення корозійної стійкості, на відміну від результатів досліджень корозійного поведіння аустенітної TWIP-криці Fe–Mn–Al–Si в розчині хлориду [15]. А саме, зі збільшенням вмісту Мангану в безвуглецевій аустенітній криці TWIP збільшується швидкість корозії.

Металографічні дослідження криць 110Г13Л, 110Г10Л, 110Г8Л з добавками Алюмінію, Титану, Кальцію, РЗМ і Ванадію показали, що природа та форма неметалевих включень у всіх крицях однакова та безпосередньо зв'язана із вмістом елемента-модифікатора. В крицях, розкиснених Алюмінієм, було виявлено глобулярні включення алюмоманганових силікатів (рис. 5, а). Мікрофрактографічні

ТАБЛИЦЯ 2. Вплив модифікування на властивості криць Г13Л, Г10Л, Г8Л.**TABLE 2.** The effect of modification on the properties of Г13Л, Г10Л, Г8Л steels.

Марка криці	Модифікатор	Механічні властивості						Ударно-абразивна зносостійкість ε	Густина d , г/см ³	Швидкість корозії Π , мм/рік
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²	HV , МПа			
Г13Л	Al	406	810	32,7	29,4	2,12	1870	1,01	7,8050	0,0002
	Al + Ti	411	834	33,4	29,7	2,33	2020	1,06	7,8116	0,0003
	Al + Ca	407	842	34,9	30,9	2,24	1920	1,03	7,8110	0,0002
	Al + PЗМ	398	826	31,4	29,6	2,04	1960	1,07	7,8188	0,0003
	Al + V	417	831	33,7	30,1	2,31	2070	1,08	7,8160	0,0003
	Al + Ti + V	426	851	34,1	31,3	2,35	2120	1,10	7,8139	0,0002
Г10Л	Al	419	742	19,2	18,5	1,72	1830	1,16	7,7852	0,0002
	Al + Ti	431	787	20,8	19,9	1,94	2070	1,27	7,7887	0,0002
	Al + Ca	422	779	20,7	19,6	1,86	1870	1,17	7,7881	0,0003
	Al + PЗМ	416	772	18,4	18,5	1,65	1960	1,26	7,7943	0,0002
	Al + V	438	783	21,1	19,7	1,89	2120	1,28	7,7899	0,0003
	Al + Ti + V	445	794	21,3	20,9	1,96	2170	1,31	7,7889	0,0003
Г8Л	Al	438	612	8,5	8,1	0,98	1830	1,09	7,8717	0,0002
	Al + Ti	447	651	9,4	9,3	1,13	2120	1,22	7,8728	0,0002
	Al + Ca	440	639	9,3	8,7	1,08	1870	1,11	7,8724	0,0002
	Al + PЗМ	429	636	8,2	8,0	0,95	2020	1,22	7,8782	0,0002
	Al + V	451	648	8,9	9,2	1,09	2170	1,24	7,8773	0,0003
	Al + Ti + V	466	673	9,8	9,6	1,14	2230	1,29	7,8769	0,0002

дослідження уможливили встановити, що на властивості високоманганових криць найбільший вплив роблять дрібнодисперсні нітридні вклучення. В зламах криць, розкиснених Алюмінієм, було виявлено плівкові нітриди Алюмінію (рис. 5, б), навкруги яких одержала розвиток зона крихкого руйнування.

Добавки Кальцію та РЗМ приводили до подрібнення та зменшення загальної кількості глобулярних вклучень. Позитивний вплив цих елементів проявився також у пониженні Оксигену в металі (див. табл. 1). Величини зерен з добавками Кальцію та РЗМ не змінювалися. Модифікування Титаном і Ванадієм привело до утворення нітридів (рис. 5, в) і карбонітридів (рис. 5, д). У крицях, модифікованих

Алюмінієм і Титаном, основну масу нітридних включень складали нітриди Титану правильної кубічної форми розмірами у 5–20 мкм (рис. 5, з).

