УДК 669:624.21.4.015

В. А. Локтіонов-Ремізовський, *канд. техн. наук, пров. наук. співроб.,*
Н. В. Кир'якова, *гол. технолог,*
Г. Е. Федоров, *канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,*
М. М. Грибов, *гол. технолог,*
І. В. Олексенко, *наук. співроб.*

Фізико-технологічий інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ ВУГЛЕЦЮ І МАРГАНЦЮ В СТАЛІ 110Г13Л

Побудовано топографічні проекції поверхонь межі міцності і межі текучості при розтягуванні, і ударної в'язкості марганцевих сталей аустенітного класу. Проведено порівнювальний аналіз топографічних проекцій поверхонь межі міцності і межі текучості при розтягуванні, і ударної в'язкості марганцевих сталей аустенітного класу зі структурною діаграмою марганцевих сталей. А також, проведено порівнювальний аналіз концентраційної області сталі 110Г13Л, при вмісті марганцю і вуглецю регламентованих стандартом України, зі структурною діаграмою марганцевих сталей. Проведено аналіз якості металу (структури і властивостей) в литому траку зі сталі 110Г13Л, на зразках вирізаних з тіла серійного трака. Встановлено, що поверхні досліджених властивостей марганцевих сталей представлені площинами з підвищеними значеннями властивостей при підвищенні вмісту марганцю і зниженні вуглецю, в межах аустенитної області структурної діаграми. Встановлено, що концентраційна область сталі 110Г13Л, при вмісті марганцю і вуглецю регламентованих стандартом України, розташовується на трьох структурних зонах структурної діаграми марганцевих сталей. Також встановлено, що в виливку трака спостерігаються дендритна неоднорідність і мікропористість. Рівень властивостей встановлений випробуваннями зразків вирізаних з виливка траку менший, ніж розрахунковий рівень цих же властивостей, за умови однакового складу сталі по марганцю і вуглецю. Ливарні дефекти (мікропористість і дендритна ліквація) обумовлюють зниження властивостей на зразках, порівняюючи з розрахунковим рівнем властивостей. Усереднений понижуючий коефіцієнт становить 0,65. Рекомендується встановити вміст вуглецю в сталі 110Г13Л в стандарті України на рівні від 0,95 до 1,25 %.

Ключові слова: *сталь, марганець, вуглець, кремній, структура, властивості.*

В 1882 році англійський металург Robert Hadfield розробив і запропонував сталь з 11–14,5 % Mn, 0,9–1,3 % C, яка в подальшому стала відома як сталь Гатфільда. Сталь Гатфільда має високий опір зносу (стиранню) при високому тиску або ударних навантаженнях. Одночасно сталь Гатфільда має високу пластичність, проте – не

найкращі ливарні характеристики, і її обробка на металорізальних станках ускладнена. За минулі 137 років дослідники в різних країнах світу вирішували задачу поліпшення характеристик сталі Гатфільда. Всі дослідники приходили до одного результату, зміна (підвищення) однієї властивості супроводжується зниженням іншої.

В даний час сталь Гатфільда введена в стандарт України в групу зносостійких сталей, під маркою 110Г13Л [1]. Стандарт України регламентує наступний хімічний склад сталі 110Г13Л, (%): C 0,90–1,50; Mn 11,50–15,00; Si 0,30–1,00; P ≤ 0,050; S ≤ 0,120; Cr ≤ 1,0; Ni ≤ 1,0. Поряд зі сталлю 110Г13Л, в стандарті України наведені і інші марки зносостійких марганцевих сталей. Марганець широко застосовують для легування ливарних сталей [2]. Марганець стабілізує аустеніт і, певною мірою, сприяє утворенню карбідів, перелік марганцевих сталей досить широкий.

Г. Є. Федоров з колегами узагальнили вплив марганцю і вуглецю на структурний стан марганцевих сталей і встановили три групи марганцевих сталей, що відрізняються структурним станом: аустенітні, мартенситні і перлітні сталі (рис. 1) [3].

Інші дослідники провели узагальнення марганцевих сталей на основі структурної діаграми, в системі координат вміст марганцю і вміст вуглецю, з деталізацією структурних областей (рис. 2) [4].

