

АНОТАЦІЯ

Камкін В.Ю. Розробка наскрізної технології виробництва низьковуглецевої сталі для виготовлення високоякісного тонколистового прокату. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії PhD за спеціальністю 136 – «Металургія». – Український державний університет науки і технологій. Дніпро, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено розробленню енергозберігаючої наскрізної технології виплавки, позапічної обробки та пластичної деформації ультранизьковуглецевої сталі для особливо тонкого листового прокату з підвищеними властивостями (вміст вуглецю менше 0,005%) мікролегованої алюмінієм, з мінімальним вмістом шкідливих домішок ($P < 0,010\%$; $S < 0,005\%$; $N < 50\text{ppm}$; $O < 30\text{ppm}$; $H < 2\text{ppm}$) у гарячекатаному стані з наступною інтенсивною пластичною деформацією.

В роботі проведено аналітичний огляд технологій одержання низьковуглецевої електросталі, за результатами якого було визначено об'єкт та предмет дослідження. Показано, практично всі IF- стали виплавляють в конвертерах з комбінованою продувкою киснем і аргоном, процес плавки якої має свої переваги та недоліки. Удосконалення технології здійснюється за рахунок розширення застосування обробки чавуну в ковшах з метою знесірчення. Значна увага приділяється підвищенню стійкості футерівки та використання ефективних систем відсічки шлаку при зливів чавуну з конвертера. Одержало подальший розвиток та збільшення функцій позапічної обробки сталі, в тому числі застосування вакуумування.

У електропечі можна отримувати леговану сталь з низьким вмістом сірки і фосфору, неметалевих включень, при цьому втрати легуючих елементів значно менші, ніж в киснево-конвертерному процесі. При електроплавці можна точно регулювати температуру металу і його склад, виплавляти сплави майже будь-якого складу. Застосування тонкого листа з низьковуглецевих сталей в автомобілебудуванні забезпечує необхідну пластичність при формуванні деталей складної конфігурації та зменшує витрати матеріалів на виготовлення шляхом зменшення товщини листа, що в свою чергу зменшує вагу автомобіля. Найбільш придатними для досягнення вказаних цілей є IF сталі, які повинні мати відповідний хімічний склад та необхідні високу міцність та пластичність. Для їх досягнення необхідно поєднання технології виплавки, позапічної обробки та застосування інтенсивної пластичної деформації з отриманням дрібнодисперсної структури.

Об'єкт дослідження – технологія виробництва, позапічної обробки та застосування інтенсивної пластичної деформації низьковуглецевої сталі для виготовлення високоякісного тонколистового прокату.

Предмет дослідження - закономірності взаємодії компонентів в рідкому стані та вплив на окисленість металу, зниження вмісту розчинених газів та показники вакуум вуглецевого розкислення, характеристики нітридоутворення на характеристики міцності низьковуглецевої сталі.

Мета роботи – розроблення енергозберігаючої технології виплавки, позапічної обробки та встановлення закономірностей впливу деформаційних режимів прокатки та інтенсивної пластичної деформації на формування властивостей, структуроутворення тонколистового прокату.

Методи дослідження - теоретичні дослідження процесів при виплавці, позапічній обробці та вакуумуванні сталі базуються на основних положеннях фізичної хімії і теорії металургійних процесів; розрахунки термодинамічної рівноваги металургійних систем основані на теорії Гіббса; використаний метод математичної статистики для обробки результатів досліджень; використані стандартні методи хімічного аналізу складу металу і шлаку; контроль енергетичних параметрів і температурних режимів плавки здійснювався за допомогою повірених приладів; вимірювання нанотвердості проводили за допомогою наноіндентора «Nanoindenter G200» виробництва США з використанням алмазної трьохгранної пірамідки Берковича; інтенсивну пластичну деформацію здійснювали методом кручення під гідростатичним тиском на установці типу наковалень Бріджмена в лабораторії кафедри ОМТ УДУНТ; металографічний аналіз неметалічних включень виконано в сертифікованій лабораторії УДУНТ з використанням оптичного мікроскопа Neofot-1.