За спільного модифікування Алюмінієм, Титаном і Ванадієм було одержано комплексні включення розмірами у 0,5–5,0 мкм (рис. 5, є), які вміщували Алюміній, Титан, Ванадій і Нітроген. Такі включення ідентифікувалися як нітриди Алюмінію, Титану, Ванадію, а також як карбонітриди Ванадію. Присадки Титану та Ванадію в 1,3–1,5 разів подрібнювали зерна аустеніту та чинили пози-

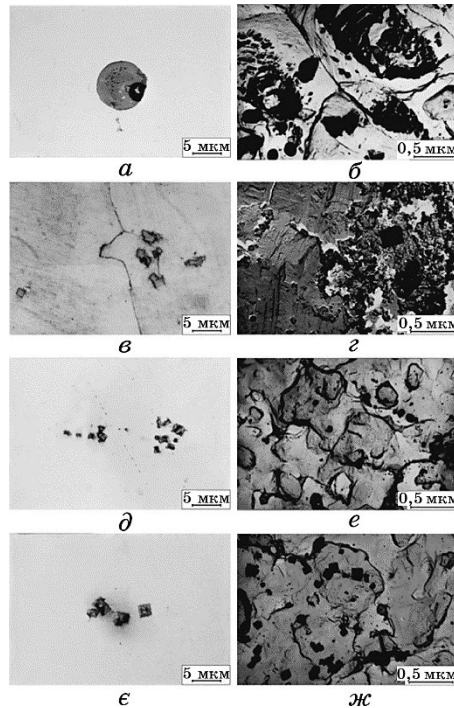


Рис. 5. Неметалеві включення в модифікованих високоманганових крицях: алюмомангановий силікат у криці, модифікованій Алюмінієм (0,015% Al) (а), плівковий нітрид Алюмінію (0,015% Al) (б), нітрид Титану (0,015% Al + 0,08% Ti) (в), (з), карбонітрид Ванадію (0,015% Al + 0,15% V) (д), нітрид Ванадію (0,015% Al + 0,15% V) (е), нітриди Алюмінію, Титану та Ванадію (0,015% Al + 0,08% Ti + 0,15% V) (є), (ж).

Fig. 5. Non-metallic inclusions in modified high-manganese steels: manganese–alumina silicate in steel modified with aluminium (0.015% Al) (a), aluminium-nitride film (0.015% Al) (б), titanium nitride (0.015% Al + 0.08% Ti) (в), (з), vanadium carbonitride (0.015% Al + 0.15% V) (д), vanadium nitride (0.015% Al + 0.15% V) (е), aluminium, titanium, and vanadium nitrides (0.015% Al + 0.08% Ti + 0.15% V) (є), (ж).

тивний вплив на рівномірність розподілу карбідів $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$.

За модифікування Алюмінієм і Ванадієм у крицях було виявлено дрібнодисперсні включення розмірами у $0,5\text{--}2,0$ мкм (рис. 5, е). Мікрорентгеноспектральною аналізою цих включень встановлено наявність в них Ванадію. За модифікування Алюмінієм і Титаном або Алюмінієм і Ванадієм в зламах криць практично були відсутні плівкові нітриди Алюмінію.

За спільного модифікування Алюмінієм, Титаном і Ванадієм було одержано комплексні включення розмірами у $0,5\text{--}5,0$ мкм, що містили Алюміній, Титан, Ванадій і Нітроген (рис. 5, ж).

Комплексне модифікування високоманганових криць Алюмінієм, Титаном і Ванадієм сприяло переведенню плівкових включень в об'ємні, що виділялися в рідкій криці. Ці включення діяли як модифікатори, утворюючи центри кристалізації. Структура криці помітно подрібнювалася та послаблювалася дія фосфідної евтектики [1]. Дослідження показали, що раціональними методами модифікування можна досягти підвищення експлуатаційних характеристик нестабільних криць.

5.3. Вплив температури випробувань на ударну в'язкість високоманганових криць

Випробування проводили на литих зразках криць 110Г13Л, 110Г10Л, 110Г8Л, загартованих у воді від температури у 1050°C . Ударну в'язкість (KCU) визначали на копрі МК-30А за температур у $+20^\circ\text{C}$, -20°C , -40°C , -60°C . Охолоджувальне середовище — суміш спирту з рідким азотом. Результати досліджень впливу температури випробувань і концентрацій у криці Мангану та Карбону наведено на рис. 6, 7.

Дослідження впливу модифікування криць 110Г13Л, 110Г10Л, 110Г8Л на ударну в'язкість за низьких температур показало, що модифікатори істотно не впливають на холодостійкість високоманганових криць (табл. 3).

