

УДК 669.1:539.538:539.4.019.3:537.621.4

Сажнев В. М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машин і технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: sajhnev@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2095-4958

Сніжної Г. В. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: snow@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1452-0544

ВПЛИВ ВУГЛЕЦЮ І НЕГАТИВНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ АУСТЕНІТНОЇ ВИСОКОМАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ

Мета роботи. Полягає у встановленні впливу вуглецю і марганцю, концентрацій модифікаторів, температури випробувань на фізико-механічні властивості і зносостійкість аустенітної високомарганцевої сталі Г13Л.

Методи дослідження. Визначення ударної в'язкості проводили на маятниковому копрі МК-30А, мікротвердості – на приладі ПМТ-3. Для визначення щільності був застосований метод гідростатичного зважування. Мікроструктурний аналіз та дослідження неметалевих включень проводили на металографічному та електронному мікроскопах. Корозійну стійкість визначали в модельному середовищі з рН9, що відповідало виробничим умовам збагачувальних процесів чорної і кольорової металургії.

Отримані результати. Встановлено, що найкращі показники властивостей сталі 110Г13Л забезпечуються при середніх значеннях концентрацій вуглецю і марганцю в межах стандарту. Для деталей, які працюють при низьких ударних навантаженнях, доцільним є застосування аустенітних зносостійких сталей з концентраціями марганцю на нижньому, а вуглецю на верхньому рівнях в межах стандартного хімічного складу.

Наукова новизна. Уточнені і отримані нові залежності впливу вуглецю, модифікування на структуру, неметалеві включення і фізико-механічні властивості високомарганцевої сталі. Межа міцності сталі з підвищенням вмісту вуглецю монотонно зростає, а залежності, що описують змінення показників пластичності, ударної в'язкості і твердості мають екстремальний характер.

Практична цінність. Запропоновано раціональний метод модифікування для підвищення експлуатаційних характеристик сталей. Досліджено вплив температури випробувань на ударну в'язкість сталі при зміненнях концентрацій вуглецю, як основного показника надійності роботи деталей машин при низьких температурах.

Ключові слова: високомарганцева сталь, модифікування, аустеніт, мартенсит, карбід, межа міцності, ударна в'язкість, зносостійкість.

Вступ

Високомарганцева сталь Г13Л використовуються для виготовлення деталей у гірничорудному устаткуванні, машинобудуванні та ін. Усі ці деталі піддаються зношуванню, при цьому кожна деталь працює в специфічних умовах. Одна зношується при великих динамічних або статичних навантаженнях, інша – при навантаженнях, що вигинають, а третя – піддається тільки абразивному стиранню. Можливо поєднання двох і більше типів руйнівної дії на одну і ту ж деталь. Всім цим діям протистоїть унікальна здібність високомарганцевої сталі зміцнюватись при зовнішніх навантаженнях [1, 2]. На сьогодні, виробництво зносостійких деталей повинно забезпечувати максимальну економічну ефективність, враховуючи високу вартість марганцевих феросплавів. Цю проблему вирішують двома шляхами: використанням економлегованих сталей перлітного класу або варіюванням хімічним складом і технологічними засобами при виробництві виливків з високомарганцевої сталі аустенітного класу. Дослідження і розробка рекомендацій по

раціональному хімічному складу сталі, її комплексному модифікуванню для різних умов експлуатації, забезпечити надійність роботи деталей при зниженні витрат марганцевих феросплавів і є актуальними.

Діючими стандартами і технічними умовами на сталь 110Г13Л, не зважаючи на те, що рівень її міцності і пластичних властивостей, а також зносостійкість в значній мірі визначаються хімічним складом, допускаються достатньо широкі коливання меж вмісту основних елементів [3, 4]. Зниження в сталі концентрацій як вуглецю, так і марганцю, приводить до зниження стабільності аустеніту і при певних хімічних складах в сталі можуть одночасно бути присутніми структури, відмінні від аустеніту [5, 6], що стає причиною значних змін властивостей сталі. А враховуючи, що статичні і динамічні навантаження на швидкозношувані змінні деталі різних машин значно відрізняються, то разом із зниженням стабільності аустеніту це впливає на зміцнення поверхневого шару деталей, яка є найважливішим чинником їх зносостійкості. Відомо [7–9], що загальний ефект зміцнення складається із зміцнення від пластичної деформації

твердого розчину, від фазових перетворень при розпаді твердого розчину, від зміцнення нових фаз. При цьому ступінь впливу кожного фактора визначається умовами експлуатації і хімічним складом сталі.

