

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, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено розробленню енергозберігаючої наскрізної технології виплавки, позапічної обробки та пластичної деформації ультранизковуглецевої 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.

За результатами проведеного патентного пошуку та аналізу наукової літератури включно зі статтями у наукових фахових виданнях, матеріалами конференцій, патентів, монографій та інших наукових видань, визначено актуальність теми, яка полягала у фізико-хімічному обґрунтуванні та розробленні технологічних режимів виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями. На підставі визначеної актуальності було сформульовано мету, завдання та методи дослідження.

На цей час IF- сталі виплавляють в конвертерах з комбінованою продувкою киснем і аргоном, процес плавки якої має свої переваги та недоліки. 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. Предметом дослідження в роботі є закономірності взаємодії компонентів в рідкому стані та вплив на окисленість металу, зниження вмісту розчинених газів та показники вакуум вуглецевого розкислення, нітридоутворення та його вплив характеристики міцності низьковуглецевої сталі.

Застосовані *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; інтенсивну пластичну деформацію здійснювали в лабораторних умовах УДУНТ; металографічний аналіз неметалічних включень виконано в сертифікованій лабораторії УДУНТ з використанням оптичного мікроскопа Neofot-1.

На основі результатів визначення впливу технологічних параметрів виплавки і позапічної обробки сталі на властивості готового металу встановлено залежності властивостей металу на випуску від технологічних параметрів процесу в умовах діючого виробництва. Зниження витрати кисню сприяло збільшенню виходу придатного, що пов'язано зі зменшенням окислення заліза у розплаві та скороченням втрат металу у вигляді закису заліза. Збільшення тривалості плавки обумовлено зі зниженням частки альтернативної енергії, яка вноситься в основному киснем та її заміною на електроенергію, внесення якої потребує додаткового часу. Як показали розрахунки використання в технологічному процесі 1 м³/т кисню забезпечує заміну 4,2 кВт·год/т електроенергії. Було проаналізовано вплив вхідних факторів (вміст вуглецю та окисленість металу на виході) на зневуглецювання металу на ковші-печі, а також на угар елементів розкислювачів і ступінь десульфурзації металу під час вторинної обробки. Вміст вуглецю та активного кисню в металі перед установкою ківш-піч суттєво впливає на угар розкислювачів. Встановлено, що зі збільшенням вмісту вуглецю на випуску зростає угар вуглецю на УКП (з урахуванням вуглецю, внесеного розкислювачами) (рис. 3.4). Як показано на рисунку 3.5, окислюваність металу, який подається на УКП, сприяє зменшенню вмісту вуглецю при вторинній обробці. Для визначення ступеня впливу технологічних параметрів на характеристики отриманого в ЕДП напівпродукту і отримання залежностей, що описують зв'язок між ними, проведено регресійний аналіз.

Вперше на основі результатів термодинамічних розрахунків встановлена та підтверджена експериментальними дослідженнями величина активності кисню у напівпродукті з ДСП, яка забезпечує зниження вмісту вуглецю до заданої величини, його окислення з розкислювачів і електродів при нагріві металу на печі ковші, має бути високою та складати для умов даного виробництва 1120...1600 ppm, що є достатнім для протікання даних процесів і забезпечує вміст вуглецю на випуску (0.03-0.048%), з температурою металу на рівні 1650...1700°C. Одержано аналітичний вираз для визначення вмісту вуглецю в металі на випуску з ДСП. За таких умов досягається висока ефективність процесу позапічної обробки металу з ДСП. У випадках переокисленості металу на випуску та збереження розкислювачів

необхідно провести зняття переокисленості, для чого перед присадкою розкислювачів потребується введення певної кількості алюмінію, яка включає величини угару алюмінію та зберігає здатність металу до саморозкислення вуглецем при вакуумуванні.

