

УДК 542.65:669.15-194

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ФОРМУВАННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТАЛІ 23Г2А

ФЕДОРКОВА Н. М., к. т. н., доц.

Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (050) 482-82-23, e-mail: natfedorkova2014@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1030-9007

Анотація. Постановка проблеми. Викладено результати досліджень хімічного і фазового складу неметалічних включень у литій сталі 23Г2А і механізмів їх утворення після обробки в ковші комплексною технологічною добавкою ДТ1, запропонованою замість феротитану марки ФТі68. **Методика.** У роботі застосували, окрім металографічних досліджень, метод об'ємного виділення, який полягає в тому, що метал піддавали анодному розчиненню в електроліті. Іони і молекули розчиненого металу проходили крізь пори колоїдного мішечка. Тверді частинки осаду неметалічних включень, що не розчинилися, досліджували за допомогою рентгеноструктурного фазового і хімічного аналізів. Осад, отриманий у результаті електрохімічного розчинення сталі 23Г2А, досліджували методом рентгеноструктурного аналізу з метою визначення фазового складу неметалічних включень. Для цього розчин з осадом фільтрували і висушували, відділяли від фільтрувального паперу і досліджували на установці ДРОН-2,0 у випромінюванні хрому і міді. Мікроструктуру сталі 23Г2А, а саме, особливості розподілу неметалічних включень в литій сталі, досліджували методами оптичної мікроскопії. **Результати.** Встановлено, що в сталі, обробленій феротитаном ФТі68, карбіди марганцю Mn_5C_2 , хрому $Cr_{23}C_6$, заліза Fe_3C утворюють складнолегований цементит типу $(Fe, Mn, Cr)_3C$, а в сталі, обробленій добавкою ДТ1, – складнолегований цементит типу $(Fe, Cr)_3C$ і нітрид титану. За допомогою рентгеноструктурного і петрографічного методів доведено, що після обробки добавкою ДТ1 досягнуто істотного підвищення якості сталі порівняно з обробкою феротитаном ФТі68. Установлено зниження загальної кількості кисню, що входив до складу оксидів. Доведено сильнішу розкиснювальну дію добавки ДТ1 порівняно з феротитаном. **Наукова новизна.** Показано, що титан в умовах зародження зерен і впливу на зернову структуру сталі діє як модифікатор I роду, а під час формування структури дендриту і неметалічних включень – як модифікатор II роду. Доведено, що існує інтервал значень вмісту титану (0,019...0,025 %), при якому і кількість неметалічних включень у сталі незначна: $\sim (6...17) \cdot 10^{-3} \%$. При вмісті титану $< 0,019 \%$ кількість неметалічних включень досягає максимуму на кривій, що відповідає $\sim 26 \cdot 10^{-3} \%$. При вмісті титану $> 0,025 \%$ – кількість неметалічних включень – $> 40 \cdot 10^{-3} \%$. **Практична значимість.** Доведено можливість використання відходів дорогих титанових та алюмінієвих сплавів для розкиснення, мікромодифікування та мікролегування низьколегованих сталей з метою зменшення кількості шкідливих неметалічних включень і підвищення якості та властивостей броблюваних осталей.

Ключові слова: неметалева включення; комплексна технологічна добавка; осад; методи оптичної мікроскопії; вміст титану

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ 23Г2А

ФЕДОРКОВА Н. Н., к. т. н., доц.

Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (050) 482-82-23, e-mail: natfedorkova2014@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1030-9007