Диференційований підхід до вмісту в сталі основних елементів хімічного складу в залежності від умов експлуатації дозволить підвищити ефективність її використання. Як відомо, одним із способів підвищення якісних властивостей сталей є модифікування. Найбільш широке застосування для модифікування сталі 110Г13Л отримали титан, ванадій, кальцій, РЗМ [1], але концентрації їх в сталі за даними різних авторів значно відрізняються. Достатньо висока холодостійкість високомарганцевої сталі дозволяє нормально працювати деталям при низьких температурах. В таких умовах важливим показником роботоздатності стає відсутність аварійних поломок деталей, яка забезпечується в першу чергу рівнем ударної в'язкості сталі. Тому представляло інтерес дослідження впливу модифікаторів на структуру, неметалеві включення, властивості і залежність ударної в'язкості високомарганцевої сталі при негативних температурах випробувань.

Мета роботи

Мета роботи – встановити залежності фізико-механічних властивостей і зносостійкості від вмісту основних хімічних елементів, концентрацій модифікаторів, температури випробувань. Для досягнення поставленої мети досліджено вплив вуглецю, марганцю, модифікування, негативних температур на структуру, фазовий склад, властивості в залежності від умов експлуатації високомарганцевої сталі 110Г13Л.

Матеріал і методика досліджень

Випробування проводили на литих зразках (без механічної обробки), загартованих у воді з температури 1050 °С. Сталі виплавляли в індукційній тигельній печі з основною футеровкою. Концентрація марганцю в сталях варіювалася в межах 13,05–13,60 %, вуглецю 0,8–2,2 %. Вміст інших елементів основного хімічного складу підтримувався на середньому рівні в межах держстандарту для сталі 110Г13Л. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено у табл. 1. Розкислення сталей проводили алюмінієм із розрахунку його залишкового вмісту в металі 0,015–0,020 %. Концентрації модифікаторів склали: титан 0,05–0,15 %, ванадій 0,10–0,15 %, кальцій 0,05–0,1 % (в перерахунку на металевий із сілікокальцію), РЗМ 0,02–0,04 %.

Випробування на розрив проводили на машині марки УРМ-50. Для визначення ударної в'язкості зразки з U-образним надрізом випробували на маятниковому копрі МК-30А. Вимірювання твердості проводили на приладі Бринеля, мікротвердості – на приладі ПМТ-3. Визначення ударно-абразивної зносостійкості проводили в лабораторному кульовому млині за відношенням втрат маси еталонних та дослідних зразків. Для визначення щільності був застосований метод гідростатичного зважування.

Корозійну стійкість визначали в модельному середовищі з рН9, що відповідало виробничим умовам збагачувальних процесів чорної і кольорової металургії. Мікроструктурний аналіз та дослідження неметалевих включень проводили на металографічному мікроскопі МИМ-8 та електронному мікроскопі УЭМВ-100К.

Результати досліджень та їх обговорення

Межі вмісту основних хімічних елементів, які встановлені держстандартом для зносостійкої аустенітної сталі 110Г13Л, вміщують в себе оптимальні концентрації марганцю та вуглецю сталі Гадфільда і охоплюють ще достатньо широкі інтервали, що приводить до значних змін у стабільності аустеніту і, відповідно, у властивостях сталі. Крім того, в сучасних умовах при виготовленні виливків із сталі 110Г13Л найчастіше плавки проводять методом переплаву відходів, з використанням відпрацьованих деталей, як основного компонента шихти. При цьому, після розплавлення шихти в дуговій печі, вміст марганцю в металі знижується нижче нижнього рівня хімічного складу сталі 110Г13Л, а вуглецю, навпаки, піднімається на верхній рівень, а інколи і вище нього. Тому компенсувати недолік марганцю треба металевим марганцем, або низьковуглецевим феромарганцем, що значно підвищує собівартість сталі. В результаті, щоб знизити вартість, виливки виготовляють із сталей з марганцем на нижньому рівні, або нижче, а вуглецю – на верхньому, або вище, тобто далеко від класичного складу сталі Гадфільда.

Результати досліджень впливу вуглецю на фізико-механічні властивості та ударно-абразивну зносостійкість високомарганцевої сталі наведені на рис. 1. Дослідження показали, що межа міцності сталі з підвищенням вмісту вуглецю монотонно зростала (рис. 1а), що пояснюється підвищенням її здібності до зміцнення при зростанні концентрації вуглецю.

Криві, що описують змінення показників пластичності, ударної в'язкості і твердості мали екстремальний характер. Спочатку, за рахунок підвищення стабільності аустеніту і зменшення кількості мартенситних фаз при заростанні вмісту вуглецю [4], пластичні характеристики (рис. 1б, в), ударна в'язкість (рис. 1г) і твердість (рис. 1д) зростали. Наявність двох типів мартенситів деформації (ϵ і α') в високомарганцевих сталях підтверджується в роботах [10–12]. Після перевищення концентрації вуглецю інтервалу 1,2–1,3 %, який дуже близько підходить до межі розчинності вуглецю в аустеніті, криві пластичних характеристик і ударної в'язкості змінювали нахил в протилежному напрямі, а твердість навпаки збільшувалася. Показник зносостійкості сталі при ударно-абразивному зношуванні в кульовому млині (рис. 1е) монотонно зростав аналогічно межі міцності.