Наближення реакцій дегазації до рівноваги оцінювали проведенням моделювання на математичній моделі при варіюванні факторів, що впливають на процес. Набули подальшого розвитку закономірності дегазації металу в ківшах з продувкою аргоном, які встановлені на основі результатів математичного моделювання на розробленій на кафедрі теорії металургійних процесів математичній моделі, в якій масообмін між розчиненими в металі газами ($[H]$, $[N]$, $[O]$) і бульбашками аргону визначався наближенням системи до рівноваги, а розподіл газів з металу відбувався за трьома статтями – у бульбашки CO , у бульбашки аргону та через відкриту поверхню металу при зовнішньому лімітуванні процесу та значному відхиленні реакції видалення кисню від рівноваги. При зміні технологічних параметрів відбувається блокування значної частини поверхні розділу метал – газова фаза збільшеним потоком кисню у порівнянні з потоком водню, перемішування розплаву в ковші інертним газом сприяє зародженню продуктів реакції окислення вуглецю.

Застосовано фізико-хімічне обґрунтування та обґрунтовано вибір раціональної технології виплавки низьковуглецевої сталі, позапічної обробки та формування структури при прокатці. В ході позапічної обробки сталі випробували пряму схему: ЕДП - УКП - VD - МБЛЗ; зворотну схему: ЕДП - VD - УКП - МБЛЗ і без вакуумування. Пряма схема вирішує традиційну задачу видалення газів, а зворотна може дозволити максимально видалити кисень з рідкої сталі вуглець-вакуумним розкисленням і зменшити кількість феросплавів розкислювачів, і, відповідно, неметалевих включень. У всіх випадках, технологія обробки на УКП передбачала продувку аргоном з витратою 0,2 - 0,5 м³/хв (при тиску 3 - 5 бар) з мінімальним оголенням дзеркала розплаву (продувочна пляма не більше 0,5 м в діаметрі).

Розглянуто закономірності зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів. Розширено уявлення щодо механізму впливу вмісту азоту на утворення нітридів титану та алюмінію. 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 обумовлюється переважаючою термодинамічною спорідненістю титану до азоту у порівнянні з алюмінієм. На основі аналізу експериментальних даних одержано аналітичний вираз, який визначає ефективний вміст титану для попереднього зв'язування азоту у нітрид титану та попереджає формування шкідливих нітридів алюмінію, утворення яких відбувається за рахунок азоту з нітридів титану. При вмісті в сталі титану вище запропонованого вказаною залежністю, спостерігається поява дефектів, пов'язаних з нітридами титану, а менша кількість титану є недостатньою для досягнення зазначеного технічного результату.

На підставі аналізу результатів дослідних плавок для отримання низьковуглецевих сталей можливо застосування зворотної схеми позапічної обробки (ЕДП-2-VD-УКП-МБЛЗ), як найбільш гнучкою в технологічному відношенні. Одержання особливо низького вмісту вуглецю в металі здійснили за рахунок використання реакції вакуумного зневуглецювання металу без додаткового введення кисню в газоподібному вигляді або у вигляді оксидів. Для зменшення навуглецювання металу на УКП після вакуумування нагрівання вели в шлаковому режимі, тривалість перебування плавки під струмом на УКП була мінімально можливою.

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: 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%) 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, σ_{10} становило 33-36. Механічні властивості за діаграмою «межа міцності – загальне подовження» для листових сталей показує, що вони відповідають рівню, властивому високо пластичним ІF-сталям, як по отриманому складу, так і за властивостями. Зразки після прокатки охолоджували на повітрі від температури кінця прокатки до температури навколишнього середовища, швидкість охолодження 5-8⁰С/с, або з метою моделювання змотування листа завантажували в електричну піч, температура якої відповідає температурі змотування в рулон, і охолоджували разом з піччю до температури навколишнього середовища. Мікроструктуру зразків вивчали за допомогою оптичного мікроскопу «Neophot-21».

Мікроструктура сталі 01ЮТА, яка прокатана за два проходи: перший - в аустенітній області, другий - в феритній області температур зі ступенем деформації 60,0 % та охолоджена на повітрі характеризується наявністю дрібнозернистого шару в поверхневій зоні листа товщиною 150-200 мкм. Розмір феритного зерна в цьому шарі 10-20 мкм. Розмір зерна в центральній зоні 20-130 мкм. Таким чином, спостерігається зональна різнозернистість. Після гарячої прокатки сталі 01ЮТА, 01ЮТ, 01ЮТ(Са) піддавали ПД методом КГТ. Сталь 01ЮТ після КГТ має більш однорідну структуру від центру до середини радіуса зразка, а на периферії зразка формуються чітко виражені смуги деформації, що збігаються з напрямком кручення, подрібнення зерен посилюється.