Аннотация. Постановка проблемы. Изложены результаты исследований химического и фазового состава неметаллических включений и механизмов их образования в литой стали 23Г2А после обработки в ковше комплексной технологической добавкой ДТ1, предложенной вместо ферротитана марки ФТі68. **Методика.** Для решения поставленной задачи в работе применили, кроме металлографических исследований, метод объемного выделения, который заключается в том, что металл подвергали анодному растворению в электролите. Ионы и молекулы растворенного металла проходили сквозь поры коллоидного мешочка. Твердые частицы осадка не растворившихся неметаллических включений исследовали с помощью рентгеноструктурного фазового и химического анализов. Для этого раствор с осадком фильтровали и высушивали, отделяли от фильтровальной бумаги и исследовали на установке ДРОН-2,0 в излучении хрома и меди. Микроструктуру стали 23Г2А, а именно, особенности распределения неметаллических включений в литой стали, исследовали методами оптической микроскопии. **Результаты.** Установлено, что в стали, обработанной ферротитаном ФТі68, карбиды марганца Mn_5C_2 , хрома $Cr_{23}C_6$, железа Fe_3C образуют сложнолегированный цементит типа $(Fe, Mn, Cr)_3C$, а в стали, обработанной добавкой ДТ1, – сложнолегированный цементит типа $(Fe, Cr)_3C$ и нитрид титана. С помощью рентгеноструктурного и петрографического методов доказано, что после обработки добавкой ДТ1 достигнуто существенное повышение качества стали по сравнению с обработкой ферротитаном ФТі68. Установлено снижение общего количества кислорода, который входил в состав оксидов. Доказано более сильное раскисляющее действие добавки ДТ1 сравнительно с ферротитаном. **Научная новизна.** Показано, что титан при зарождении зерен и влиянии на зерненую структуру стали действует как модификатор I рода, а при формировании структуры дендрита и неметаллических включений – как

модифікатор II рода. Доказано, що існує інтервал значень вмісту титану (0,019...0,025 %), при якому кількість неметалічних включень в сталі незначительна: $\sim (6...17) \cdot 10^{-3}$ %. При вмісті титану $< 0,019$ % кількість неметалічних включень досягає максимуму на кривій, що відповідає $\sim 26 \cdot 10^{-3}$ %. При вмісті титану $> 0,025$ % кількість неметалічних включень $> 40 \cdot 10^{-3}$ %. **Практична значимість.** Доказано можливість використання відходів дорогих титанових і алюмінієвих сплавів для раскислення, мікромодифікування і мікролегювання низколегюваних сталей з метою зменшення кількості шкідливих неметалічних включень і підвищення якості і властивостей оброблюваних сталей.

Ключеві слова: неметалічне включення; комплексна технологічна добавка; осадок; методи оптичної мікроскопії; вміст титану

RESEARCH OF THE FORMATION MECHANISMS OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN STEEL 23G2A

FEDORKOVA N.M., *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 482-82-23, e-mail: natfedorkova2014@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1030-9007

Abstract. Formulation of the problem. The article presents the results of studies of chemical and phase composition of nonmetallic inclusions in the cast steel 23G2A and mechanisms of their formation after treatment in the ladle complex processing aids ДТ1 proposed instead ferrotitanium brand ФТi68. **Method.** In the work to solve this problem it was used, except metallographic studies, volume allocation method, which is subjected by the metal anodic dissolution in the electrolyte. Ions and molecules of dissolved metal were whipped through the colloid bag. Solid particles sieged nonmetallic inclusions, which are not dissolved, were investigated by X-ray phase and chemical analyzes. The siege, the resulting electrochemical dissolution of steel 23G2A, investigated by X-ray analysis to determine the phase composition of nonmetallic inclusions. For this, solution with the precipitate was filtered and dried, separated from the filter paper and examined at the facility DRON-2.0 in the emission of chromium and copper. Microstructures of the 23G2A steel, namely, the nonmetallic inclusion distribution features in the cast steel, studied by the methods of optical microscopy. **Results.** It is established that in steel, treated with ferrotitanium ФТi68, carbides manganese Mn_3C_2 , chromium $Cr_{23}C_6$, iron Fe_3C form hard alloyed cement type $(Fe, Mn, Cr)_3C$, and the steel treated additive ДТ1, hard alloyed cement type $(Fe, Cr)_3C$ and titanium nitride. Using of the X-ray diffraction and petrographic methods has proved that after treatment with the addition ДТ1 achieved a significant increase in quality compared to steel processing ferrotitanium ФТi68. It is established, the decrease in the total amount of oxygen that was part of the oxides. It is proved that there is stronger deoxidizing additive effect compared with ДТ1 ferrotitanium. **Scientific innovation.** It is shown, that titanium grains at the origin and impact on the grain steel structure acts as a modifier of I-st kind, and in shaping the structure of dendrites and nonmetallic inclusions – as a modifier of the II-nd kind. It is proved that there is a range of values in titanium content (0.019...0.025 %), and where the number of non-metallic inclusion in steel is insignificant: $\sim (6...17) \cdot 10^{-3}$ %. When the content of titanium < 0.019 % the number of nonmetallic inclusions peaks on the curve corresponding to $\sim 26 \cdot 10^{-3}$ %. When the content of titanium $> 0,025$ % – the number of non-metallic inclusion $> 40 \cdot 10^{-3}$ %. **The practical significance.** It is proved the possibility of using the waste of expensive titanium and aluminum alloys for deoxidation, micro modification microalloying of the low alloy steels to reduce the amount of harmful non-metallic inclusions and improve the quality and properties of steels processed.

