

PACS numbers: 61.72.Ff, 61.72.sh, 62.20.mt, 62.20.Qp, 81.05.Bx, 81.30.Mh, 81.40.-z

Поліпшення властивостей високоманганових криць методами термічного оброблення

В. М. Сажнев, Г. В. Сніжної

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

Дослідженнями, представленими в даній роботі, проаналізовано вплив вмісту Mn, швидкості охолодження металу в ливарній формі та спеціальних режимів термічного оброблення на механізм змін фазового складу аустенітних манганових криць, їхню мікроструктуру, фізико-механічні властивості та зносостійкість. В дослідних крицях варіювався вміст Mn на рівнях 8%, 10%, 13%; вміст інших компонентів основного хемічного складу підтримувався в межах стандарту для криці 110Г13Л. Дослідження проводилися на литих зразках різної товщини для керування швидкістю тепловідведення під час первинної кристалізації. Дослідження показали, що у крицях із пониженим вмістом Mn можливе подрібнення зерен аустеніту й істотне підвищення властивостей металу за значно меншої тривалості відпалу, ніж це потрібно для криці 110Г13Л. Для товстостінних виливків із криці 110Г10Л тривалість відпалу може бути скороченою вдвічі, а для виливків із криці 110Г8Л перекристалізація може бути проведеною без попереднього відпалу, якщо під час твердіння виливків у формі буде забезпечено уповільнене охолодження. Запропоновано раціональні режими термічного оброблення криць із пониженим вмістом Mn, які забезпечують значне подрібнення зерен аустеніту та підвищення комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей металу.

Ключові слова: високоманганова криця, аустеніт, перліт, карбід, термічне оброблення, мікроструктура, зносостійкість.

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

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

Citation: V. M. Sazhnyev and H. V. Snizhnoy, Improving the Properties of High-Manganese Steels by Heat Treatment Methods, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 11: 1111–1124 (2024). DOI: [10.15407/mfint.46.11.1111](https://doi.org/10.15407/mfint.46.11.1111)

The mechanism of change in the phase composition of austenitic steels, their wear resistance and microstructure is analysed. The influence of Mn, the rate of cooling of the metal in the casting mould, and special modes of heat treatment on the physical and mechanical properties of high-manganese steels is investigated. In the studied steels, the Mn content is varied at the levels of 8%, 10%, and 13%. The content of other components of the main chemical composition is maintained within the standard for the 110Г13Л steel. Studies are conducted on cast samples of various thicknesses to control the rate of heat removal during primary crystallization. In steels with reduced Mn content, grinding of austenite grains is possible, and a significant increase in metal properties with a considerably shorter annealing duration (than this is required for the 110Г13Л steel) is shown. In thick-walled castings made of the 110Г10Л steel, the duration of annealing can be reduced by half. In castings made of the 110Г8Л steel, recrystallization can be carried out without preliminary annealing, if slow cooling is ensured during hardening of the castings in the mould. Rational modes of heat treatment of steels with a reduced Mn content are proposed providing both a significant grinding of austenite grains and increasing the complex of physical, mechanical, and operational properties of the metal.

Key words: high-manganese steel, austenite, pearlite, carbide, heat treatment, microstructure, wear resistance.

(Отримано 18 березня 2024 р.; остаточн. варіант — 8 липня 2024 р.)

1. ВСТУП

Для виготовлення значної номенклатури швидкозношуваних деталей гірничодобувного, гірничозбагачувального обладнання, сільськогосподарської техніки, залізничного транспорту широке застосування вже друге століття знайшла лита високоманганова криця аустенітного класу типу 110Г13Л. Неперервний розвиток цих галузей діяльності приводить до ускладнення умов експлуатації деталей із зносостійкої криці, підвищення вимог до її фізико-механічних і службових властивостей. Тому вченими проводяться дослідження хемічного складу й режимів термічного оброблення, які направлені на поліпшення якості виливків і властивостей криць.

2. АНАЛІЗА ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ

Аналіза літературних даних показує, що властивості криці в значній мірі залежать від її хемічного складу по основних елементах, як в межах стандартного складу, так і, тим більше, за ними, додаткового легування, модифікування, термічного оброблення. Так, в роботах [1, 2], присвячених дослідженню впливу Карбону та Мангану на фізико-механічні й службові властивості високоманганових

криць, підтверджено, що для деталей, які піддаються абразивному зношуванню за значних статичних і динамічних навантажень, найліпшим матеріалом залишається традиційно застосовувана криця 110Г13Л із 12–14% Мангану. Для деталей, що працюють за низьких ударних навантажень, доцільним є застосування аустенітних зносостійких криць із пониженим до 8–10% вмістом Мангану [3, 4]. У певних інтервалах концентрацій Карбону та Мангану в цих крицях наявність мартенситу деформації сприяє підвищенню спротиву абразивному зношуванню та дає змогу підвищити ресурс роботи деталей з пониженням витрат манганових феростопів.