Залишкові карбіди, які не піддаються розчиненню гартуванням [1] при високих концентраціях вуглецю, по-перше, самі негативно впливають на фізико-механічні властивості сталі, а по-друге, впливають на

рух дислокацій і, відповідно, на перебудову решітки [4]. Тому в високомарганцевій сталі із стабільним аустенітом процес деформаційного двійникування є домінуючим механізмом зміцнення [13].

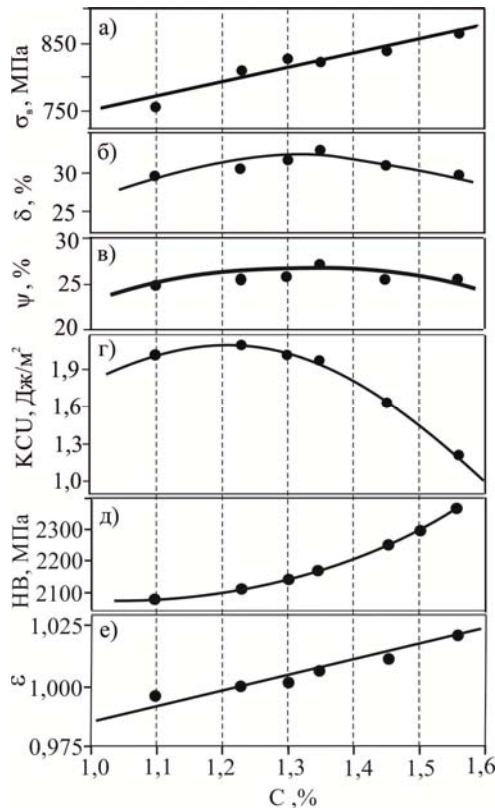


Рисунок 1. Залежність фізико-механічних властивостей сталей Г13Л від вмісту вуглецю:

a – межа міцності σ_s ; *b* – відносне видовження δ ;
v – відносне звуження Ψ ; *z* – ударна в'язкість КСУ;
d – твердість НВ; *e* – зносостійкість при випробуваннях у кульовому млині

Подібні результати досліджень ударно-абразивної зносостійкості сталі з 10 % марганцю по зрівнянню із сталлю 110Г13Л були отримані в роботі [14], автори якої показали, що підвищення зносостійкості сталі з метастабільним аустенітом досягається також додатковим економлегуванням. Дослідження мікротвердості сталі до і після зношування у шаровому млині підтвердили зміцнення поверхневого шару при зношуванні (рис. 2).

Зміцнення поверхневого шару пояснюється формуванням у метастабільному аустеніті при низькому вмісті вуглецю мартенсито-аустенітної структури, а при більших концентраціях вуглецю у стабільному аустеніті – взаємодією атомів вуглецю з дислокаціями, дефектами пакування, двійникуванням, формуванням коміркованої дислокаційної субструктури.

Металографічні дослідження (рис. 3) показали, що структура досліджуваних сталей у литому стані представляла собою аустеніт з включенням великих карбідів. Збільшення вмісту вуглецю більше 1,5 % приводило до утворення суцільної сітки карбідів, розташованих переважно по границям зерен.

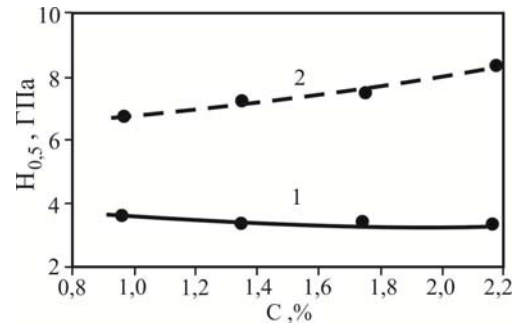


Рисунок 2. Мікротвердість поверхневих шарів зразків сталей Г13Л до і після зношування у кульовому млині: 1 – до зношування; 2 – після зношування