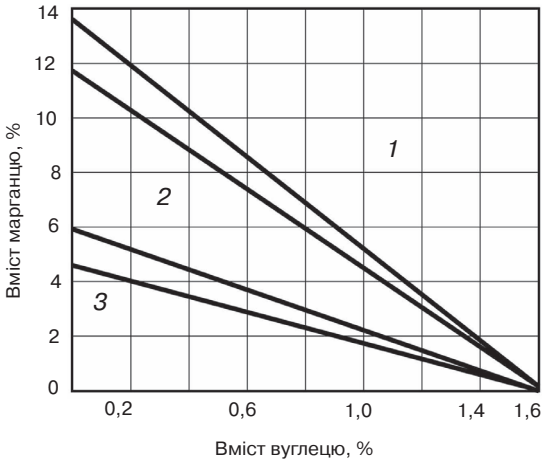


Рис. 1. Вплив вуглецю на структуру марганцевих сталей [3]; *1* – аустенітні сталі; *2* – мартенситні сталі; *3* – перлітні сталі

Обсяг металопродукції зі сталі 110Г13Л істотно перевищує обсяги продукції з інших марок марганцевих сталей. Сталь 110Г13Л має не найкращі технологічні характеристики і додатково до цього зміни хімічного складу розплаву, від плавки до плавки, обумовлює розкид рівня механічних властивостей сталі в виливках. М. С. Шрамко з колегами запропонував формули розрахунку властивостей сталі 110Г13Л залежно від вмісту вуглецю, марганцю, кремнію та домішок сірки і фосфору [5]:

$$\sigma_в = 540 - 264{,}34C + 47{,}41Mn - 82{,}61Si - 25{,}0P - 401{,}6S \text{ МПа}.$$

$$\sigma_{0,2} = 453{,}2 - 182{,}8C + 21Mn - 26{,}65Si - 2{,}01P - 401{,}6S \text{ МПа}.$$

$$KCU = 33{,}18 - 16{,}35C + 1{,}42Mn - 10{,}30Si - 0{,}05P - 15S \text{ кгс м/см}^2.$$

При розробці рівнянь функціональних залежностей властивостей сталі 110Г13Л вищезгадані науковці не враховували вплив хрому і нікелю. Використовуючи формули М. С. Шрамко, ми провели розрахунки зазначених вище трьох механічних властивостей сталі 110Г13Л. Діапазон вмісту вуглецю і марганцю, для розрахунку встановлено такий: вуглець 0,6–1,7 %; марганець 6–20 %.

Вміст кремнію, сірки і фосфору, при розрахунку, задано 0,3 %; 0,12 % і 0,05 % відповідно. Вміст кремнію прийнято на нижній межі вимог стандарту. Вміст сірки і фосфору прийнято на верхній межі вимог стандарту.

На рис. 3 зображено схему діаграми склад–структура–властивості марганцевих сталей з аустенітною структурою, побудована суміщенням топографічних проекцій поверхонь трьох властивостей, у вигляді розрахункових ізоліній, на концентраційне поле аустенітної області структурної діаграми марганцевих сталей. Один з постулатів закону Курнакова говорить про те, що в межах однієї фазової області функція концен-

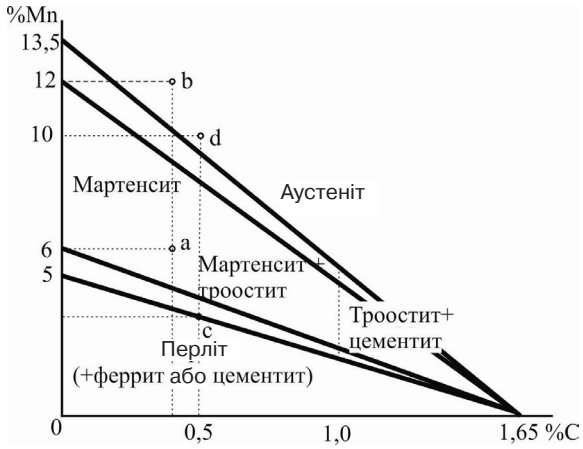


Рис. 2. Структурна діаграма марганцевих сталей [4]

траційної залежності властивостей сплавів не має розриву. Це дозволяє нам провести суміщення топографічної проекції поверхні властивостей з аустенітною областю структурної діаграми марганцевих сталей. При розрахунку використовували вміст вуглецю і марганцю ширший, ніж їх діапазон вмісту в сталі 110Г13Л, регламентований стандартом України, але не переходячи межі аустенітної області [1].