В свій час були розроблені різного типу криці із вмістом Mn у 16–18%, які мають такі ж вихідні характеристики, як і криця з 12–14% Mn, але швидше наклепуються, тому менше зношуються під час ударно-абразивного навантаження і вважаються більш універсальним зносостійким матеріалом [5–7]. Та деякі дослідники спростовують цей висновок: у [8] зазначено, що криця з 11% Mn показує більшу в'язкість, пластичність і деформаційне зміцнення, ніж криця з 14% Mn; криці з більшим вмістом Mn (22–25%) ще швидше наклепуються, та вважається, що їхні переваги непропорційні вартості, яка значно вище вартості криці з 12–14% Mn [9, 10].

Достатньо широко досліджено вплив додаткових легувальних елементів, таких як Al [11], Cr [12, 13], Ni [14] та ін. Дослідниками встановлено оптимальні концентрації легувальних добавок з точки зору їхнього впливу на фізико-механічні та службові властивості високоманганової криці. Результати досліджень використовуються на практиці для виробництва швидкозношуваних деталей гірничодобувного та гірничо-збагачувального обладнання.

Ймовірно, найбільшу частину досліджень, направлених на підвищення властивостей високоманганових криць, пов'язано із зміненням дисперсності фаз, що кристалізуються, шляхом введення у рідку крицю невеликих добавок окремих елементів, сполук, тобто модифікуванням. Найбільше поширення в якості модифікаторів отримали Ti, V, Ce, Ca, Zr, Nb, Ta, Hf, B [15]. Авторами роботи [1] встановлено, що найбільш оптимальним з точки зору ефективності та вартості модифікаторів є комплексне модифікування Алюмінієм, Титаном і Ванадієм.

Для поліпшення структури та підвищення властивостей криці достатньо широко розглядалися й різні методи термічного оброблення. В більшості випадків дослідження були направлені на удосконалення режимів традиційного гартування криць у воді для ліпшого розчинення сітчастих карбідів і деякого подрібнення зерен аустеніту. Для досягнення результатів у цьому напрямі дослідниками пропонуються двостадійні [16] й чотиростадійні [17] процеси розчинення карбідів в аустенітній матриці. Та в роботі [17] стверджується, що за температур у 550–650°C стабільність аустеніту по-

нижується і тоді утворюється перліт. А з підвищенням температури перлітні кластери рекристалізуються в аустеніт. Аналогічні результати було одержано і в роботі [18]. Можливість подрібнення аустеніту шляхом тривалої витримки за температури у 600°C з наступним пришвидшеним нагріванням і гартуванням стала основою проведення реальних досліджень.

3. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета роботи — розробка нового прогресивного методу термічного оброблення манганових криць із вмістом Мангану у 8% і 10%, у яких стабільність аустеніту є нижчою, ніж у криці 110Г13Л, що уможливило подрібнити зерна аустеніту та підвищити властивості зносостійких криць за одночасної економії манганових феростопів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: дослідити вплив температури відпалу та гартування на структуру, дослідити властивості високоманганових криць.

4. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Криці витоплювали в індукційній тигельній печі з футеруванням основними вогнетривами. Концентрація Мангану в крицях варіювалася на рівнях у 8%, 10%, 13%. Вміст інших елементів основного хемічного складу підтримувався на середньому рівні в межах держстандарту для криці 110Г13Л. Розкиснення криць проводили Алюмінієм із розрахунку його залишкового вмісту в металі у 0,015–0,020%.

Рідкий метал заливали в сухі піщані форми для одержання литих зразків для механічних випробувань і виливків діаметром у 100 мм, довжиною у 400 мм. Всі форми для литих зразків і виливків для кожної марки криці виливалися з одного розтопу для виключення впливу інших технологічних чинників. Зразки та виливки охолоджувалися у формах до кімнатної температури. Хемічний склад дослідних криць наведено у табл. 1.

Термічне оброблення зразків дослідних топлень проводили в лабораторній електропечі з автоматичним контролем температури. Термооброблення за однаковим режимом як литих зразків, так і зразків, вирізаних із виливків, проводилося одною садкою.

Випробування на розрив проводили на машині марки УРМ-50. Для визначення ударної в'язкості *KCU* зразки з *U*-подібним надрізом випробовували на маятниковому копрі МК-30А. Міряння твердості *HV* проводили на Брінеллевому приладі.

Визначення ударно-абразивної зносостійкості ϵ проводили в лабораторному кульовому млині за відношенням втрат маси еталон-

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад високоманганових криць Г13Л, Г10Л, Г8Л, % мас.**TABLE 1.** Chemical composition of high-manganese steels Г13Л, Г10Л, and Г8Л, % mass.