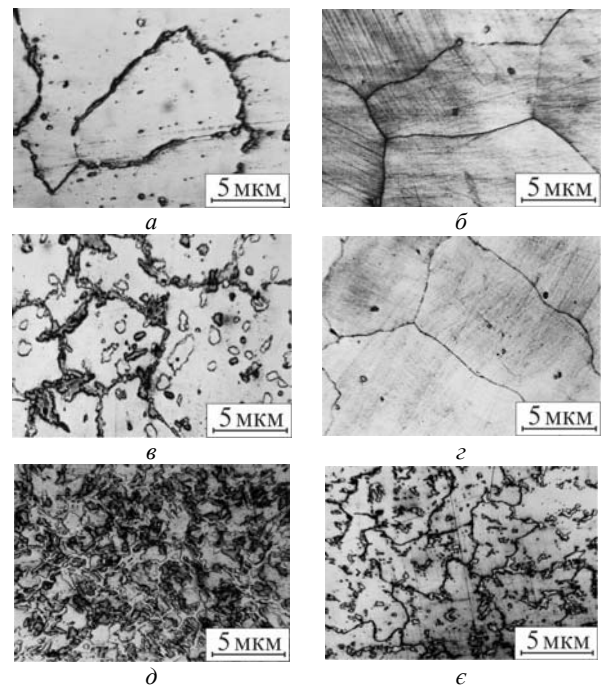


Рисунок 3. Мікроструктура досліджуваних сталей Г13Л:

a, v, d – в литому стані; *b, z, e* – в загартованому стані; *a, b* – концентрація вуглецю 0,9%; *v, z* – концентрація вуглецю 1,3%; *d, e* – концентрація вуглецю 1,6%

Вплив різних модифікаторів досліджували в умовах порційної розливки рідкого металу. Для кожного варіанту обробки визначали механічні властивості: ударно-абразивну зносостійкість, глибинний показник корозії, вміст кисню та азоту в сталі, проводили металографічний і мікрофрактографічний аналіз.

Результати випробувань високомарганцевих сталей представлено в таблиці 2. Дослідження показали, що найбільш ефективно підвищення механічних властивостей та ударно-абразивної зносостійкості високомарганцевих сталей забезпечували: титан при його вмісті в металі 0,05–0,15 %, ванадій – 0,10–0,15 % та сумісні присадки алюмінію, титана і ванадію з остаточним вмістом у вказаних межах. Суттєве підвищення механічних властивостей було отримано також при модифікуванні кальцієм в кількості 0,05–0,1 % (в перерахунку на металевий).

Глибинний показник корозії мав незначні зміни в залежності від вмісту модифікаторів, і, що особливо слід відмітити, зниження концентрації марганцю в сталі не приводило до підвищення корозійної стійкості, на відміну від результатів досліджень корозійного поведіння аустенітної TWIP сталі Fe-Mn-Al-Si в розчині хлориду. При збільшенні вмісту марганцю в безвуглецевій аустенітній сталі TWIP збільшується швидкість корозії [15], зростає схильність аустеніту до виникнення фазової суміші ϵ - і α' - мартенситів [16].

Металографічні дослідження сталі 110Г13Л з добавками алюмінію, титану, кальцію, РЗМ та ванадію показали, що природа і форма неметалевих включень безпосередньо зв'язана з вмістом елемента-модифікатора. В сталі, розкисленій алюмінієм, були виявлені глобулярні включення алюмомарганцевих силікатів (рис. 4а). Добавки кальцію і РЗМ приводили до подрібнення і зменшення загальної кількості глобулярних включень. Позитивний вплив цих елементів проявився також в зниженні кисню в металі (див. табл. 2). Величини зерен при добавках кальцію і РЗМ не змінювалися. Модифікування титаном і ванадієм привело утворення нітридів (рис. 4в) і карбонітридів (рис. 4 д). При сумісному модифікуванні алюмінієм, титаном і ванадієм були отримані комплексні включення розмірами 0,5–5,0 мкм (рис. 4ж), які вміщували алюміній, титан, ванадій і азот. Такі включення ідентифікувалися як нітриди алюмінія, титана, ванадія, а також як карбонітриди ванадія. Присадки титану і ванадію в 1,3–1,5 разів подрібнювали зерна аустеніту і робили позитивний вплив на рівномірність розподілу карбідів (Fe, Mn)₃C.