Обґрунтовано результатами термодинамічних розрахунків та підтверджено експериментальними дослідженнями, що для зниження вмісту вуглецю в сталі до заданої величини, окислення вуглецю з феросплавів та вуглецю з електродів при нагріві металу на печі-ковші активність кисню у напівпродукті з ДСП має бути достатньою для проведення даних реакцій та складатиме 1100 ppm, а вміст вуглецю на випуску має бути низьким (0.03-0.048%), з температурою на рівні 1600°C

На основі результатів математичного моделювання на розробленій на кафедрі ТМП математичній моделі дегазації металу в ківшах з продувкою аргоном з урахуванням розподілу газів з металу за трьома статтями – у бульбашки CO, у бульбашки аргону та через відкриту поверхню металу, встановлено зовнішнє лімітування (V_{iD} менше 0.2), реакція видалення кисню далека від рівноваги. У всіх варіантах зміни технологічних параметрів спостерігається блокування значної частини поверхні розділу метал – газова фаза потоком кисню, що пов'язано з тим, що потоки кисню по масі приблизно на порядок вищі за потоки водню. При зміні технологічних параметрів відбувається процес саморегулювання перерозподілу потоків водню і кисню за рахунок значного відхилення реакції утворення CO від рівноваги.

Встановлено закономірності впливу титану на зменшення дії азоту у сталях на появу дефектів металу, пов'язаних з виділенням нітридів алюмінію по границях первинних зерен, що визначається різною термодинамічною спорідненістю титану і алюмінію до азоту. На основі аналізу експериментальних даних одержано аналітичний вираз, який встановлює необхідну кількість присадок титану для нейтралізації шкідливого впливу азоту і враховує концентрацію алюмінію в сталі для попередження формування шкідливих нітридів алюмінію. При вмісті в сталі титану вище

запропонованого вказаною залежністю, спостерігається поява дефектів, пов'язаних вже з нітридами титану, а менша кількість є недостатньою для досягнення зазначеного технічного результату, тому що спостерігається утворення нітридів алюмінію.

Вперше використано методику фізико-хімічного моделювання, яка розроблена в ІЧМ НАНУ, для визначення оптимального складу низьковуглецевої сталі та встановлені інтегральні параметри, які характеризують стан сплаву і обумовлюють зміну властивостей у встановленому концентраційному інтервалі модифікуючих елементів, та показують, що при встановлених режимах деформаційної обробки дослідних зразків сталі досягаються показники механічних властивостей та структури прокатаних зразків, які відповідають характеристикам низьковуглецевої сталі: межа міцності 354...362 МПа, відносне звуження склало 84-85%, а відносне подовження, %: σ_5 в межах 42-44, δ_{10} становило 33-36. Механічні властивості за діаграмою «межа міцності – загальне подовження» для листових сталей показує, що вони відповідають рівню, властивому високо пластичним IF-сталям, як по отриманому складу, так і за властивостями.

Нові науково обґрунтовані теоретичні та / або експериментальні результати проведених здобувачем досліджень, що мають істотне значення для певної галузі знань та підтверджуються документами, які засвідчують проведення таких досліджень.

Теоретичне та практичне значення результатів дослідження

На основі фізико-хімічного обґрунтування та розробленні технологічних режимів виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями здійснена виплавка нової ультранизьковуглецевої (вміст 0,002–0,005% вуглецю), мікролегованої алюмінієм сталі, з мінімальним вмістом шкідливих домішок ($P < 0,010\%$; $S < 0,005\%$; $N < 50 \text{ppm}$; $O < 30 \text{ppm}$; $H < 2 \text{ppm}$). Виявлено особливості формування тонкої структури, формування текстури низьковуглецевої електросталі при низьких температурах (нижче Ar1) закінчення прокатки та змотки. Встановлені закономірності впливу процесів рекристалізації, формування текстури на розмір зерна в структурі листової сталі та виявлені зв'язки між текстурою, мікроструктурою та механічними властивостями тонколистової сталі.

Новизна технічних рішень захищена 2 патентами на винахід “Спосіб двоетапної позапічної обробки низьковуглецевої сталі” (№ 122000 від 25.08.2020 р.); “Спосіб виробництва легованої низьковуглецевої сталі в конвертерах з боковим підведенням дуття” (№ 122507 від 26.11.2020 р). Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в рамках виконання науково-дослідницьких робіт та впроваджені в навчальний процес Українського державного університету науки і технологій при підготовці магістрів за спеціальністю 136-Металургія (ОНП “Дослідження процесів та розробка технологій в металургії”.