Межа міцності та межа плинності при розтягуванні, і ударна в'язкість марганцевих сталей представлені пласкою поверхнею з підвищеним рівнем властивостей в бік підвищення вмісту марганцю і зниження рівня вмісту вуглецю. Область концентрації вуглецю і марганцю в сталі 110Г13Л позначена пунктиром і знаходиться в середній частині досліджуваного діапазону концентрації вуглецю і марганцю.

Г. Є. Федоров з колегами надали свою версію схеми основних структурних областей марганцевих сталей (рис. 4) [3]. З рис. 4 випливає, що аустенітна область марганцевих сталей складається, як мінімум, з трьох структурних областей. Отже,

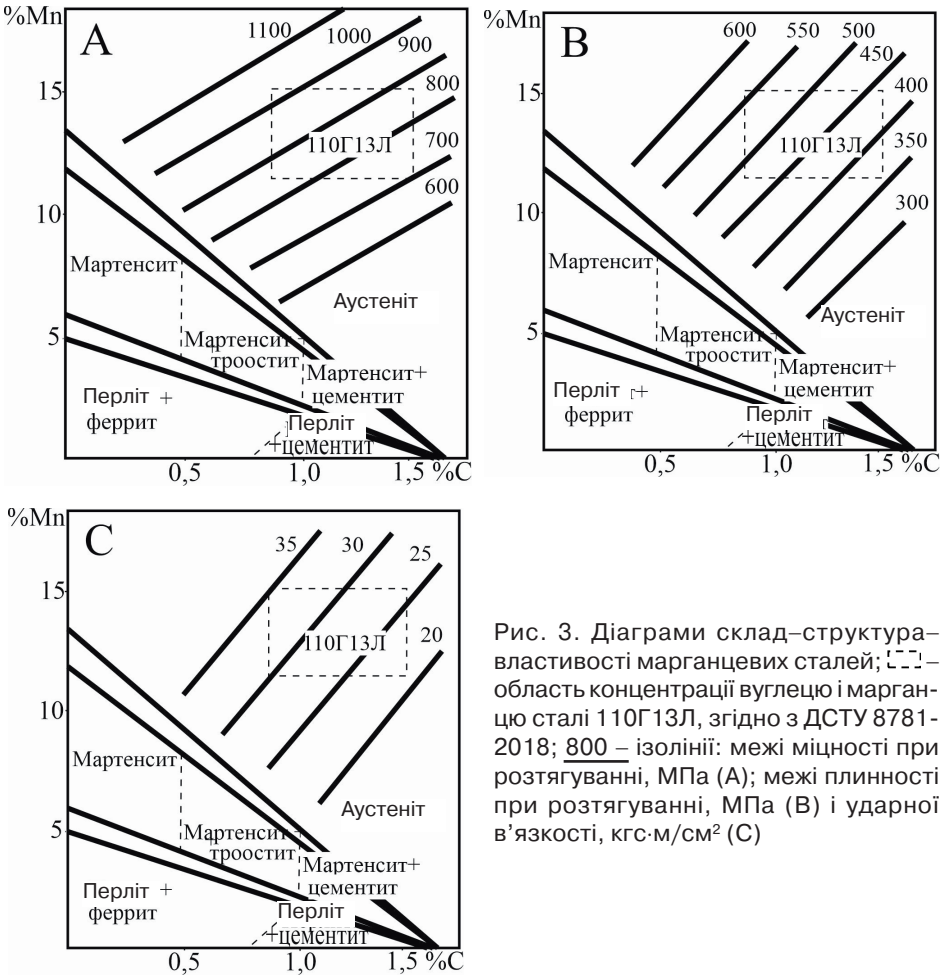


Рис. 3. Діаграми склад–структура–властивості марганцевих сталей; [ ] – область концентрації вуглецю і марганцю сталі 110Г13Л, згідно з ДСТУ 8781-2018; 800 – ізолінії: межі міцності при розтягуванні, МПа (А); межі плинності при розтягуванні, МПа (В) і ударної в'язкості, кгс·м/см² (С)