Марка криці	Вміст елементів						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al
110Г13Л	1,26	13,8	0,76	0,092	0,016	0,30	0,018
110Г10Л	1,20	10,47	0,77	0,084	0,014	0,30	0,021
110Г8Л	1,24	8,6	0,66	0,088	0,017	0,30	0,019

них і дослідних зразків. В якості еталона використовувалася криця 110Г13Л. Випробування в кульовому млині проводили протягом 100 годин за розмелювання гранітного щебеню фракцією у 20–40 мм. Діаметер барабана млина — 700 мм, довжина — 680 мм, частота обертів — 34 об/хв. Маса кульового завантаження — 120 кг (щебеню завантажували 40 кг), води — 20 літрів. Заміна щебеню та води проводилася через кожні 5 годин роботи. Для випробувань використовували зразки (по 3 штуки на кожний варіант) розмірами у 20×9×9 мм³, виготовлені з половинок зразків на ударну в'язкість. Еталонні зразки у кількості 5 штук випробовували разом з дослідними. Мікроструктурну аналізу проводили на металографічному мікроскопі МІМ-8.

Щоб оцінити вплив термічного оброблення, зразки криць 110Г8, 110Г10, 110Г13 були піддані чотирьом режимам: 1 — відпал 600°C, гартування 880°C; 2 — відпал 600°C, гартування 930°C; 3 — відпал 600°C, гартування 980°C; 4 — гартування з 1050°C без відпалу. Швидкість нагрівання до відпалу — 100°C/год., після відпалу до гартування — 150°C/год. Тривалість відпалу — 6 год., гартування — 2 год. Зазначені режими термічного оброблення досліджуваних криць представлено на рис. 1.

5. РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ТЕРМООБРОБЛЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМАНГАНОВИХ КРИЦЬ

Виливки з високоманганової криці, охолоджені у піщаній формі, мають структуру, що складається з аустеніту із включеннями карбідів. Кількість, форма та характер розташування карбідів залежить, головним чином, від умов охолодження металу та його хемічного складу, особливо від вмісту Карбону й Силіцію. Чим менша швидкість охолодження криці та вищі концентрації в ній Карбону й Силіцію, тим більше виділяється в структурі карбідів і тим вони

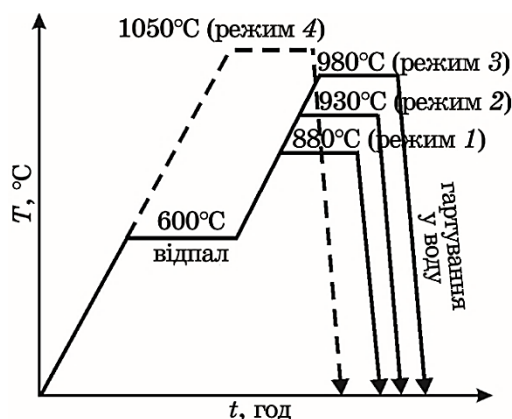


Рис. 1. Режими термічного оброблення.

Fig. 1. Modes of heat treatments.

крупніші. Також виділення карбиду, у складі якого є 22–25% Мангану, викликає збіднення Манганом межі поділу його з аустенітом. Крім того, на кількість і розміри карбідів у високомангановій криці впливають і технологічні чинники, такі як ступінь перегріву криці під час заливання, маса й товщина стінки вилівка та ін. Ціллю наступного термічного оброблення є розчинення карбідів, вирівнювання хемічного складу та фіксування аустенітної структури. В ідеальному випадку у високомангановій криці після термооброблення має бути чисто аустенітна структура. Практично ж, крім аустеніту, у вилівках після термічного оброблення спостерігається невелика кількість карбідної фази (частіше усього на межах зерен).

Виливки з високоманганової криці, в залежності від призначення, значно відрізняються по товщині стінки й масі. Траки гусениць сільськогосподарської техніки мають товщину стінки до 15 мм і масу у кілька кілограмів, а практично всі деталі гірничозбагачувального обладнання мають товщину стінки більше 100 мм і можуть важити від сотень кілограмів до кількох тон. Швидкість охолодження у формі, хемічний склад криць по-різному впливають на мікроструктуру та властивості вилівок різної товщини й маси. Тому для одержання об'єктивних результатів дослідження проводилися на литих зразках із різною товщиною стінок.

Відпрацювання режимів термічного оброблення проводилося на тонкостінних (товщиною у 15 мм) литих зразках для механічних випробувань. Для кожного режиму проводили металографічну аналізу, випробування механічних властивостей і ударно-абразивної зносостійкості.

В загартованому від 1050°C стані розмір зерна аустеніту у всіх стопах був приблизно однаковим (рис. 2).