5.4. Кореляційний зв'язок парамагнетної сприйнятливості аустеніту і ударної в'язкості за негативних температур випробувань

Як вже було зазначено раніше, особливістю високоманганової криці є те, що після гартування в ній має бути чисто аустенітна структура, яка забезпечує високі значення фізико-механічних і службових властивостей. Але на практиці, в залежності від концентрацій Карбону та Мангану, технологічних особливостей під час проведення топлення, заливання, охолодження виливків у формі, термічного оброблення та ін. в металі можуть бути одночасно присутні аусте-

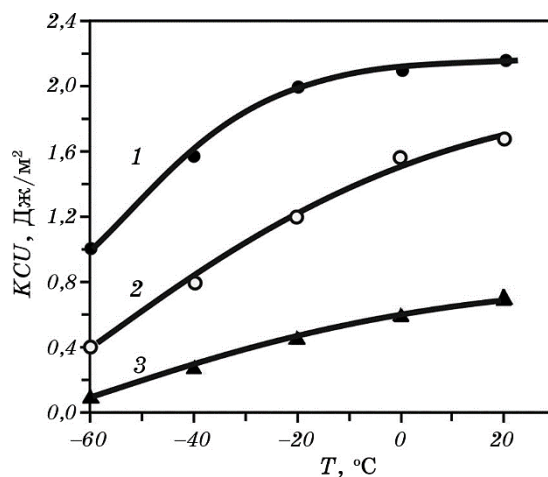


Рис. 6. Залежність ударної в'язкості високоманганевих криць від температури випробувань: 1 — 110Г13Л, 2 — 110Г10Л, 3 — 110Г8Л.

Fig. 6. Dependence of the impact toughness of high-manganese steels on the test temperature: 1—110Г13Л, 2—110Г10Л, 3—110Г8Л.

ніт, перліт, структури проміжної області, мартенсит, карбіди, неметалеві включення. Наявність цих фаз приводить до спотворень і змін у кристалічній структурі аустенітної матриці та, відповідно, до змін у фізико-механічних і службових властивостях криці.

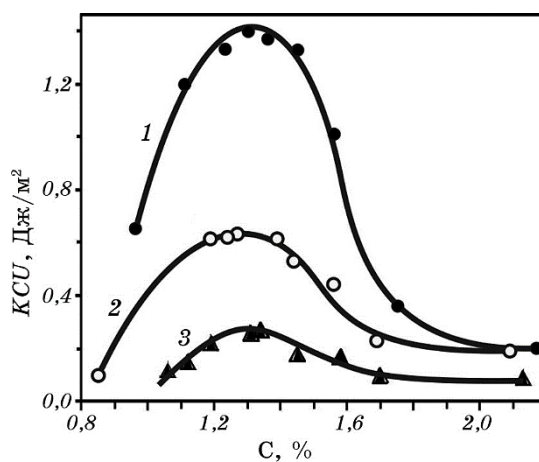


Рис. 7. Вплив Карбону на ударну в'язкість високоманганевих криць при -40°C : 1 — Г13Л, 2 — Г10Л, 3 — Г8Л.

Fig. 7. The influence of carbon on the impact toughness of high-manganese steels at -40°C : 1—Г13Л, 2—Г10Л, 3—Г8Л.

ТАБЛИЦЯ 3. Ударна в'язкість *KCU* модифікованих високоманганових криць за різних температур випробувань.**TABLE 3.** Impact toughness *KCU* of modified high-manganese steels at different test temperatures.

Криця	Розкиснювач, модифікатор	<i>KCU</i> , МДж/м ²			
		+20°C	-20°C	-40°C	-60°C
110Г13Л	Al	2,12	1,97	1,55	0,99
	Al, Ti	2,33	2,04	1,58	1,00
	Al, Ca	2,24	2,08	1,59	1,05
	Al, РЗМ	2,04	2,19	1,80	1,21
	Al, V	2,31	1,98	1,53	1,00
	Al, Ti, V	2,35	1,63	1,32	0,99
110Г10Л	Al	1,72	1,08	0,67	0,41
	Al, Ti	1,94	1,05	0,66	0,41
	Al, Ca	1,86	1,19	0,69	0,43
	Al, РЗМ	1,65	1,00	0,71	0,45
	Al, V	1,89	1,08	0,68	0,42
	Al, Ti, V	1,96	0,92	0,60	0,38
110Г8Л	Al	0,98	0,24	0,19	0,09
	Al, Ti	1,13	0,23	0,17	0,08
	Al, Ca	1,08	0,25	0,20	0,10
	Al, РЗМ	0,95	0,27	0,23	0,11
	Al, V	1,09	0,24	0,21	0,10
	Al, Ti, V	1,14	0,23	0,15	0,07

Магнетний стан аустеніту характеризується питомою парамагнетною сприйнятливістю χ_0 , яка визначається сумарним магнетним моментом одиниці маси аустеніту за умови одиничного значення магнетного поля. Параметер χ_0 є комплексною характеристикою аустеніту, стан якого сформувався внаслідок наявних хемічних елементів, механічних і температурних дій, тобто χ_0 є чутливим до зовнішніх чинників [16].