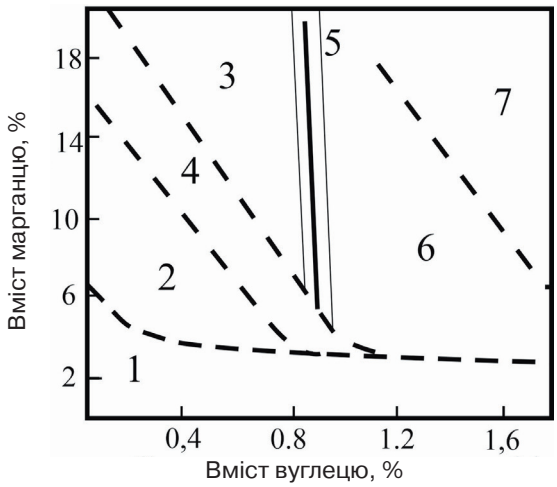


Рис. 4. Схема основних структурних областей марганцевих сталей [1]: *1* – область вуглецевих сталей з підвищеним вмістом марганцю; *2* – область мартенситних сталей; *3* – область сталей з аустенітною структурою; *4* – область сталей з перехідною структурою від сталей області *2* до сталей області *3*; *5* – область сталей з перехідною структурою від сталей області *3* до сталей області *6; 6* – карбідна область; *7* – область сталей з аустенітом зниженої стабільності

функція концентраційної залежності властивостей марганцевих сталей в аустенітній області структурної діаграми буде мати перегини на границях структурних областей. Дослідження функцій концентраційних залежностей інших властивостей в інших системах сплавів підтверджують цю закономірність [6].

Суміщення концентраційної області по вуглецю і марганцю сталі 110Г13Л, регламентованої стандартом України, зі схемою основних структурних областей марганцевих сталей наведено на рис. 5.

Концентраційна область сталі 110Г13Л, згідно регламенту стандарта України, розташовується на трьох структурних областях схеми основних структурних областей марганцевих сталей. Середня частина концентраційної області сталі 110Г13Л розташовується в карбідній області схеми основних структурних областей марганцевих сталей (за термінологією публікації [3]). Ліва і права частини концентраційної області сталі 110Г13Л розташовані в області з перехідною структурою і області з аустенітом зниженої стабільності.

Вміст вуглецю в сталі 110Г13Л менший за 1,0 % обумовлює розташування складу сталі на границі структурних областей. При вмісті вуглецю в сталі більше за 1,3 % складу сталі заходить на область аустенітних сталей з нестійким аустенітом. Стійкість структури змінюється, а отже знижується можливість керування властивостями сталі термообробкою. Рекомендоване граничне значення вмісту вуглецю в сталі 110Г13Л має становити від 0,95 % до 1,25 %. Регламентоване значення вмісту марганцю, обумовлене стандартом, змін не потребує. На рис. 6 представлено діаграми склад–структура–властивості сталі 110Г13Л в рекомендованому діапазоні вмісту вуглецю і марганцю.

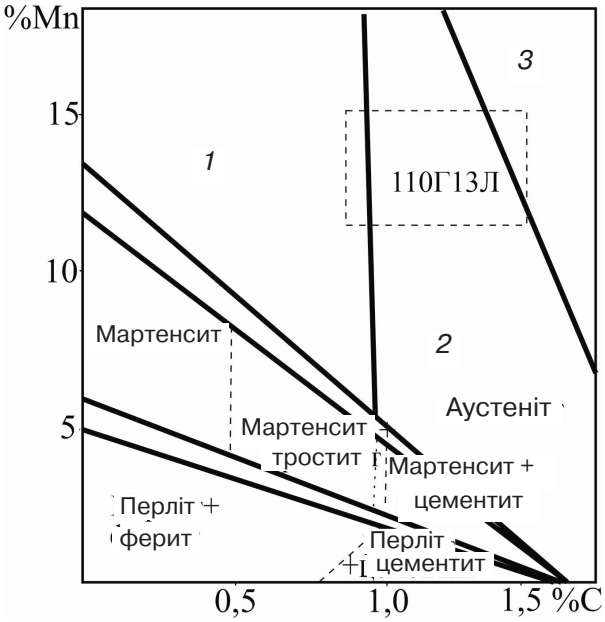
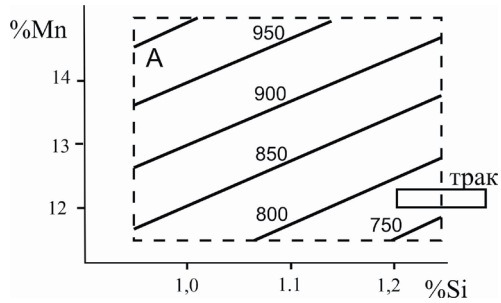
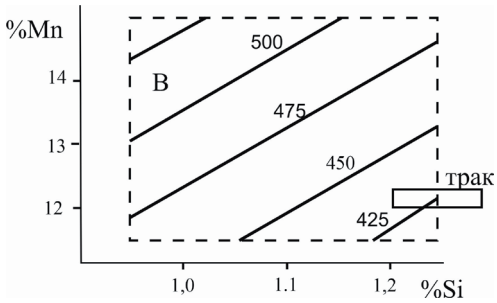