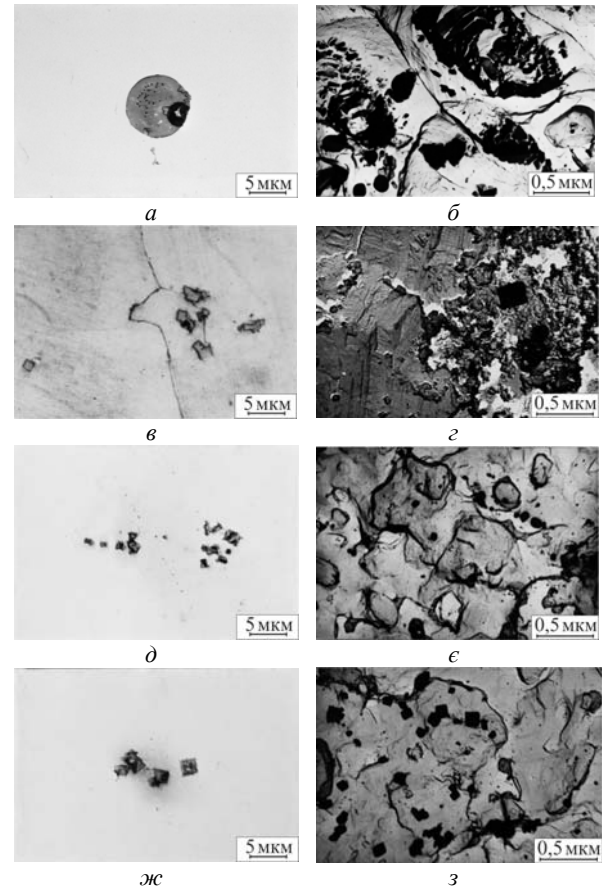


Рисунок 4. Неметалеві включення в модифікованій високомарганцевій сталі:

- а – алюмомарганцевий силікат в сталі, модифікованій алюмінієм (0,015 % Al); б – плівковий нітрид алюмінію (0,015 % Al); в, з – нітрид титану (0,015 % Al + 0,08 % Ti); д – карбонітрид ванадію (0,015 % Al + 0,15 % V); е – нітрид ванадію (0,015 % Al + 0,15 % V); ж, з – нітриди алюмінію, титану і ванадію (0,015 % Al + 0,08 % Ti + 0,15 % V)

Таблиця 1 – Хімічний склад і вміст газів у високомарганцевій сталі 110Г13Л

№	Вміст елементів, мас. %										Присадка Ca, %	Вміст газів, %	
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	Ti	РЗМ	V		O ₂	N ₂
1	1,36	13,10	0,66	0,090	0,027	0,29	0,013	–	–	–	–	0,0080	0,0096
2	1,36	13,15	0,68	0,090	0,022	0,30	0,018	0,150	–	–	–	0,0075	0,013
3	1,38	13,15	0,70	0,090	0,023	0,30	0,018	–	–	–	0,10	0,0076	0,013
4	1,30	13,05	0,68	0,090	0,013	0,30	0,016	–	0,03	–	–	0,0050	0,013
5	1,38	13,1	0,70	0,090	0,018	0,28	0,018	–	–	0,15	–	0,0090	0,010
6	1,38	13,63	0,68	0,090	0,021	0,30	0,015	0,075	–	0,15	–	0,0064	0,011

Таблиця 2 – Вплив модифікування на властивості високомарганцевої сталі 110Г13Л

№	Модифікатор	Механічні властивості						Ударно-абразивна зносостійкість, ε	Густина d, г/см ³	Швидкість корозії П, мм/рік
		σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	δ, %	ψ, %	КCU, МДж/м ²	НВ, МПа			
1	Al	406	810	32,7	29,4	2,12	1870	1,01	7,8050	0,0002
2	Al+Ti	411	834	33,4	29,7	2,33	2020	1,06	7,8116	0,0003
3	Al+Ca	407	842	34,9	30,9	2,24	1920	1,03	7,8110	0,0002
4	Al+РЗМ	398	826	31,4	29,6	2,04	1960	1,07	7,8188	0,0003
5	Al+V	417	831	33,7	30,1	2,31	2070	1,08	7,8160	0,0003
6	Al+Ti+V	426	851	34,1	31,3	2,35	2120	1,10	7,8139	0,0002

Мікрофрактографічні дослідження дозволили встановити, що на властивості високомарганцевої сталі найбільший вплив роблять дрібнодисперсні нітридні включення. В зламах сталі, розкисленій алюмінієм, були виявлені плівкові нітриди алюмінію (рис. 4б), навкруги яких отримала розвиток зона крихкого руйнування. В сталі, модифікованій алюмінієм і титаном, основну масу нітрид них включень склали нітриди титану правильної кубічної форми, розмірами 5–20 мкм (рис. 4з). При модифікуванні алюмінієм і ванадієм в сталі були виявлені дрібнодисперсні включення розмірами 0,5–2,0 мкм (рис. 4е). Мікрорентгеноспектральним аналізом цих включень встановлена наявність в них ванадію. При модифікуванні алюмінієм і титаном або алюмінієм і ванадієм в зламах практично були відсутні плівкові нітриди алюмінію. При сумісному модифікуванні алюмінієм, титаном і ванадієм були отримані комплексні включення розмірами 0,5–5,0 мкм, що вміщували алюмінії, титан, ванадій і азот (рис. 4з).

Комплексне модифікування високомарганцевої сталі алюмінієм, титаном і ванадієм сприяло переведенню плівкових включень в об'ємні, що виділялися в рідкій сталі. Ці включення діяли як модифікатори, утворюючи центри кристалізації. Структура сталі помітно подрібнювалась, при цьому послаблювалася дія фосфідної евтектики [1].