Проведеними випробуваннями доведено також і зв'язок між ударною в'язкістю за низьких температур і магнетним станом аустеніту, сформованим до випробувань (рис. 8).

Результати корелюють з дослідженнями *KCU* за кімнатної температури [16], що підтверджує можливість використання питомої парамагнетної сприйнятливості аустенітної матриці в якості пара-

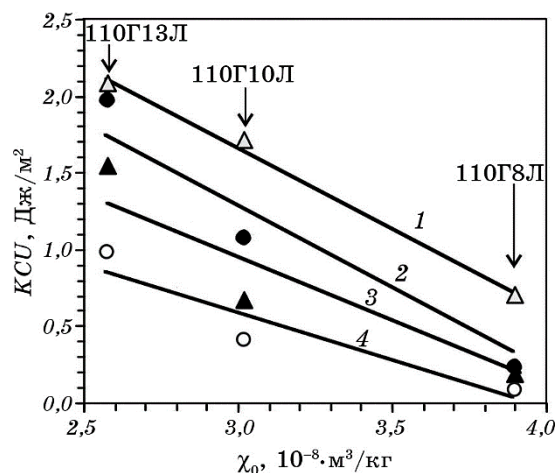


Рис. 8. Кореляційний зв'язок ударної в'язкості KCU за низьких температур випробувань (1 — $+20^{\circ}\text{C}$, 2 — -20°C , 3 — -40°C , 4 — -60°C) і парамагнетної сприйнятливості χ_0 аустеніту (до механічних випробувань) криць 110Г8Л, 110Г10Л, 110Г13Л.

Fig. 8. Correlation of impact viscosity KCU at low test temperatures (1 — $+20^{\circ}\text{C}$, 2 — -20°C , 3 — -40°C , 4 — -60°C) and paramagnetic susceptibility χ_0 of austenite (formed for mechanical tests) steels 110Г8Л, 110Г10Л, 110Г13Л.

метра прогнозування властивостей криці за низьких температур.

4. ВИСНОВКИ

1. Уточнено й одержано нові залежності впливу Карбону і Мангану на фізико-механічні та службові властивості високоманганової криці з хемічним складом на межі стабільного аустеніту.
2. Рекомендовано для деталей, які працюють за значних ударних навантажень і для яких найважливішим показником надійності роботи є ударна в'язкість, підтримувати вміст основних елементів на рівні середніх значень стандарту для криці 110Г13Л.
3. Для деталей, що працюють за низьких ударних навантажень, припустимою є концентрація Мангану на нижньому рівні стандарту, а Карбону — на верхньому, що є актуальним для проведення топлення криці методом перетоплення відпрацьованих деталей.
4. Рекомендовано методу комплексного модифікування високоманганової криці Алюмінієм, Титаном і Ванадієм, який забезпечує переведення плівкових нітридів Алюмінію в тяжкотопкі комплексні нітриди Алюмінію, Титану та Ванадію компактної форми. Ці вclusions діють як модифікатори-коагулятори, утворюючи цент-

ри кристалізації, що сприяє подрібненню структури та підвищенню властивостей криці.