Keywords: nonmetallic inclusion; complex processing aid; precipitate; methods of optical microscopy; content of titanium

Вступ

Матеріалом дослідження в цій роботі служили зразки із сталі 23Г2А після позапічної обробки такими розкиснювачами: силікомарганцем, феромарганцем, чушковим алюмінієм, феротитаном ФТi68 за заводською технологією або комплексною технологічною добавкою ДТ1, виготовленою із стружки титанових і алюмінієвих сплавів методом брикетування [4].

Оскільки про розкиснення металу судять за кількістю оксидних, нітридних, сульфідних та інших включень, був детально досліджений характер неметалічних включень після попереднього розкиснювання силікомарганцем і феромарганцем і залишкового – чушковим алюмінієм і титанумісними добавками, тобто феротитаном ФТi68 – за заводською технологією і, в нашому випадку – комплексною технологічною добавкою ДТ1 з

відходів машинобудування – титанової та алюмінієвої стружки.

Розробляючи склад і технологію отримання ДТ1, автори прагнули створити добавку багатофункціонального призначення, тобто не лише розкиснювальної, а й модифікувальної і мікролегувальної дії. Роботу проведено з метою дослідження механізмів утворення неметалічних включень та порівняльної оцінки розкиснювальної здатності титанумісних добавок на якість сталі шляхом отримання загальної характеристики міри забрудненості металу і встановлення фазового і хімічного складів неметалічних включень різними методами.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження фазового складу неметалічних включень, виділених із сталі 23Г2А після обробки добавкою ДТ1 і феротитаном ФТі68, показали таке.

Сталь 23Г2А, оброблена добавкою ДТ1, виявилася добре розкисненою, що підтверджено не лише найнижчим умістом оксиду заліза FeO в металі, а й малою його зміною зі збільшенням вмісту титану (рис. 1).

Сполуки FeO, SiO₂, MnO – це залишки оксидів металів після розкиснювання сталі силікомарганцем і феромарганцем, причому основна частка оксидів доводилася на SiO₂. Підвищення вмісту титану зумовлювало різке зниження кількості SiO₂, а при вмісті титану 0,020...0,024 % в сталі була присутньою приблизно однакова кількість оксидів

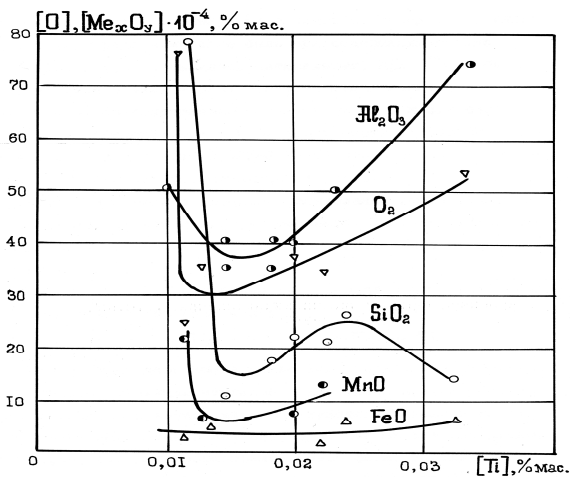


Рис. 1. Вплив титану на вміст оксидів і кисню в сталі 23Г2А після обробки добавкою ДТ1 / Fig. 1. Effect of titanium oxide on the content of oxygen in steel 23Г2А after treatment with additive ДТ1

При вмісті титану нижче і вище цього інтервалу різко збільшувалася кількість оксидних включень. Із зіставлення даних рисунків 1 і 2 випливає, що найвищі значення ударної в'язкості відповідали вмісту алюмінію в межах 0,025...0,03 %, що збіглося з мінімальним значенням оксидів алюмінію на рисунку 1.