Дослідження показали, що раціональними методами модифікування можна досягти підвищення експлуатаційних характеристик нестабільних сталей.

Дослідження впливу температури випробувань на ударну в'язкість високомарганцевої сталі проводили на литих зразках сталі 110Г13Л, загартованих у воді з температури 1050 °С. Ударну в'язкість (КСУ) визначали при температурах +20°С, -20°С, -40°С, -60°С. Охолоджуюче середовище – суміш спирту з рідким азотом. Результати досліджень впливу температури випробувань і концентрацій в сталі марганцю і вуглецю наведені на рис. 5, 6.

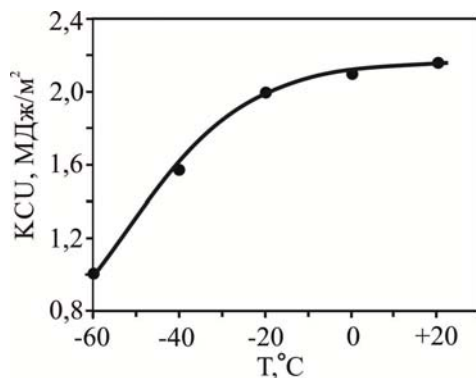


Рисунок 5. Залежність ударної в'язкості високомарганцевих сталей 110Г13Л від температури випробувань

Дослідження впливу модифікування сталі 110Г13Л на ударну в'язкість при низьких температурах (табл. 3) показало, що модифікатори істотно не впливають на її холодостійкість.

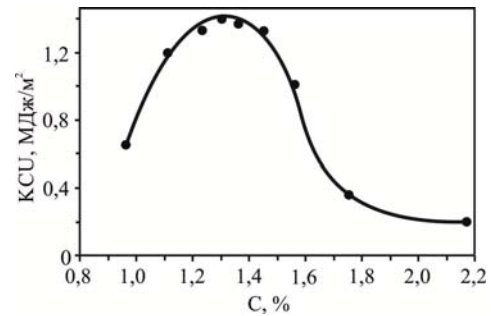


Рисунок 6. Вплив вуглецю на ударну в'язкість сталі 110Г13Л при -40 °С

Таблиця 3 – Ударна в'язкість модифікованих сталей 110Г13Л при різних температурах випробувань.

Розкислювач, модифікатор	КСУ, МДж/м² при t °С			
	+20	-20	-40	-60
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, PЗМ	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

Висновки

1. Уточнені і отримані нові залежності впливу вуглецю на фізико-механічні і службові властивості високомарганцевої сталі.

2. Рекомендовано для деталей, які працюють при значних ударних навантаженнях і для яких найважливішим показником надійності роботи є ударна в'язкість, підтримувати вміст основних елементів на рівні середніх значень держстандарту для сталі 110Г13Л. Для деталей, що працюють при низьких ударних навантаженнях, допустима концентрація марганцю на нижньому рівні держстандарту, а вуглецю – на верхньому, що є актуальним при проведенні плавки сталі методом переплаву відпрацьованих деталей.

3. Рекомендовано метод комплексного модифікування високомарганцевої сталі алюмінієм, титаном і ванадієм, який забезпечує переведення плівкових нітридів алюмінію в тугоплавкі комплексні нітриди алюмінію, титану і ванадію компактної форми. Ці включення діють як модифікатори-коагулятори, утворюючи центри кристалізації, що сприяє подрібненню структури і підвищенню властивостей сталі.

4. Досліджено вплив низьких температур на ударну в'язкість високомарганцевої сталі.

Список літератури

1. Давыдов Н. Г. Высокомарганцевая сталь / Давыдов Н. Г. – М. : Металлургия, 1979. – 176 с.
2. Sabzi M. Hadfield manganese austenitic steel: a review of manufacturing processes and properties. / M. Sabzi, M. Farzam // Materials research express. – 2019. – Vol. 6. – N 10. – P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3ee3>