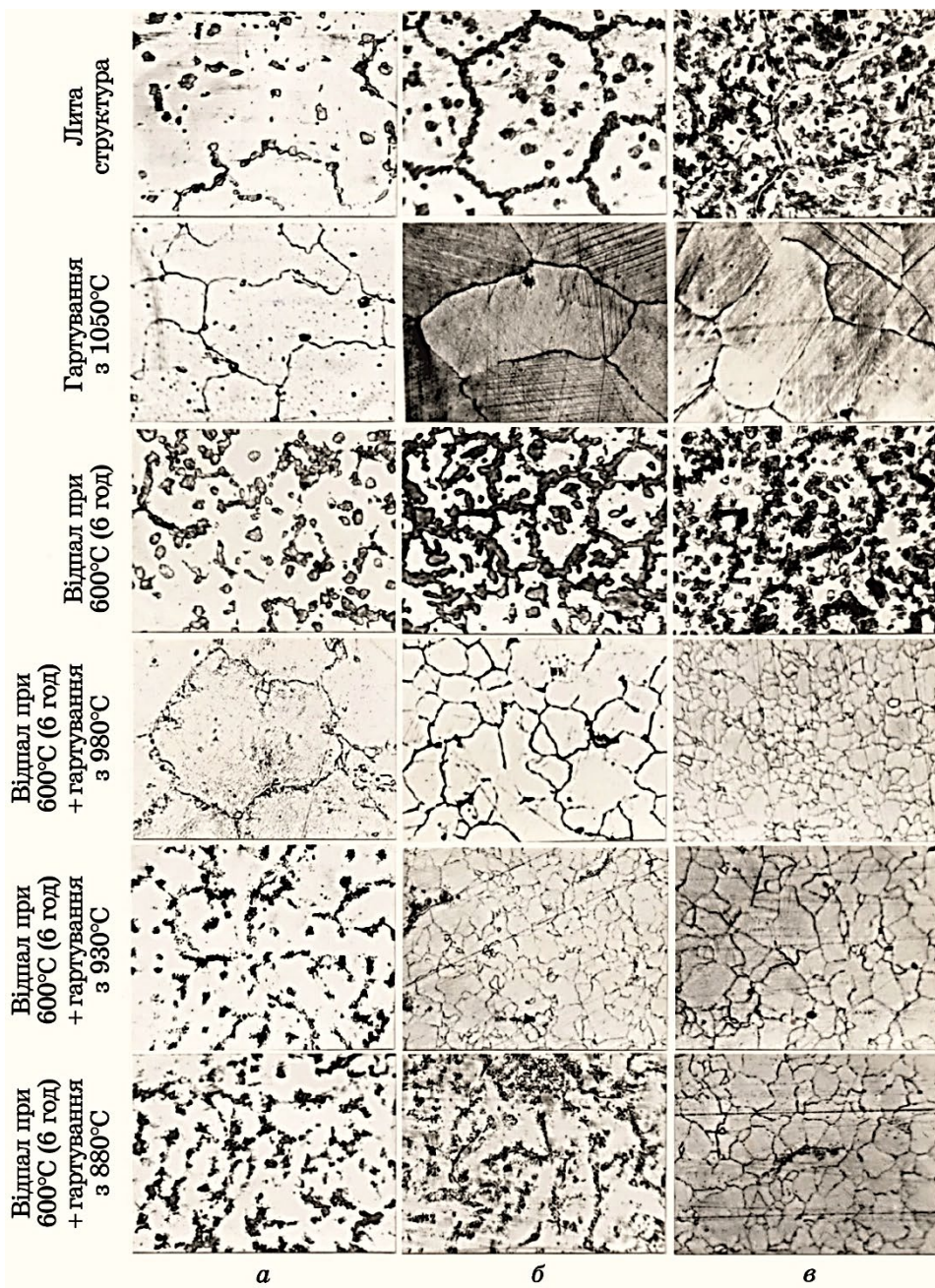


Рис. 2. Залежність структури криць у вливках з товщиною стінки до 15 мм від режиму термооброблення: 110Г13Л (а), 110Г10Л (б), 110Г8Л (в).

Fig. 2. Dependence of the steels' structure in castings with a wall thickness of up to 15 mm on the heat-treatment mode: 110Г13Л (a); 110Г10Л (б); 110Г8Л (в).