Велике значення має і видалення сірки з розплаву. За присутності марганцю в сталі, як правило, формувався твердий розчин сульфиду марганцю з невеликою домішкою сульфідів заліза. В даному випадку становило інтерес дослідити вплив титану й алюмінію, що входять до складу добавок, на вміст сірки в готовій сталі (рис. 3).

Як видно з рисунка 3, характер кривих однаковий. Але максимальне значення вмісту сірки на кривій 1 відповідало 0,02 % титану, а на кривій 2–0,038 % алюмінію. Це ще раз підтвердило, що надлишок

кремнію SiO₂ й алюмінію Al₂O₃, зокрема, для Al₂O₃ це значення – мінімальне на графіку.

Крім того, оцінка впливу алюмінію на ударну в'язкість сталі 23Г2А показала (рис. 2), що при вмісті алюмінію понад 0,027 % на кривій можливий перегин у бік різкого зниження значень ударної в'язкості. Тому за розробленою авторами технологією позапичної обробки сталі кількість чушкового алюмінію понижена з 1 кг/1 т до 0,6...0,8 кг/т сталі. Подальше збільшення вмісту титану в сталі викликало різке зростання кількості Al₂O₃ і додаткове зниження SiO₂, що збільшувало кількість неметалічних включень і знижувало рівень механічних властивостей сталі. Як видно з рисунка 1, мінімальна кількість оксидів, і, отже, і кисню в металі, була при вмісті титану 0,015...0,025 %, і вона була оптимальною.

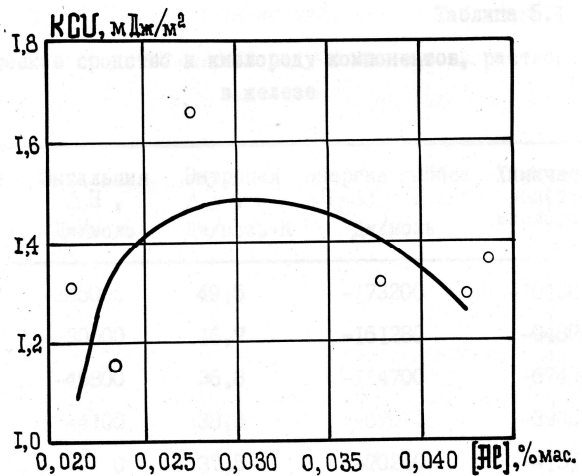


Рис. 2. Вплив алюмінію на ударну в'язкість сталі 23Г2А / Fig. 2. Effect of aluminum on toughness of steel 23Г2А

алюмінію негативно позначався на властивостях сталі.

Про розкиснювальну здатність добавок судять також і за вмістом азоту і його включень у сталі. Так, визначено залежність засвоєння титану від вмісту вуглецю в розплаві до кінця продування. На рисунку 4 показано залежність вмісту кисню і азоту в сталі від кількості вуглецю [2].

Як видно, зі збільшенням вмісту вуглецю зростає і вміст азоту в готовій сталі і, навпаки, знижувалася кількість кисню. Зіставлення даних праці [2] і рисунка 4 показує, що лінії залежностей: [Ti] = 0,0066 + 0,063 [C] [2] і [N] = f(C) (рис. 4), мають аналогічний характер, тобто засвоєння титану відбувається не лише за рахунок утворення складнолегованих і спеціальних карбідів, а й, значною мірою, за рахунок утворення нітриду титану.

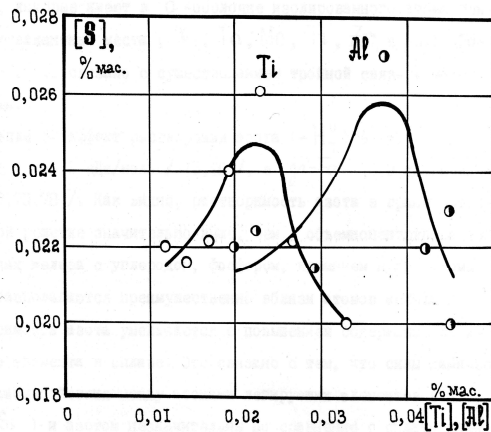


Рис. 3. Вплив титану й алюмінію на вміст сірки в сталі 23Г2А / Fig. 3. Effect of titanium and aluminum on the sulfur content in steel 23G2A