3. Гудремон Э. Специальные стали / Гудремон Э. – М. : Металлургия, 1966. – Т. 1. – 736 с.
4. Богачев И. Н. Структура и свойства железомарганцевых сплавов / И. Н. Богачев, В. Ф. Еголаев. – М. : Металлургия, 1973. – 296с.
5. Bleck W. New insights into the properties of high-manganese steel / W. Bleck // International journal of minerals, metallurgy and materials. – 2021. – Vol. 28. – No. 5. – P. 782–796. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2166-1>
6. Influence of austenitization temperature on microstructural developments, mechanical properties, fracture mode and wear mechanism of Hadfield high manganese steel / H. R. Jafarian, M. Sabzi, S. H. Mousavi Anijdan and al. // Journal of materials research and technology. – 2021. – Vol. 10. – P. 819–831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.003>
7. Ol'shanetskii V. E. Structural and magnetic stability of austenite in chromium-nickel and manganese steels with cold deformation / V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoi, V. N. Sazhnev // Metal science and heat treatment. – 2016. – Vol. 58. – N 5. – P. 311–317. DOI: [10.1007/s11041-016-0009-5](https://doi.org/10.1007/s11041-016-0009-5)
8. Сніжної Г. В. Вплив хімічних компонентів на механічні та магнітні властивості високомарганцевих сталей / Г. В. Сніжної, В. М. Сажнев, В. Ю. Ольшанецький // Авіаційно-космічна техніка та технологія. – 2015. – № 8(125). – С. 22–26.
9. Snizhnoi, G. V. Impact of magnetic state of austenite on the phase and structure transformations of wear-resistant Fe-C-Mn-Cr steels under plastic deformation / G. V. Snizhnoi, S.V. Bobyr // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2012. – Vol. 34 – N 10. – P. 1355–1365.
10. Сніжної Г. В. Наукові основи впливу магнетного стану структури на властивості австенітних сталей : дис. ... докт. техн. наук: 05.02.01 / Сніжної Геннадій Валентинович. – Запоріжжя, 2018. – 390 с.
11. Armağana O. Effects of thermal and deformation on martensitic transformation and magnetic properties in Fe-17%Mn-4.5%X (X = Co and Mo) alloys / O. Armağana, U. Sarib, Ç. Yücela, T. Kırmıdı // Micron. – 2017. – Vol. – 103. – P. 34–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2017.09.007>
12. Seol J. B. Influence of carbon content on the microstructure, martensitic transformation and mechanical properties in austenite/ε-martensite dual-phase Fe-Mn-C steels / J. B. Seol, J. E. Jung, Y. W. Jang, C. G. Park // Acta materialia. – 2013. – N 61. – P. 558–578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.078>
13. Li D. The role of Mn on twinning behavior and tensile properties of coarse- and fine-grained Fe-Mn-C twinning-induced plasticity steels / D. Li, L. Qian, C. Wei, S. Liu, F. Zhang, J. Meng // Materials science and engineering: A. – 2020. – Vol. 789. – id. 139586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139586>
14. Плюта В. Л. Економнолеговані зносостійкі сплави: проблеми та перспективи / В. Л. Плюта, О. М. Нестеренко, С. В. Бобир // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії: Зб. наук. тр. ІЧМ НАН України. – 2008. – Вип. 17. – С. 231–239.
15. Fajardo S. Effect of Mn additions on the corrosion behaviour of TWIP Fe-Mn-Al-Si austenitic steel in chloride solution / S. Fajardo, I. Llorente, J. A. Jiméneza and al. // Corrosion science. – 2019. – Vol. – 154. – P. 246–243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.04.026>
16. Ольшанецький В. Ю. Про закономірності формування мартенситних фаз у марганцовистому аустеніті при деформації стисканням / В. Ю. Ольшанецький, Г. В. Сніжної, В. М. Сажнев // Нові матеріали та технології у металургії та машинобудуванні. – 2012. – № 2. – С. 8–14.

Одержано 15.03.2023

THE EFFECT OF CARBON AND NEGATIVE TEMPERATURE ON THE PHYSICAL, MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF AUSTENITIC HIGH-MANGANESE STEEL

- Sazhnev V. Ph. D., Associate Professor of the Department of Machines and Technologies of Foundry Production, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sajhnev@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2095-4958
- Snizhnoi G. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: snow@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1452-0544

Purpose. It consists in determining the influence of carbon and manganese, concentrations of modifiers, test temperatures on the physical and mechanical properties and wear resistance of austenitic highmanganese steel Г13Л.

Research methods. Determination of impact viscosity was carried out on the МК-30А pendulum probe, microhardness – on the PMT-3 device. The hydrostatic weighing method was used to determine the density. Microstructural analysis and study of non-metallic inclusions were carried out using metallographic and electron microscopes. Corrosion resistance was determined in a model environment with pH9, which corresponded to the production conditions of beneficiation processes of ferrous and non-ferrous metallurgy.

Results. It was established that the best indicators of the properties of steel 110Г13Л are provided at average values of carbon and manganese concentrations within the standard. For parts that work under low shock loads, it is

advisable to use austenitic wear-resistant steels with lower manganese concentrations and higher carbon concentrations within the standard chemical composition.