Відпал литого металу за температури у 600°C протягом 6 годин забезпечив розпад карбідів і утворення за межами зерен великої кількості продуктів перетворення аустеніту. З пониженням вмісту Mn кількість продуктів перетворення аустеніту під час відпалу різко збільшувалася, метал ставав феромагнетним і порівняно легко оброблюваним на металорізальних верстатах. Наступне після відпалу загартування від 980°C забезпечило різке подрібнення зерна аустеніту у крицях 110Г8Л і 110Г10Л і часткову фазову перекристалізацію аустеніту по межах зерен у криці 110Г13Л. Після остаточного гартування від нижчих температур у 930°C і 880°C зразки мали аустенітну структуру з дрібнодисперсними карбідами, розподіленими в матриці. Кількість дрібних карбідів збільшувалася і розподіл їх у матриці ставав нерівномірним у міру підвищення вмісту Мангану та пониження температури загартування (див. рис. 2). Значення механічних властивостей досліджуваних криць та ударно-абразивної зносостійкості за зношування у кульовому млині наведено в табл. 2.

Проведені дослідження показали, що найбільш раціональним для криць 110Г8Л і 110Г10Л є режим, що включає відпал за 600°C і загартування від 980°C. Це уможливило значно підвищити властивості криць з пониженим вмістом Мангану. Для криці 110Г13Л тривалість відпалу у 6 годин була недостатньою. Підвищення механічних властивостей пояснюється різким подрібненням зерна і тим, що хоч проходить руйнація меж первинного зерна, значна частина

ТАБЛИЦЯ 2. Вплив термічного оброблення на властивості досліджуваних криць (умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$, межа міцності σ_b , відносне видовження δ , відносне звуження Ψ , ударна в'язкість KCU , твердість HB , зносостійкість ϵ).

TABLE 2. The effect of heat treatment on the properties of the studied steels (conditional yield strength $\sigma_{0,2}$, strength limit σ_b , relative elongation δ , relative narrowing Ψ , impact toughness KCU , hardness HB , wear resistance ϵ).

Марка криці	Режим термічного оброблення	Показники						
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU , МДж/м ²	HB , МПа	ϵ
1	2	3	4	5		6	7	8
110Г13Л	гартування від 1050°C	397	820	31,2	29,4	2,26	1930	1,0
	відпал 600°C + гартування від 980°C	418	832	28,6	27,5	2,28	2020	1,10
	відпал 600°C + гартування від 930°C	435	843	21,2	20,1	1,94	2070	1,13
	відпал 600°C + гартування від 880°C	456	851	18,8	17,3	1,67	2120	1,14

Продовження ТАБЛИЦІ 2.

Continuation of TABLE 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	
110Г10Л	гартування з 1050°C	426	723	20,2	19,1	1,99	1960	1,18
	відпал 600°C + гартування з 980°C	463	765	24,6	23,4	2,34	2070	1,35
	відпал 600°C + гартування з 930°C	492	778	18,9	18,5	2,17	2120	1,36
	відпал 600°C + гартування з 880°C	508	815	14,7	13,8	1,55	2170	1,39
110Г8Л	гартування з 1050°C	440	606	11,6	11,1	1,04	1960	1,14
	відпал 600°C + гартування з 980°C	496	644	13,3	13,4	1,45	2120	1,46
	відпал 600°C + гартування з 930°C	505	667	11,8	11,6	1,18	2170	1,43
	відпал 600°C + гартування з 880°C	524	693	9,2	8,8	0,79	2230	1,44

енергії витрачається на поширення тріщин навколо вторинних зерен (рис. 3). Підвищення ступеня грануляції структури криці сприяє також розподілу та подрібненню фосфідної евтектики. У міру збільшення загального периметра зерен шкідливий вплив Фосфору послаблюється. Як видно з рис. 4, підвищена концентрація Фосфору спостерігається тільки у карбофосфідах, що розташовуються як всередині зерен, так і за їхніми межами. Пониження температури загартування приводило до утворення дрібнодисперсних карбідів, що підвищують зносостійкість, але понижувалися пластичні властивості (див. табл. 2).

Вплив пониження швидкості охолодження виливків у формі на вихідну структуру та на інтенсивність розпаду аустеніту за спеціальних режимів термічного оброблення проводили на зразках, вирізаних із виливків діаметром у 100 мм і довжиною у 400 мм.

Металографічна аналіза литого металу показала, що, на відміну від криці 110Г13Л, що має лише аустенітну структуру з включеннями великих карбідів, у крицях із пониженим вмістом Мангану відбувся розпад аустеніту по межі зерен. Кількість продуктів перетворення трохи зменшилася від краю до центру виливки і становила 10–15% у криці 110Г10Л і 30–35% у криці 110Г8Л. Теплова енергія, акумульована формою, сприяла повільному охолодженню виливків, що привело до розпаду аустеніту в нестабільних крицях (рис. 5).

Гартування виливків від 1050°C забезпечило одержання суто ау-



Рис. 3. Зміни в характері поширення тріщин у зруйнованій криці 110Г10Л за різних режимів термічного оброблення: гартування від 1050°C (а), відпал за 600°C + гартування від 980°C (б).

Fig. 3. Changes in the nature of crack propagation in destroyed 110Г10Л steel under different heat-treatment regimes: hardening from 1050°C (a); annealing at 600°C + hardening from 980°C (b).