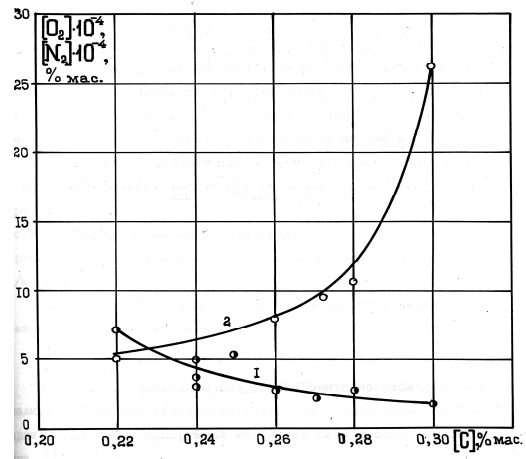


Рис. 4. Залежність вмісту кисню й азоту в сталі 23Г2А від вмісту вуглецю : 1 – O₂ в оксидах; 2 – N₂ в нітридах / Fig. 4. The dependence of oxygen and nitrogen content in the steel 23G2A from carbon content: 1 – O₂ in oxides; 2 – N₂ in nitrides

Вищий вміст нітриду титану в сталі, обробленій ДТ1, пояснюється відмінністю матеріалів, що вводяться. Феротитан – компактний метал, в результаті розплавлення і розчинення якого легуючі елементи засвоюються нерівномірно, і титан не чинить очікуваної дії на сталь. Додаток ДТ1, потрапляючи попаданні в ківш, миттєво розпадається (розплавляється алюмінієва стружка), дисперсні частинки титанової стружки швидко розподіляються по всьому обсягу рідкого металу. Тому, порівняно з феротитаном, додаток має набагато більшу активну поверхню контакту, при цьому титан утворює з рідким залізним розплавом цілий ряд легкоплавких евтектик, що також сприяє його розплавленню і засвоєнню в сталі. Усі перераховані чинники зумовили вищий вміст нітриду титану в сталі, обробленій ДТ1 порівняно з обробкою ФТі68.

У сталі, обробленій ДТ1, виявлені не лише нітрид титану TiN, а і карбіди заліза і хрому Fe₃C і Cr₂₃C₆. Очевидно, карбідна фаза в сталі 23Г2А є складнолегованою карбідною сполукою типу (Fe₃C) – Me_mC_n. У нашому випадку в основі карбідної фази – атоми заліза і хрому, тобто виникала сполука типу (Fe, Cr)_mC_n.

У сталі, обробленій феротитаном ФТі68, нітридні фази виявлені не були, мабуть, через їх невелику кількість. Карбідні ж фази були складними сполуками на основі заліза, марганцю і хрому. Міжплощинні відстані карбідних фаз відповідали сполукам Fe₃C, Mn₅C₂ і Cr₂₃C₂.

Петрографічний аналіз осаду неметалічних включень проводили за допомогою мінералогічного мікроскопа МІН-7 за × 70. При цьому на предметне скло наносили краплю водного розчину з наявними в ньому включеннями. Скло поміщали на предметний столик і вивчали у проникному світлі. В результаті були виявлені такі включення:

- кристали неправильної геометричної форми, ізотропні, безбарвні, займали ~ 5 % від площі досліджуваного поля зору;
- кристали рожевого кольору, прозорі, анізотропні;
- кристали у вигляді призм або голочок – прозорі, безбарвні;
- великі формування бурого кольору, безформні, ізотропні;
- чорні великі включення – безформні, ізотропні.

Для ідентифікації неметалічних включень визначали показники заломлення для знайдених включень за допомогою стандартних імерсійних рідин із величиною показника заломлення $N = 1,403 - 1,9$.

Для цього краплю розчину обережно гріли над полум'ям спиртового пальника до повного висихування води. Потім на осад наносили краплю імерсійної рідини з відомим показником заломлення.

Петрографічний аналіз підтвердив достовірність результатів оксидного і нітридного аналізів осаду неметалічних включень сталі 23Г2А. Очевидно, що неметалічні включення – це прості (SiO₂) і складні сполуки на основі оксидів марганцю, кремнію, алюмінію: галаксит, тефроїт, муліт, геленіт.