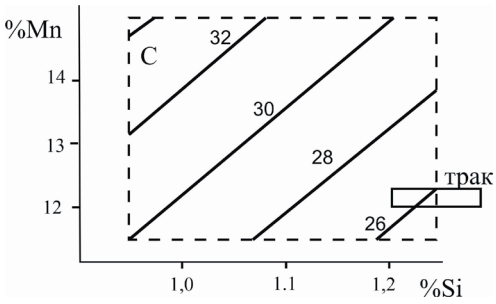
Рис. 5. Область вмісту вуглецю і марганцю в сталі 110Г13Л, згідно стандарту України [1], в зіставленні зі схемою основних структурних областей марганцевих сталей [3]: *1* – сталі з аустенітною структурою; 2 – сталі з аустенітно-карбідною структурою; *3* – сталі з аустенітно-карбідною структурою і аустенітом зі зниженою стабільністю; ⊡ – область концентрації по вуглецю і марганцю сталі 110Г13Л, згідно стандарту України



а



б



в

Рис. 6. Діаграма склад–структура–властивості сталі 110Г13Л в рекомендованому діапазоні вмісту вуглецю і марганцю; 850 – ізолінії: межі міцності при розтягуванні, МПа (А), межі плинності при розтягуванні, МПа (В) і ударної в'язкості, кгс·м/см^2 (С); ⬚ – рекомендовані концентрації вуглецю і марганцю в сталі 110Г13Л; ▭ – область, виділена прямокутником, це область хімічного складу по марганцю і вуглецю сталі в траку

Зміна вмісту кремнію в сторону підвищення на 0,1 % від мінімального може призвести до зниження рівня міцності і плинності сталі на 8 і 2,6 МПа відповідно, що становить не більше 1,0–1,5 %. Зниження вмісту сірки на 0,01 % підвищить міцність і плинність сталі на 4,0МПа, що становить менше 1%. Зниження вмісту фосфору на 0,1 % підвищить міцність і плинність сталі на 2,5 і 0,2 Мпа відповідно, що становить не більше 1–2 %.

Для перевірки результативності розробленої діаграми склад–структура–властивості провели випробування зразків, вирізаних з литого трака зі сталі 110Г13Л.

У табл. 1 наведено усереднений хімічний склад сталі трака. Хімічний склад сталі визначили за пробами відібраними з зуба і провушини трака.

На рис. 6 наведено також розташування хімічного складу сталі проб трака на діаграмах склад–структура–властивості. Зі співставлення діаграми і області концентрації сталі з проб трака, можна встановити, що розрахункові значення межі міцності і межі плинності можуть становити 740–800 МПа і 400–450 Мпа відповідно. Розробники формул залежності властивостей сталі 110Г13Л використовували інформацію про рівень властивостей сталі 110Г13Л з різних підприємств, де експлуатують тіла, що мелють, зі сталі 110Г13Л. Відповідно до вимог стандарту, механічні властивості ливарних сталей у виливках визначають на заготовках, що окремо відливаються, типу «клин» або «проба-треф».