стенітної структури у всіх досліджуваних крицях, але величини зерна аустеніту в них значно відрізнялися. Були відмінності у розмірі зерна й порівняно з виливками перерізом у 15 мм (табл. 3)

У товстостінних виливках із криці 110Г13Л величина зерна аустеніту залишалася такою ж, якою була одержана за первинної кристалізації, а в криці 110Г10Л відбулася часткова фазова перекристалізація по межах зерен. У криці 110Г8Л відбулася різка перекристалізація по всьому перерізу виливки. Відпал литого металу за температури у 600°C протягом 3 годин забезпечив розчинення карбідів та утворення по межах зерен продуктів перетворення аустеніту, кількість яких різко збільшувалася з пониженням вмісту Мангану. Наступне після відпалу загартування від 980°C забезпечило подрібнення зерна аустеніту у крицях 110Г8Л і 110Г10Л та часткову перекристалізацію аустеніту по межах зерен у криці 110Г13Л.

Проведені дослідження показали, що у виливках із криць з пониженим вмістом Мангану можливе подрібнення зерна й істотне підвищення властивостей металу за значно меншої тривалості відпалу, ніж це потрібно для криці 110Г13Л. Для товстостінних виливків із криці 110Г10Л тривалість відпалу може бути скороченою до 3 годин, а для виливків із криці 110Г8Л перекристалізація може бути проведеною без попереднього відпалу, якщо під час затвердіння виливка у формі буде забезпечено уповільнене охолодження.

Промислові випробування бил молоткових дробарок із криці 110Г10Л, термооброблених за запропонованим режимом, підтвердили результати досліджень і показали, що нестабільні криці, піддані перекристалізації, можуть бути рекомендовані замість криці

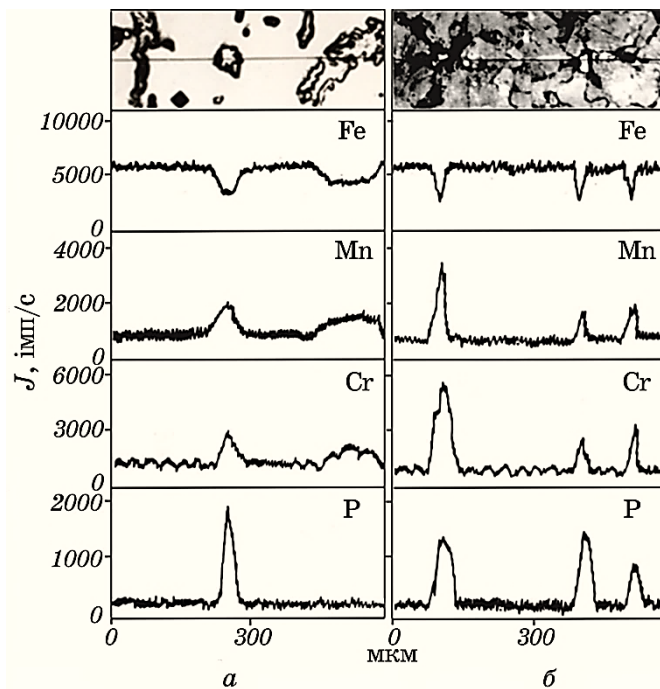


Рис. 4. Криві концентраційного розподілу елементів у виливках товщиною у 100 мм із криці 110Г10Л: відпал за 600°C (а); відпал за 600°C + гартування від 980°C (б).

Fig. 4. Concentration curves of the distribution of elements in samples of 110Г10Л steel with a thickness of 100 mm: annealing at 600°C (а); annealing at 600°C + hardening from 980°C (б).

110Г13Л для роботи в умовах ударно-абразивного зносу.

Промислові випробування деталей із криці 110Г10Л, термічно оброблених за запропонованим режимом, було проведено в умовах агломераційного цеху Запорізького абразивного комбінату під час дроблення бокситів. Біла молоткової дробарки СМ-І9А кількістю у 140 шт. були виготовлені у ремонтно-механічному цеху Дніпровського алюмінієвого заводу. Хемічний склад криці: С — 1,25%, Мп — 10,3%, Si — 0,95%, Р — 0,104%, S — 0,006%, Ti — 0,08%, Al — 0,012%. Заливання проводили у сирі піщано-глинясті форми. Термічне оброблення дослідних деталей проводили за режимом: відпал за температури у 550–600°C протягом 4 годин, охолодження з печю до 200°C, потім на повітрі; гартування у воді від температури у 970–1000°C (витримка за температури гартування — 2 години, швидкість нагрівання під гартування — 150 град/год). Таке термічне оброблення уможливило подрібнити зерно аустеніту (рис. 6). Ударна в'язкість зразків, вирізаних із робочої частини біла, стано-