Досліджуючи осад, не знаходили включень нітриду титану, який, як відомо, має золотисто-жовтий колір. Деякі включення кольором і формою нагадували оксиди заліза, проте під час визначення показника заломлення це не підтвердилося.

Також виявлено, що всі неметалічні включення в сталі 23Г2А були продуктами розкиснювання розплаву в ковші кремнієм, марганцем, алюмінієм, а також обробки кальцієм.

На рисунку 5 наведено графік залежності загальної кількості неметалічних включень від вмісту титану в сталі, з якого видно, що існує інтервал

значень вмісту титану (0,019...0,025 %), за якого і кількість неметалічних включень у сталі незначна: $\sim (6...17) \cdot 10^{-3} \%$. За вмісту титану $< 0,019 \%$ кількість неметалічних включень досягає максимуму на

кривій, що відповідає $\sim 26 \cdot 10^{-3} \%$. За вмісту титану $> 0,025 \%$ – кількість неметалічних включень – $> 40 \cdot 10^{-3} \%$.



Рис. 5. Вплив титану на кількість неметалічних включень у сталі 23Г2А / Fig. 5. Influence of Titanium on the number of non-metallic inclusions in steel 23Г2А

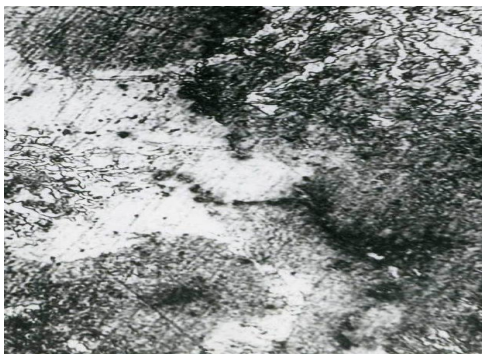
Виходячи з наведених вище даних, було зроблено припущення, що титан з добавки ДТ1 діє як модифікатор одночасно і I, і II роду. Як показали результати мікрорентгеноспектрального зондування, в сталі з 0,036 % титану в твердому розчині був присутній титан у кількості 0,020...0,025 %. Причому ця кількість не збільшувалася і за вмісту титану в сталі 0,042 %, що підтверджує існування межі насичення кристалічної решітки α -Fe-атомами титану.

Маючи низьку розчинність у залізі, титан під час уведення в розплав відтісняється дендритом від фронту кристалізації, його концентрація на фронті кристалізації підвищується до значень, коли стає можливим виникнення евтектики.

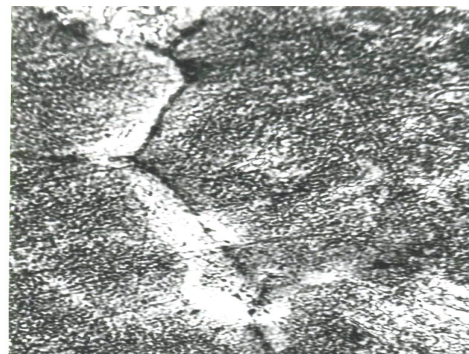
Дендрит виявляється облямованим евтектичним прошарком, збагаченим як титаном, так і алюмінієм,

який відділяє його від розплаву. Прошарок є джерелом зародження оксидів, нітридів, карбонітридів. Він, як гетер на межі з розплавом, селективно абсорбує з нього домішки, до яких має велику спорідненість, при цьому утворюються дрібні включення TiN, AlN, а також сульфідів, розсіяні в міждендритних проміжках і міжгіллях (рис. 6 а, б).

Розплав очищується, ріст дендритів і їх гілок гальмується, різко зменшуються їх розміри і підвищується дисперсність структурних складових. Добавка ДТ1, що складається з дисперсної титанової і алюмінієвої стружки, розчиняючись у сталевому розплаві, частково розріджує його завдяки алюмотермічному ефекту в прилеглих об'ємах і прискорено розчиняється.



а



б (b)

Рис. 6. Виділення рядкових включень у міждендритних областях, $\times 500$ / Fig. 6. Bold lowercase substances in inter-dendritic areas, $\times 500$

У таких умовах перші кристали зароджуються в об'ємі переохолоджених ділянок рідкого металу. Їх кристалізація також супроводжується виділенням тепла, за рахунок цього рідина з підвищеною концентрацією титану й алюмінію відтісняється фронтом кристалізації аустеніту. У цей період між N_2 , розчиненим у сталі, Al, S, C і Ti розвивається активна взаємодія, в результаті якої утворюються нітриди, карбіди, сульфідні на основі титану й алюмінію (рис. 7).