Запропоновано раціональні режими інтенсивної пластичної деформації для покращення властивостей сталей типу 01ЮТ, 01ЮТА і отримання високоякісного особливо тонколистового прокату, здатного до глибокої

витажки: двопрхідна прокатка в аустенітній області при температурах $T_{1пр} = 970-980^{\circ}\text{C}$ і в феритній області $T_{2пр} = 730-740^{\circ}\text{C}$, $T_{зм} = 660-680^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що кращі показники міцності і пластичності досліджених сталей забезпечує інтенсивна пластична деформація методом КГТ при 5 обертах та тиску 310 кг/см^2 . Це дозволить розширити сфери використання ультранизьковуглецевих сталей в авіа-, авто- та ракетобудуванні з метою зменшення ваги конструкцій.

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 A_{r1}) 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).

Практичне значення роботи полягає у встановленні 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; у встановленні закономірностей 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; отримано 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.

Розрахункові дані на основі фізико-хімічного моделювання дозволяють здійснити вибір концентрації елементів для сталей типу 01ЮТА, 01ЮТ. 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, 2026.

The dissertation is devoted to the development of energy-saving end-to-end technology for smelting, out-of-furnace processing and plastic deformation of ultra-low-carbon steel for especially thin sheet products with increased properties (carbon content less than 0.005%) microalloyed 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 a hot-rolled state followed by intense plastic deformation.

Based on the results of the patent search and analysis of scientific literature, including articles in scientific professional publications, materials of conferences, patents, monographs and other scientific publications, the relevance of the topic, which consisted in the physical and chemical substantiation and development of technological modes of smelting and out-of-furnace processing of low-carbon electric steel for thin sheets with increased mechanical properties, was determined. On the basis of the determined relevance, the purpose, objectives and methods of the study were formulated.

At this time, IF-steels are smelted in converters with combined purge with oxygen and argon, the melting process of which has its advantages and disadvantages. In an electric furnace, it is possible to obtain alloy steel with a low content of sulfur and phosphorus, non-metallic inclusions, while the loss of alloying elements is much less than in the oxygen-converter process. With electric melting, you can accurately regulate the temperature of the metal and its composition, smelt 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 complex configurations and reduces the cost of materials for manufacturing 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 an appropriate chemical composition and require high strength and ductility. To achieve them, it is necessary to combine the technology of smelting, out-of-furnace processing and the use of intensive plastic deformation with the production of a finely dispersed structure. The subject of the study in the work is the regularities of interaction of components in the liquid state and the effect on the

oxidation of the metal, the decrease in the content of dissolved gases and the indicators of vacuum carbon deoxidation, nitride formation and its influence on the strength characteristics of low-carbon steel.

Applied research methods - theoretical studies of processes during smelting, out-of-furnace processing and vacuuming of steel are based on the basic provisions of physical chemistry and the theory of metallurgical processes; calculations of thermodynamic equilibrium of metallurgical systems based on Gibbs' theory; the method of mathematical statistics is used to process the results of research; standard methods of chemical analysis of the composition of metal and slag were used; control of energy parameters and temperature regimes of smelting was carried out with the help of trusted devices; intensive plastic deformation was carried out in the laboratory conditions of the USNT; metallographic analysis of non-metallic inclusions was performed in the certified laboratory of UDUNT using the Neofot-1 optical microscope.

Based on the results of determining the influence of technological parameters of steel smelting and out-of-furnace processing on the properties of the finished metal, the dependencies of the properties of the metal at the outlet on the technological parameters of the process in the conditions of existing production were established. Reduction of oxygen consumption contributed to an increase in the yield of usable, which is associated with a decrease in the oxidation of iron in the melt and a reduction in metal losses in the form of iron oxide. The increase in the duration of smelting is due to a decrease in the share of alternative energy, which is introduced mainly by oxygen and its replacement with electricity, the introduction of which requires additional time. As the calculations showed, the use of 1 m³/t of oxygen in the technological process provides the replacement of 4.2 kWh/t of electricity. The influence of input factors (carbon content and metal oxidation at the output) on metal decarburization at the ladle-furnace, as well as on the burnt of deoxidizing elements and the degree of metal desulfurization during secondary processing was analyzed. The content of carbon and active oxygen in the metal before the installation of the ladle furnace significantly affects the fumes of deoxidizers. It has been established that with an increase in the carbon content at the outlet, the carbon monoxide at the UCP increases (taking into account the carbon introduced by deoxidizers) (Fig. 3.4). As shown in Figure 3.5, the oxidation of the metal fed to the UCP helps to reduce the carbon content during secondary processing. To determine the degree of influence of technological parameters on the characteristics of the intermediate product obtained in the EDP and to obtain dependencies describing the relationship between them, a regression analysis was carried out.