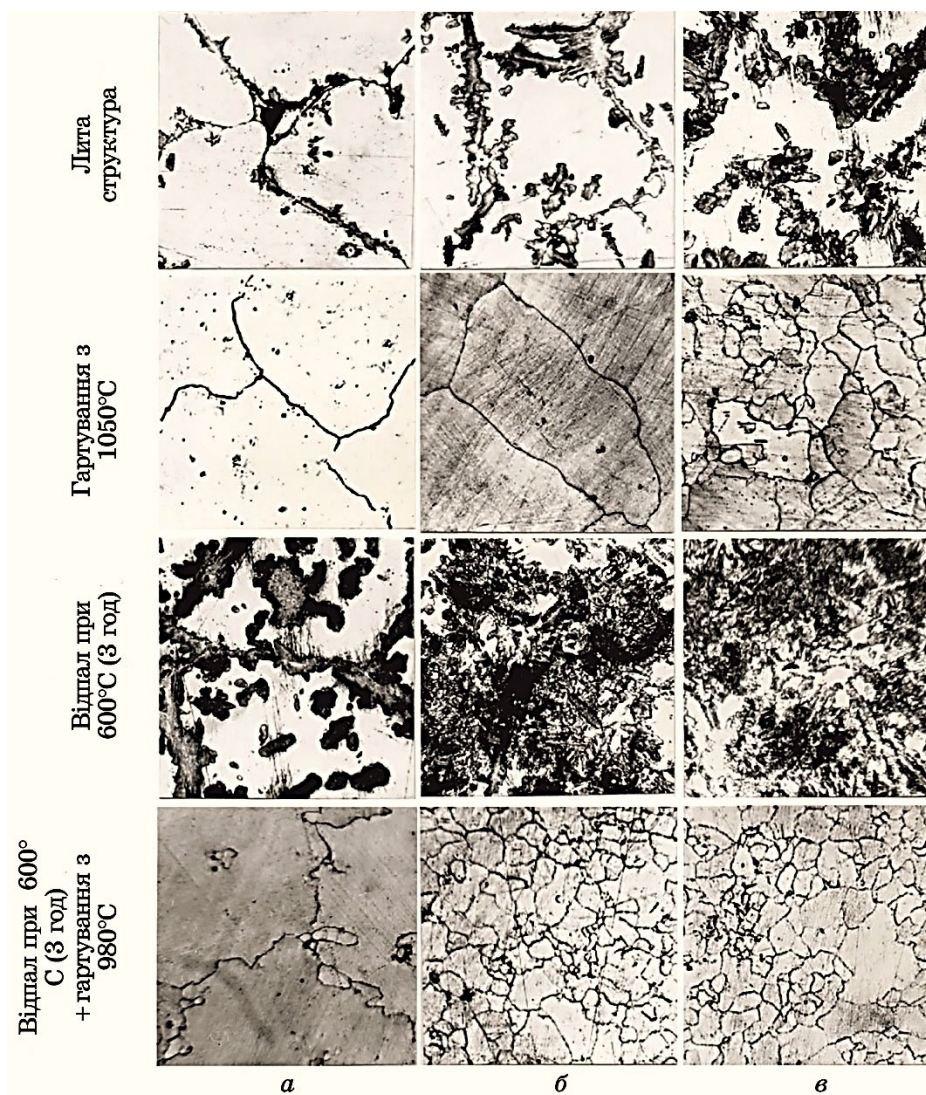


Рис. 5. Зміни структури високоманганевих криць у виливках із товщиною стінки до 100 мм: 110Г13Л (а), 110Г10Л (б), 110Г8Л (в).

Fig. 5. Changes in the structure of high-manganese steels in castings with a wall thickness of up to 100 mm: 110Г13Л (а); 110Г10Л (б); 110Г8Л (в).

вила 1,8 МДж/м².

Під час випробувань дослідні біла встановлювалися разом із серійними із криці 110Г13Л, гартованими у воді від 1050–1100°C. Один вал барабана дробарки комплектувався експериментальними деталями, два — серійними. Лінійна швидкість робочої частини

ТАБЛИЦЯ 3. Зміни величини зерна аустеніту в залежності від режиму термічного оброблення та товщини стінки виливки.

TABLE 3. Changes in the austenite grain size depending on both the heat-treatment regime and the thickness of the casting wall.