Оболонка з легкоплавкої евтектики Ti – Al – Fe здійснює бар'єрний і гетерний ефект на ріст дендриту і очищення розплаву від домішок. У даному випадку

титан виступає як модифікатор першого роду. Титан з C, N_2 , O_2 , S утворює тугоплавкі сполуки з температурами плавлення: TiN – 3 000 °C, TiC – 3 140 °C, AlN – 2 200...2 550 °C. Вони виділяються в рідких прошарках, створюючи додаткові перешкоди для росту аустенітного дендриту чисто механічно і, залишаючись у міжгіллях, гальмують також їх ріст.

При цьому структура дендриту стає високодисперсною у разі його евтектоїдного розпаду, і ця спадковість структури передається перліту, внаслідок чого він формується як тонкодиференційований.

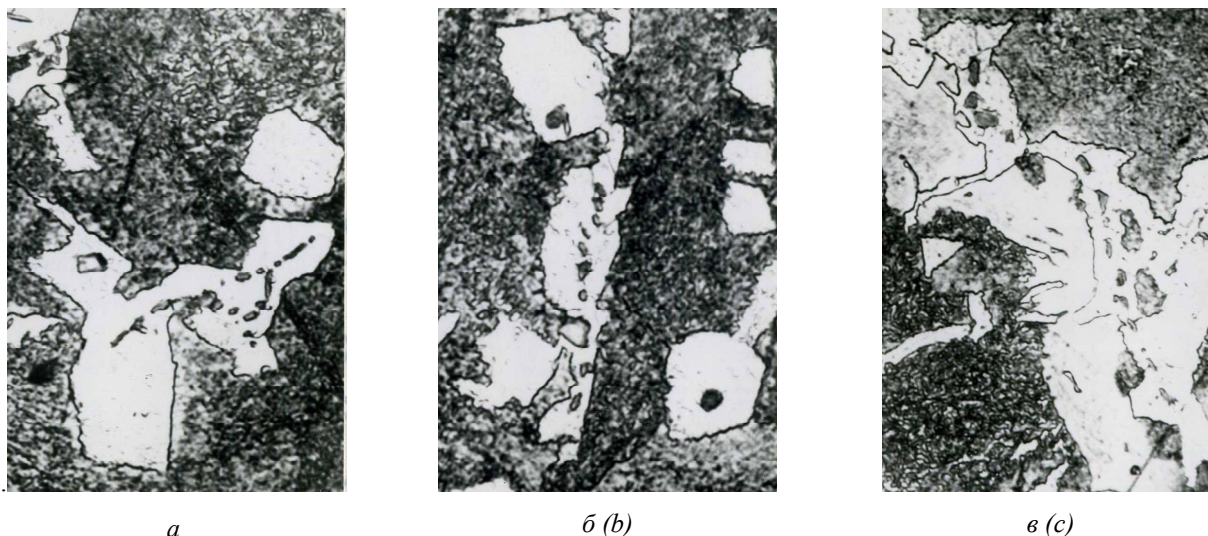


Рис. 7. Розподіл нітридів титану й алюмінію в сталі 23Г2А, $\times 1\ 000$ /
Fig. 7. Distribution of titanium nitrides and aluminum in steel 23H2A, $\times 1\ 000$

Висновки

Рентгеноструктурним методом виявлено, що в сталі, обробленій феротитаном ФТі68, карбіди марганцю Mn_3C_2 , хрому $Cr_{23}C_6$, заліза Fe_3C утворюють складнолегований цементит типу $(Fe, Mn, Cr)_3C$, а в сталі, обробленій добавкою ДТ1, складнолегований цементит типу $(Fe, Cr)_3C$ і нітрид титану.

За допомогою рентгеноструктурного і петрографічного методів доведено, що після обробки

сталі добавкою ДТ1 досягнуте істотне підвищення якості сталі порівняно з обробкою феротитаном ФТі68. Установлено зниження загальної кількості кисню, що входить до складу оксидів. Доведено сильнішу розкиснювальну дію добавки ДТ1 порівняно з феротитаном.