Практичне значення роботи

Проведені дослідження дозволили отримати відомості щодо величини активності кисню у напівпродукті з ДСП достатньої для проведення реакцій окислення вуглецю до заданої величини, окислення вуглецю з феросплавів та вуглецю з електродів при нагріві металу на печі ковші. Показано, що активність кисню у напівпродукті з ДСП має бути достатньою для проведення даних реакцій та складатиме 1100 ppm, а вміст вуглецю на випуску має бути низьким (0.03-0.048%), з температурою на рівні 1600°C

Встановлені закономірності дегазації металу в ківшах з продувкою аргоном з урахуванням розподілу газів з металу за трьома статтями – у бульбашки CO, у бульбашки аргону та через відкриту поверхню металу, та встановлено зовнішнє лімітування реакцій дегазації, що потребує застосування продувки металу нейтральним газом.

Отримані дані щодо впливу титану на зменшення дії азоту у сталях на появу дефектів металу, пов'язаних з виділенням нітридів алюмінію по границях первинних зерен, що визначається різною термодинамічною спорідненістю титану і алюмінію до азоту. Одержано аналітичний вираз, який встановлює необхідну кількість присадок титану для нейтралізації шкідливого впливу азоту і враховує концентрацію алюмінію в сталі. При вмісті в сталі титану вище запропонованого вказаною залежністю, спостерігається поява дефектів, пов'язаних вже з нітридами титану, а менша кількість є недостатньою для досягнення зазначеного технічного результату, тому що спостерігається утворення нітридів алюмінію.

Розрахункові дані на основі фізико-хімічного моделювання дозволяють здійснити вибір концентрації елементів для сталей типу 01ЮТА, 01ЮТ в діапазоні: С (0,002...0,003%), Mn (0,12...0,13%), Si (0,01...0,02%), P (0,006...0,008%), S (0,011...0,012%), Al (0,04...0,05%), Ti (0,05...0,06%), N (0,004...0,005%), Ca (0,0002...0,0003%). Концентраційний інтервал елементів, встановлений за розрахунковими даними, може забезпечувати оптимальний комплекс властивостей сталей. Розрахункові концентраційні інтервали елементів підтверджені експериментально і будуть використані при встановленні оптимального складу ультра низьковуглецевих сталей.

Отримані дані дають змогу: підвищити техніко-економічні показники виплавки низьковуглецевої електросталі, зменшити витрату розкислювачів та підвищити якість електросталі за рахунок зменшення кількості розчинених газів та неметалевих включень.

Ключові слова: СТАЛЬ, ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ, ТЕХНОЛОГІЯ, ГІДРОДИНАМІКА РІДКОЇ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ, ТЕМПЕРАТУРА НА ВИПУСКУ, ФЕРОСПЛАВИ, МІКРОЛЕГУВАННЯ, НЕМЕТАЛЕВІ ВКЛЮЧЕННЯ, ХІМІЧНИЙ СКЛАД, ТЕРМОДИНАМІКА, МОДЕЛЮВАННЯ, ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПАРАМЕТРИ МІЖАТОМНОЇ ВЗАЄМОДІЇ, МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СТРУКТУРА.

ABSTRACT

Kamkin V.Yu. Development of a through-through technology for the production of low-carbon steel for the production of high-quality thin-sheet rolled products. –Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy PhD in specialty 136 - "Metallurgy". - Ukrainian State University of Science and Technology. – Dnipro, 2024.

The dissertation is devoted to the development of an energy-saving end-to-end technology of melting and plastic deformation of ultra-low-carbon steel for especially thin rolled sheets with increased properties (carbon content less than 0.005%) microalloyed with aluminum, with a minimum content of harmful impurities ($P < 0.010\%$; $S < 0.005\%$; $N < 50\text{ppm}$; $O < 30\text{ppm}$; $H < 2\text{ppm}$) in the hot-rolled state with subsequent intense plastic deformation.

In the work, an analytical review of low-carbon electrical steel production technologies was conducted, based on the results of which the object and subject of the research was determined. It is shown that almost all IF steels are melted in converters with combined oxygen and argon blowing, the melting process of which has its advantages and disadvantages. The improvement of the technology is carried out due to the expansion of the application of processing cast iron in ladles for the purpose of desulfurization. Considerable attention is paid to increasing the stability of the lining and the use of effective slag cut-off systems when draining pig iron from the converter. Received further development and increase in the functions of non-baking steel processing, including the use of vacuuming.