5. Підтверджено можливість використання магнетного стану загартованої високоманганової криці для прогнозування її фізико-механічних властивостей за низьких температур.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Н. Г. Давыдов, *Высокомарганцевая сталь* (Москва: Металлургия: 1979).
2. M. Sabzi and M. Farzam, *Mater. Res. Express*, **6**, No. 10: 1065c2 (2019).
3. Э. Гудремон, *Специальные стали* (Москва: Металлургия: 1966) (пер. з нім.).
4. И. Н. Богачев, В. Ф. Еголаев, *Структура и свойства железомарганцевых сплавов* (Москва: Металлургия: 1973).
5. W. Bleck, *Int. J. Miner., Metall. and Mater.*, **28**, No. 5: 782 (2021).
6. H. R. Jafarian, M. Sabzi, S. H. Mousavi Anijdan, A. R. Eivani, and N. Park, *J. Mater. Res. and Tech.*, **10**: 819 (2021).
7. V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoi, and V. N. Sazhnev, *Metal Sci. Heat Treatment*, **58**, No. 5: 311 (2016).
8. Г. В. Снежной, С. В. Бобырь, *Металлофиз. новейшие технол.*, **34**, № 10: 1355 (2012).
9. Г. В. Снежной, В. Л. Снежной, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 4: 565 (2009).
10. V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoy, and V. L. Snezhnoy, *Metal Sci. Heat Treatment*, **60**, Nos. 3–4: 165 (2018).
11. O. Armağan, U. Sari, Ç. Yücel, and T. Kırındı, *Micron*, **103**: 34 (2017).
12. J. B. Seol, J. E. Jung, Y. W. Jang, and C. G. Park, *Acta Mater.*, **61**, No. 2: 558 (2013).
13. D. Li, L. Qian, C. Wei, S. Liu, F. Zhang, and J. Meng, *Mater. Sci. Eng. A*, **789**: 139586 (2020).
14. В. Л. Плюта, А. М. Нестеренко, С. В. Бобырь, *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*, № 17: 231 (2008).
15. S. Fajardo, I. Llorente, J. A. Jiménez, J. M. Bastidas, and D. M. Bastidas, *Corrosion Sci.*, **154**: 246 (2019).
16. Г. В. Сніжної, В. М. Сажнев, В. Ю. Ольшанецький, *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, № 8 (125): 22 (2015).

REFERENCES

1. N. G. Davydov, *Vysokomargantsevaya Stal'* [Highmanganese Steel] (Moskva: Metallurgiya: 1979) (in Russian).
2. M. Sabzi and M. Farzam, *Mater. Res. Express*, **6**, No. 10: 1065c2 (2019).
3. E. Gudremon, *Spetsial'nye Stali* [Special Steels] (Moskva: Metallurgiya: 1966) (Russian translation).
4. I. N. Bogachev and V. F. Egolaev, *Struktura i Svoystva Zhelezomargantsevykh Splavov* [Structure and Properties of Ferromanganese Alloys] (Moskva: Metallurgiya: 1973) (in Russian).
5. W. Bleck, *Int. J. Miner., Metall. and Mater.*, **28**, No. 5: 782 (2021).

6. H. R. Jafarian, M. Sabzi, S. H. Mousavi Anijdan, A. R. Eivani, and N. Park, *J. Mater. Res. and Tech.*, **10**: 819 (2021).
7. V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoi, and V. N. Sazhnev, *Metal Sci. Heat Treatment*, **58**, No. 5: 311 (2016).
8. G. V. Snezhnoy and S. V. Bobyr', *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **34**, No. 10: 1355 (2012) (in Russian).
9. G. V. Snezhnoy and V. L. Snezhnoy, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **31**, No. 4: 565 (2009) (in Russian).
10. V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoy, and V. L. Snezhnoy, *Metal Sci. Heat Treatment*, **60**, Nos. 3–4: 165 (2018).
11. O. Armağan, U. Sarı, Ç. Yücel, and T. Kırındı, *Micron*, **103**: 34 (2017).
12. J. B. Seol, J. E. Jung, Y. W. Jang, and C. G. Park, *Acta Mater.*, **61**, No. 2: 558 (2013).
13. D. Li, L. Qian, C. Wei, S. Liu, F. Zhang, and J. Meng, *Mater. Sci. Eng. A*, **789**: 139586 (2020).
14. V. L. Plyuta, A. M. Nesterenko, and S. V. Bobyr', *Fundamental'ni ta Prykladni Problemy Chornoyi Metalurgiyi*, No. 17: 231 (2008) (in Russian).
15. S. Fajardo, I. Llorente, J. A. Jiménez, J. M. Bastidas, and D. M. Bastidas, *Corrosion Sci.*, **154**: 246 (2019).
16. H. V. Snizhnoy, V. M. Sazhnyev, and V. Yu. Ol'shanets'kyy, *Aviatsiyno-Kosmichna Tekhnika i Tekhnolohiya*, No. 8 (125): 22 (2015) (in Ukrainian).