Показано, що титан під час зародження зерен і впливу на зернову структуру сталі діє як модифікатор I роду, а під час формування структури дендриту і неметалічних включень – як модифікатор II роду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. АС № 1772173, заявка № 4913538. Способ раскисления и легирования низкоуглеродистой стали / С. В. Бобырь, О. М. Шаповалова, Н. Н. Федоркова и др. – Зарегистрировано 01.07.1992.
2. Федоркова Н. Н. Исследование химического состава и механических свойств стали 23Г2А после внепечной обработки различными титаносодержащими добавками / Н. Н. Федоркова. – МТОМ. – 2009. – № 3. – С. 38–47.
3. Федоркова Н. Н. Влияние микродобавок титана на процессы структурообразования в литой стали 23Г2А после внепечной обработки различными титаносодержащими добавками / Н. Н. Федоркова. – МТОМ. – 2010. – №1 (48). – С. 30–36.
4. Федоркова Н. Н. Влияние микродобавок титана на тонкую структуру горячекатаной стали 23Г2А после внепечной обработки различными титаносодержащими добавками / Н. Н. Федоркова. – МТОМ. – 2011. – № 1–2. – С. 271–277.
5. Улучшение свойств титановых сплавов и сталей и проблема использования титановых отходов : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук / Н. Н. Федоркова – Днепропетровск : ДГУ, 1982. – 220 с.
6. Федоркова Н. Н. Исследование структуры и свойств катанки из стали 23Г2А после внепечной обработки различными титаносодержащими добавками / Н. Н. Федоркова. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 7. – С. 268–271.

REFERENCES

1. Bobyr S.V., Shapovalova O.M., Fedorkova N.N. and others. *Sposob raskisleniya i legirovaniya nizkouglerodistoj stali* [Method of deoxidation and alloying of low-carbon steel]. AC no. 1772173. Application no. 4913538. Registered 01.07.1992. (in Russian)
2. Fedorkova N.N. *Issledovanie himicheskogo sostava i mehanicheskikh svojstv stali 23G2A posle vnepechnoj obrabotki razlichnymi titansoderzhaschimi dobavkami* [The study of chemical composition and mechanical properties of steel 23Г2А after ladle treatment by various titanium-containing additives]. *MTOM* [MSTTP]. 2009, no. 3, pp. 38–47. (in Russian)
3. Fedorkova N.N. *Vliyanie mikroobavok titana na processy strukturoobrazovaniya v litoj stali 23G2A posle vnepechnoj obrabotki razlichnymi titansoderzhaschimi dobavkami* [Influence of Titanium microadditives on the processes of structure formation in the casted steel 23Г2А after ladle treatment by various titanium-containing additives]. *MTOM* [MSTTP]. 2010, no. 1 (48), pp. 30–36. (in Russian)
4. Fedorkova N.N. *Vliyanie mikroobavok titana na tonkayu strukturu goryachekatanoj stali 23G2A posle vnepechnoj obrabotki razlichnymi titansoderzhaschimi dobavkami* [Influence of Titanium microadditives on the fine structure of the hot-rolled steel 23Г2А after ladle treatment by various titanium-containing additives]. *MTOM* [MSTTP]. 2011, no. 1–2, pp. 271–277. (in Russian)
5. Fedorkova N.N. *Uluchshenie svojstv titanovykh splavov i stalej i problema ispol'zovaniya titanovykh othodov* [Improving the properties of titanium alloys and steels, and the problem of using titanium scrap] : the dissertation on competition of a scientific degree cand. tech. Sciences. Dnipropetrovsk State University, Dnipropetrovsk, 1982, 220 p. (in Russian)
6. Fedorkova N.N. *Issledovanie struktury i svojstv katanki iz stali 23G2A posle vnepechnoj obrabotki razlichnymi titansoderzhaschimi dobavkami* [Investigation of structure and properties of steel 23Г2А wire rod after ladle treatment by various titanium-containing additives]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2012, no. 7, pp. 268–271. (in Russian)

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Т. М. Мироною (Україна), д-ром техн. наук, проф. Н. С. Калініною (Україна).

Надійшла до редколегії 07.04.2017

Прийнята до друку 12.04.2017