In an electric furnace, it is possible to obtain alloyed steel with a low content of sulfur and phosphorus, non-metallic inclusions, while the loss of alloying elements is much smaller than in the oxygen-converter process. With electric melting, it is possible to accurately regulate the temperature of the metal and its composition, to melt alloys of almost any composition. The use of a thin sheet of low-carbon steel in the automotive industry provides the necessary plasticity when forming parts of a complex configuration and reduces the cost of materials for production by reducing the thickness of the sheet, which in turn reduces the weight of the car. The most suitable for achieving these goals are IF steels, which must have the appropriate chemical composition and require high strength and plasticity. To achieve them, a combination of smelting technology, out-of-fire processing, and the use of intensive plastic deformation to obtain a finely dispersed structure is necessary.

The object of the research is the technology of production, out-of-furnace processing and application of intensive plastic deformation of low-carbon steel for the production of high-quality thin-sheet rolled products.

The subject of the research is the regularities of the interaction of components in the liquid state and the influence on metal oxidation, reduction of dissolved gas content and indicators of vacuum carbon deoxidation, characteristics of nitride formation on the strength characteristics of low-carbon steel.

The purpose of the work is to develop an energy-saving technology of melting, out-of-furnace processing and establish the regularities of the influence of rolling deformation modes and intensive plastic deformation on the formation of properties, structure formation of thin-sheet rolled products.

Research methods - theoretical studies of processes during melting, out-of-furnace processing and vacuuming of steel are based on the basic principles of physical chemistry and the theory of metallurgical processes; calculations of thermodynamic equilibrium of metallurgical systems are based on the Gibbs theory; the method of mathematical statistics is used to process the research results; standard methods of chemical analysis of the composition of metal and slag are used; control of energy parameters and melting temperature regimes was carried out using certified instruments; nanohardness measurements were carried out using a nanoindenter "Nanoindenter G200" manufactured in the USA using a diamond trihedral Berkovich pyramid; intensive plastic deformation was carried out by torsion under hydrostatic pressure on a Bridgman anvil type installation in the laboratory of the Department of OMT UDUNT; metallographic analysis of non-metallic inclusions was carried out in a certified UDUNT laboratory using a Neophot-1 optical microscope.

It is substantiated by the results of thermodynamic calculations and confirmed by experimental studies that in order to reduce the carbon content in steel to a given value, to oxidize carbon from ferroalloys and carbon from electrodes during heating of metal in a "furnace - ladle", the activity of oxygen in the chipboard semi-product must be sufficient to carry out these reactions and will be 1100 ppm, and the carbon content at the outlet should be low (0.03-0.048%), with a temperature of 1600°C

Based on the results of mathematical modeling on the mathematical model of metal degassing in ladles with argon purging developed at the TMP department, taking into account the distribution of gases from metal according to three articles - in CO bubbles, in argon bubbles and through the open surface of the metal, an external limitation was established (B_{ID} less than 0.2), the oxygen removal reaction is far from equilibrium. In all options for changing the technological parameters, a significant part of the interface between the metal and the gas phase is blocked by the flow of oxygen, which is due to the fact that the flow of oxygen by mass is about an order of magnitude higher than the flow of hydrogen. When the technological parameters are changed, the process of self-regulation of the redistribution of hydrogen and oxygen flows occurs due to a significant deviation of the CO formation reaction from equilibrium.

The regularities of the effect of titanium on reducing the effect of nitrogen in steels on the appearance of metal defects associated with the release of aluminum nitrides along the boundaries of primary grains, which is determined by the different thermodynamic affinity of titanium and aluminum to nitrogen, have been established. Based on the analysis of experimental data, an analytical expression was obtained that establishes the required amount of titanium additives to neutralize the harmful effects of nitrogen and takes into account the concentration of aluminum in

steel to prevent the formation of harmful aluminum nitrides. When the content of titanium in the steel is higher than that suggested by the specified dependence, the appearance of defects associated with titanium nitrides is observed, and a smaller amount is insufficient to achieve the specified technical result, because the formation of aluminum nitrides is observed.

For the first time, the physic-chemical modeling technique, which was developed at the Institute of Chemical Engineering of the National Academy of Sciences, was used to determine the optimal composition of low-carbon steel, and integral parameters were established that characterize the state of the alloy and determine the change in properties in the established concentration interval of the modifying elements, and show that with the established modes of deformation treatment of the experimental of steel samples, the indicators of mechanical properties and structure of rolled samples are achieved, which correspond to the characteristics of low-carbon steel: strength limit 354...362 MPa, relative narrowing was 84-85%, and relative elongation, %: σ_5 within 42-44, δ_{10} was 33-36 . Mechanical properties according to the "strength limit - total elongation" diagram for sheet steels shows that they correspond to the level characteristic of highly ductile IF-steels, both in terms of composition and properties.