Марка криці	Товщина стінки, мм	Середній розмір зерна аустеніту, мкм		
		Литий стан	Гартування від 1050°C	Відпал за 600°C + гартування від 980°C
110Г13Л	100	383	380	316
	15	269	264	227
110Г10Л	100	381	332	46
	15	284	278	25
110Г8Л	100	365	43	28
	15	267	255	16

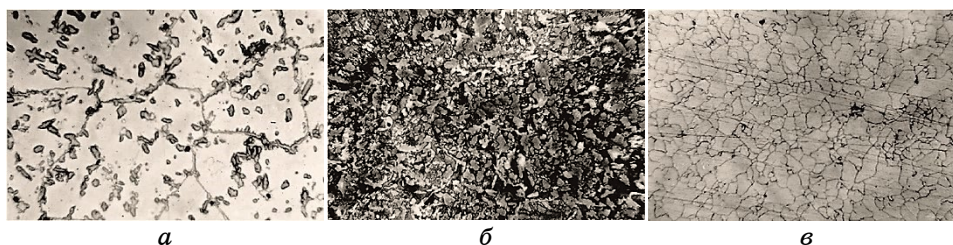


Рис. 6. Мікроструктура криці 110Г10Л, термічно обробленої за запропонованим режимом у промислових умовах: литий стан (*a*); відпал за 550–600°C протягом 4 годин; відпал + гартування від 970–1000°C (*с*).

Fig. 6. Microstructure of the 110Г10Л steel heat-treated according to the proposed regime in industrial conditions: cast state (*a*); annealing at 550–600°C for 4 hours (*b*); annealing + hardening from 970–1000°C (*c*).

була на момент удару становила близько 50 м/с. Стійкість експериментальних бил молоткової дробарки була на рівні серійних. Випадків передчасного виходу з ладу дослідних деталей через поломки виявлено не було.

Випробування показали, що криця 110Г10Л, термічно оброблена за запропонованим режимом, може бути використаною замість криці 110Г13Л в експлуатаційних умовах високих динамічних навантажень.

6. ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив термічного оброблення на структуру та влас-

тивості високоманганових криць. Встановлено залежність процесу розпаду аустеніту під час охолодження у формі та термічного оброблення від вмісту Мангану та товщини стінки виливки.

2. Розроблено раціональні режими термічного оброблення для криць із різним вмістом Мангану, що забезпечують подрібнення зерна та підвищення комплексу властивостей.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. M. Sazhnev and H. V. Snizhnoi, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 4: 503 (2023) (in Ukrainian).
2. V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoi, and V. N. Sazhnev, *Met. Sci. Heat Treat.*, **58**, No. 5: 311 (2016).
3. Y. Dong, Z. Tao, C. Sun, H. Wu, X. Gao, and L. Du, *J. Mater. Sci.*, **57**: 22042 (2022).
4. G. V. Snizhnoi and S. V. Bobyr, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **34**, No. 10: 1355 (2012) (in Russian).
5. S. M. Lee, S. J. Lee, S. Lee, J. H. Nam, and Y. K. Lee, *Acta Mater.*, **144**: 738 (2018).
6. T. Zhao, F. Wang, C. Chen, H. Ma, Z. Yang, F. Zhang, and T. Tang, *Mater. Sci. Eng: A*, **851**: 143653 (2022).
7. D. Lang, X. Huang, and W. Huang, *J. Mater. Sci.*, **58**, No. 18: 7758 (2023).
8. M. S. Hasan, D. Pellegrin, R. Clegg, and C. Yan, *Mater. Sci. Eng: B*, **283**: 115788 (2022).
9. S. Hwang, Y. Bai, S. Gao, M. H. Park, A. Shibata, and N. Tsuji, *Mater. Sci. Eng: A*, **894**: 146193 (2024).
10. A. S. Hamada, L. P. Karjalainen, and M. C. Somani, *Mater. Sci. Eng: A*, **467**, Nos. 1–2: 114 (2007).
11. S. H. Mousavi Anijdan, M. Sabzi, H. Najafi, M. Jafari, A. R. Eivani, N. Park, and H. R. Jafarian, *J. Mater. Res. Technol.*, **15**: 4768 (2021).
12. S. Ayadi, A. Hadji, K. Hakan, and D. Selman, *J. Mater. Res. Technol.*, **9**, No. 5: 11545 (2020).
13. J. S. Park, S. C. Lee, J. K. Choi, and S. J. Kim, *Appl. Surf. Sci.*, **637**: 157875 (2023).
14. J. Krawczyk, M. Bembenek, and J. Pawlik, *Materials*, **14**, No. 24: 7794 (2021).
15. M. Sabzi and M. Farzam, *Mater. Res. Express*, **6**, No. 10: 1065c2 (2019).
16. B. Bandanadjaja and E. Hidayat, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1450**, No. 1: 012125 (2020).
17. O. M'ghari, O. B. Lenda, A. Ibnlfassi, Y. A. Yassine, Y. A. Ahmed, and E. M. Saad, *Recent Pat. Mech. Eng.*, **15**, No. 5: 532 (2022).
18. S. Mishra and R. Dalai, *Mater. Today: Proc.*, **44**: 2517 (2021).