Застосування спеціальних ливарних проб для виготовлення контрольних зразків забезпечує підвищення якості металу в литих заготовках зразків на противагу якості металу безпосередньо в литві. Наші дослідження на різних типах ливарних сплавів (чавуни, бронзи, алюмінієві ливарні сплави, ливарні сталі) показали, що рівень властивостей сплавів у виливках деталей на 30–35 % нижчий, ніж рівень властивостей сплавів, отриманий при випробуванні зразків сплавів, виготовлених зі спеціальних ливарних проб. Для ливарних сталей цей показник досягає значень 30–35 %, і навіть 40 % на широко-інтервальних ливарних сплавах. Це явище обумовлено, перш за все, умовами кристалізації розплаву в формі спеціальної проби. Проба «треф» і проба «клин» для цієї мети і були розроблені. У них мінімізують процеси ліквації, тріщиноутворення та

Таблиця 1

Хімічний склад проб сталі, відібраних з тіла трака, %мас.

Хімічний элемент	Місце відбору проби		Середне значення
	провушина трака	зуб трака	
Ni	0,0087	0,0100	0,0094
Fe	85,5616	85,4963	85,5290
Cr	0,0566	0,0517	0,0542
Si	0,5503	0,5089	0,5296
Mn	12,4096	12,6114	12,5105
Ti	0,0047	0,0066	0,0057
V	0,0013	0,0018	0,0016
Cu	0,0800	0,0750	0,0750
P	0,0205	0,0197	0,0201
S	0,0201	0,0223	0,0212
C	1,2866	1,1964	1,2415

формування дендритних структур. Процеси утворення ливарних дефектів також знижуються до мінімуму. Як відзначали вище, сталь Гатфільда має не найкращі ливарні характеристики. Сталь Гатфільда слід відносити до сплавів широкоінтервальних.

Проведено металографічні дослідження структури зразків, вирізаних з трака. У табл. 2 наведено дані з дослідження структури і твердості проб, вирізаних з тіла трака. Видно, що спостерігаються дефекти характерні для литої структури: мікропористість і наявність дендритної структури. Зазначені дефекти і обумовлюють зниження механічних властивостей сталі в виливках.

Таблиця 2

Результати випробувань властивостей сталі на зразках вирізаних з тіла трака

Параметр, що вимірювався	Місце вимірювання	Рівень параметра	Прим.
Твердість за Бринелем	зуб трака провушина трака	160,0 175,0	–
Твердість за Роквеллом (шкала HRB)	зуб трака провушина трака	88,0 (13) 95,0 (20)	( ) твердість по шкалі HRC
Балл зерна	зуб трака провушина трака	5 5	–
Наявність дендритної структури	зуб трака провушина трака	в наявності відсутня	–
Наявність неметалевих включень	зуб трака провушина трака	в наявності (5 мкм) в наявності (5 мкм)	–
Наявність мікропористості	зуб трака провушина трака	в наявності (1–2 мкм) в наявності (1–2 мкм)	–

За діаграмою склад–структура–властивості (рис. 6), межа міцності при розтягуванні сталі Гатфільда, за складом, наведеним у табл. 1, повинен бути на рівні 750 Мпа, а рівень межі текучості – 420 МПа. На зразках, вирізаних з тіла трака, межа міцності склала 480 Мпа, а межа плинності – 280 МПа. Зниження реальної межі міцності на розрив по відношенню до розрахункового становить 36 %. Зниження межі текучості при розтягуванні складає 34 %. Наявність мікропористості і розвинених ліквацiйних явищ (наявність дендритної структури) призвело до зниження міцності зразків, вирізаних з тіла трака. Збіжність розрахункового рівня властивостей з рівнем властивостей зразків задовільна, з урахуванням коефіцієнта зниження.

Висновки

• Межа вмісту вуглецю і марганцю в сталі 110Г13Л, регламентовані стандартом України, охоплюють три структурні області у структурній діаграмі марганцевих сталей.

• Розташування концентраційної області сталі 110Г13Л на трьох структурних областях структурної діаграми марганцевих сталей зумовлюють можливість істотної стрибкоподібної зміни властивостей сталі в виливку, при вмісті вуглецю на верхній або на нижній межі.

• Для розрахунку рівня межі міцності і межі текучості при розтягуванні сталі 110Г13Л в фасонних виливках типу «ТРАК», слід в формули розрахунку межі міцності і межі текучості ввести знижуючий коефіцієнт 0,65.