New scientifically based theoretical and/or experimental results of studies carried out by the applicant, which are of significant importance for a certain field of knowledge and are confirmed by documents certifying the conduct of such studies.

Theoretical and practical significance of research results

On the basis of physic-chemical justification and the development of technological regimes of smelting and out-of-furnace processing of low-carbon electrical steel for thin-rolled steel sheets with increased mechanical properties, the smelting of a new ultra-low-carbon (0.002-0.005% carbon), microalloyed steel with aluminum, with a minimum content of harmful impurities ($P < 0.010\%$; $S < 0.005\%$; $N < 50\text{ppm}$; $H < 2\text{ppm}$). The peculiarities of the formation of a fine structure, the formation of the texture of low-carbon electrical steel at low temperatures (below A_{r1}) at the end of rolling and coiling have been revealed. The regularities of the influence of recrystallization processes, texture formation on grain size in the structure of sheet steel are established, and the relationships between texture, microstructure and mechanical properties of thin sheet steel are revealed.

The novelty of technical solutions is protected by 2 patents for the invention "Method of two-stage out-of-furnace processing of low-carbon steel" (№ 122000 dated 08/25/2020); "Method of production of alloyed low-carbon steel in converters with side blowing supply" (№ 122507 dated November 26, 2020). The results of the dissertation work can be used in the framework of scientific research and implemented in the educational process of the Ukrainian State University of Science and Technology in the preparation of masters in the specialty 136-Metallurgy (ONP "Research of processes and development of technologies in metallurgy").

Practical meaning of work

The conducted research made it possible to obtain information on the amount of oxygen activity in the chipboard semi-product sufficient to carry out carbon

oxidation reactions to a given value, carbon oxidation from ferroalloys and carbon from electrodes when heating metal in a ladle furnace. It is shown that the activity of oxygen in the chipboard semi-product should be sufficient to carry out these reactions and be 1100 ppm, and the carbon content at the outlet should be low (0.03-0.048%), with a temperature of 1600°C

The laws of metal degassing in ladles with argon purging have been established, taking into account the distribution of gases from the metal according to three categories - in CO bubbles, in argon bubbles and through the open surface of the metal, and the external limitation of degassing reactions has been established, which requires the use of metal purging with a neutral gas.

Obtained data on the influence of titanium on the reduction of the effect of nitrogen in steels on the appearance of metal defects associated with the release of aluminum nitrides along the boundaries of primary grains, which is determined by the different thermodynamic affinity of titanium and aluminum to nitrogen. An analytical expression was obtained that establishes the necessary amount of titanium additives to neutralize the harmful effect of nitrogen and takes into account the concentration of aluminum in steel. When the content of titanium in the steel is higher than that suggested by the specified dependence, the appearance of defects associated with titanium nitrides is observed, and a smaller amount is insufficient to achieve the specified technical result, because the formation of aluminum nitrides is observed.

Calculated data based on physico-chemical modeling allow selection of element concentrations for steels of type 01IOTA, 01IOT in the range: C (0.002...0.003%), Mn (0.12-0.13%), Si (0.01-0, 02%), P (0.006-0.008%), S (0.011-0.012%), Al (0.04-0.05%), Ti (0.05-0.06%), N (0.004-0.005%), Ca (0.0002-0.0003%). The concentration interval of the elements, established according to the calculated data, should provide an optimal set of steel properties. The estimated concentration intervals of the elements have been confirmed experimentally and will be used when establishing the optimal composition of ultra-low-carbon steels.

The obtained data make it possible to: increase the technical and economic indicators of low-carbon electrical steel smelting, reduce the consumption of deoxidizers, and improve the quality of electrical steel by reducing the amount of dissolved gases and non-metallic inclusions.

Keywords: STEEL, ELECTRIC ARC FURNACE, TECHNOLOGY, HYDRODYNAMICS OF THE LIQUID METAL BATH, OUTLET TEMPERATURE, FERROALLOYS, MICROALLOYING, NON-METALLIC INCLUSIONS, CHEMICAL COMPOSITION, THERMODYNAMICS, MODELING, PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES, INTERATOMIC INTERACTION PARAMETERS, MECHANICAL CHARACTERISTICS, STRUCTURE.