Scientific novelty. *New dependences on carbon influence, structural modification, non-metallic inclusions, and physical and mechanical properties of high-manganese steel were clarified and obtained. The strength limit of steel increases monotonically with increasing carbon content, and the dependences describing changes in plasticity, impact toughness, and hardness are extreme in nature.*

Practical value. *A rational method of modification to improve the operational characteristics of steels is proposed. The influence of the test temperature on the impact toughness of steel with changes in carbon concentrations was studied, as the main indicator of the reliability of machine parts at low temperatures.*

Key words: *highmanganese steel, modification, austenite, martensite, carbide, yield strength, impact toughness, wear resistance.*

References

1. Davydov, N.G. (1979). *Vysokomargancevaya stal* [Highmanganese steel]. Moscow, Russia: Metallurgiya Publ., [in Russian].
2. Sabzi, M., Farzam, M. (2019). Hadfield manganese austenitic steel: a review of manufacturing processes and properties, *Materials research express*, 6, 0, 1–15. doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3ee3>
3. E. Gudremon, *Specialnye stali* 1966. [Special steels]. Moscow, Russia: Metallurgiya Publ., 1. [in Russian].
4. Bogachev, I. N., Egolaev, V. F., (1973). *Struktura i svoystva zhelezomargancevykh splavov* [Structure and properties of ferromanganese alloys]. Moscow, Russia: Metallurgiya Publ. [in Russian].
5. Bleck W., (2021). New insights into the properties of high-manganese steel”, *International journal of minerals, metallurgy and materials*, 28(5), 782–796. doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2166-1>
6. Jafarian, H.R., Sabzi, M., Mousavi Anijdan, S.H., Eivani, A.R., Park, N. (2021). Influence of austenitization temperature on microstructural developments, mechanical properties, fracture mode and wear mechanism of Hadfield high manganese steel, *Journal of materials research and technology*, 10, 819–831. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.003>
7. Ol’shanetskii, V.E., Snezhnoi, G.V., Sazhnev, V.N. (2016). Structural and magnetic stability of austenite in chromium-nickel and manganese steels with cold deformation, *Metal science and heat treatment*, 58(5), 311–317. DOI: 10.1007/s11041-016-0009-5
8. Snizhnoi, H.V., Sazhniev, V.M., Olshanetskyi, V. Yu. (2015). Vplyv khimichnykh komponentiv na mekhanichni ta mahnitni vlastyvosti vysokomarhantsevykh stalei [The influence of chemical components on the mechanical and magnetic properties of high-manganese steels], *Aviatsiino-kosmichna tekhnika ta tekhnolohiia* [Aerospace engineering and technology], 8(125), 22–26. [in Ukrainian].
9. Snizhnoi, G.V., Bobyr, S.V. (2012). Impact of magnetic state of austenite on the phase and structure transformations of wear-resistant Fe-C-Mn-Cr steels under plastic deformation, *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 34(10), 1355–1365.
10. Snizhnoi, G. V. (2018). Naukovi osnovy vplyvu mahnitnoho stanu struktury na vlastyvosti austenitnykh stalei [Scientific basis of the influence of magnetic state of the structure on the properties of austenitic steels], Sc.D. dissertation, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine. [in Ukrainian].
11. Armağana, O., Sarıb, U., Yücela, Ç., Kırındı, T. (2017). Effects of thermal and deformation on martensitic transformation and magnetic properties in Fe-17%Mn-4.5%X (X = Co and Mo) alloys, *Micron*, 103. 34–44, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2017.09.007>
12. Seol, J.B., Jung, J.E., Jang, Y.W., Park, C.G. (2013). Influence of carbon content on the microstructure, martensitic transformation and mechanical properties in austenite/ε-martensite dual-phase Fe-Mn-C steels, *Acta materialia*, 61, 558–578. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.078>
13. Li, D., Qian, L. Wei, C. Liu, S., Zhang, F., Meng, J. (2020). The role of Mn on twinning behavior and tensile properties of coarse- and fine-grained Fe-Mn-C twinning-induced plasticity steels, *Materials science and engineering: A*, 789, id. 139586. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139586>
14. Pliuta, V.L., Nesterenko, O.M., Bobyr, S.V. (2008). Ekonomnolehovani znosostiiki splavy: problemy ta perspektyvy [Economically alloyed wear-resistant alloys: problems and prospects], *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii: Zb. nauk. tr. IChM NAN Ukrayiny* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collected scientific works of Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine], 17, 231–239. [in Ukrainian].
15. Fajardoa, S., Llorente, I., Jiménez, J.A., Bastidas, J.M., Bastidas, D.M. (2019). Effect of Mn additions on the corrosion behaviour of TWIP Fe-Mn-Al-Si austenitic steel in chloride solution”, *Corrosion science*, 154, 246–243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.04.026>
16. Olshanetskyi, V.Yu. Snizhnoi, H.V. Sazhniev, V.M. (2012). Pro zakonmirnosti formuvannia martensytnykh faz u mar-hantsovyystomu austeniti pry deformatsii styskanniam [On regularities of the formation of martensitic phases in manganese austenite during compression deformation], *Novi materialy ta tekhnolohii u metalurhii ta mashynobu-duvanni* [New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering], 2, 8–14. [in Ukrainian].