• Для підвищення стабільності стану структури, рівнів властивостей сталі 110Г13Л і їх повторюваності від плавки до плавки в литих деталях, у всьому діапазоні вмісту вуглецю і марганцю, регламентованих стандартом України, доцільно підняти нижню межу вмісту вуглецю до 0,95 % і знизити верхню межу вмісту вуглецю до 1,25 %.

Список літератури

1. ДСТУ 8781-2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні умови.
2. Гуляев А. П. Металловедение. 3-е переработанное издание. М. Металлургия. 1977. 646 с.
3. Федоров Г. Е., Ямшинский М. М., Платонов Е. А., Лютый Р. В. Стальное литье. *Литейное производство.* Киев, ПАО «ВИПОЛ». 2014. 895 с.
4. Фролов К. В. (гл. ред.), Мухин В. В., Беляков А. И., Александров Н. Н. и др. Под общ. ред. О. А. Банных Н. Н. Александрова. Энциклопедия. Т. II-2 Стали, Чугуны. М.: Машиностроение, 2001. 780с. (http://privetstudent.com/referaty/proizvodstvo/42-specialnye-tali.html)
5. Шрамко В. С., Каргинов В. В., Малый А. В. и др. Повышение износостойкости марганцевой стали. *Литейное производство*. Литье и металлургия. 2 (34), 2005, с. 99–103.

Надійшла 29.09.2020

References

1. DSTU 8781-2018. Steel castings. General specifications [in Ukrainian]
2. Gulyaev A. P. (1977) Metallurgy. 3rd revised edition. M. Metallurgy. 646 p. [in Russian]
3. Fedorov G. E., Yamshinsky M. M., Platonov E. A., Lyuty R. V. (2014) Steel casting. Foundry. Kiev, PJSC “VIPOL”, 895 p. [in Russian]
4. Frolov K. V. (chief ed.), Mukhin V. V., Belyakov A. I., Alexandrov N. N. and others. (2001) 3 ed. O. A. Bannykh N. N. Alexandrova. Encyclopedia. T. II-2 Steel, Cast iron. M .: Mechanical Engineering. 780 p. [in Russian] (http:*//privetstudent.com/referaty/proizvodstvo/42-specialnye-tali.html)*
5. Shramko V. S., Karginov V. V., Maly A. V. and others. (2005) Increasing the wear resistance of manganese steel. Foundry. *Casting and metallurgy*, 2 (34), pp. 99–103. [in Russian]

Received 29.09.2020

V. A. Loktionov-Remizovsky, *PhD (Engin.), Leading, Research Scientist*
N.V. Kiryakova, *Chief Technologist,*
G. E. Fedorov, *PhD (Engin.), Senior Research Scientist*
N.N. Gribov, *Chief Technologist*
I. V. Oleksenko, *Research Scientist*

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

OPTIMIZATION OF CARBON AND MAGGANESE CONTENT IN STEEL 110G13L

Topographic projections of the surfaces of ultimate strength and tensile yield strength, and impact toughness of austenitic manganese steels have been constructed. A comparative analysis of the topographic projections of the surfaces of ultimate strength and tensile yield strength, and impact toughness of manganese steels of the austenitic class with the structural diagram of manganese steels is carried out. A comparative analysis of the concentration range of steel 110G13L, with the content of manganese and carbon regulated by the standard of Ukraine, with the structural diagram of manganese steels has been carried out. The analysis of the quality of the metal (structure and properties) in a cast track made of steel 110G13L, on samples cut from the body of a serial track was carried out. It was found that the surfaces of the studied properties of manganese steels are represented by planes with an increase in property values with an increase in manganese content and a decrease in carbon, within the austenitic region of the structural diagram. It has been established that the concentration area of 110G13L steel, with the content of manganese and carbon regulated by the Ukrainian standard, is located on three structural zones of the structural diagram of manganese steels. It was found that dendritic inhomogeneity and microporosity are observed in the track casting. The level of properties determined by tests of samples cut from the track casting is less than the calculated level of the same properties, provided the steel has the same manganese and carbon composition. Casting defects (microporosity and dendritic segregation) cause a decrease in properties on the samples, compared to the calculated level of properties. The average derating factor is 0.65. It is recommended to set the carbon content in 110G13L steel in the Ukrainian standard at the level from 0.95 to 1.25 %.

Keywords*: steel, manganese, carbon, silicon, structure, properties.*