For the first time, on the basis of the results of thermodynamic calculations, the value of oxygen activity in a chipboard semi-product, which ensures a decrease in carbon content to a given value, its oxidation from deoxidizers and electrodes when the metal is heated on a ladle furnace, should be high and be 1120 ... 1600 ppm, which is sufficient for the flow of these processes and provides a carbon content at the outlet (0.03-0.048%), with a metal temperature of 1650... 1700°C. An analytical expression was obtained for determining the carbon content in the

metal at the chipboard outlet. Under such conditions, a high efficiency of the process of out-of-furnace processing of chipboard metal is achieved. In cases of overoxidation of the metal at the outlet and preservation of deoxidizers, it is necessary to remove the overoxidation, for which a certain amount of aluminum is required before the addition of deoxidizers, which includes the values of aluminum burnt and preserves the ability of the metal to self-deoxidize with carbon during vacuuming.

The approximation of degassing reactions to equilibrium was estimated by conducting simulations on a mathematical model with variation of factors affecting the process. The regularities of metal degassing in argon-purged ladles, which are established on the basis of the results of mathematical modeling on the mathematical model developed at the Department of Theory of Metallurgical Processes, in which the mass transfer between gases dissolved in the metal ([H], [N], [O]) and argon bubbles was determined by approaching the system to equilibrium, and the distribution of gases from the metal occurred according to three items - into CO bubbles, into argon bubbles and through the exposed surface of the metal with external process limitation and significant deviation of the oxygen removal reaction from equilibrium. When the technological parameters change, a significant part of the metal-gas interface surface is blocked by an increased flow of oxygen compared to the flow of hydrogen, mixing the melt in the ladle with an inert gas contributes to the generation of carbon oxidation reaction products.

The physicochemical justification is applied and the choice of rational technology for smelting low-carbon steel, out-of-furnace processing and formation of the structure during rolling is substantiated. In the course of out-of-furnace processing of steel, a direct circuit was tested: EDP - UKP - VD - MBLZ; reverse scheme: EDP - VD - UKP - CASTING and without vacuuming. The direct scheme solves the traditional problem of gas removal, and the reverse scheme can allow the maximum removal of oxygen from liquid steel by carbon-vacuum deoxidation and reduce the number of ferroalloys of deoxidizers, and, accordingly, non-metallic inclusions. In all cases, the processing technology at the UCP provided for argon purging with a flow rate of 0.2 - 0.5 m³/min (at a pressure of 3 - 5 bar) with minimal exposure of the melt mirror (purge spot no more than 0.5 m in diameter).

The regularities of reducing the harmful effect of nitrogen on the properties of low-carbon steel by selecting a rational amount of nitride-forming elements are considered. The idea of the mechanism of influence of nitrogen content on the formation of titanium and aluminum nitrides has been expanded. The regularities of the influence 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 due to the prevailing thermodynamic affinity of titanium for nitrogen in comparison with aluminum, have been established. Based on the analysis of experimental data, an analytical expression was obtained that determines the effective titanium content for the preliminary binding of nitrogen into titanium nitride and prevents the formation of harmful aluminum nitrides, the formation of which occurs due to nitrogen from titanium

nitrides. When the content of titanium in the steel is higher than proposed by the specified dependence, defects associated with titanium nitrides are observed, and a smaller amount of titanium is insufficient to achieve the specified technical result.

Based on the analysis of the results of experimental melting for the production of low-carbon steels, it is possible to use the reverse scheme of out-of-furnace machining (EDP-2-VD-UKP-MBLZ), as the most flexible in technological terms. The production of a particularly low carbon content in the metal was carried out by using the reaction of vacuum decarburization of the metal without additional introduction of oxygen in gaseous form or in the form of oxides. To reduce the carburization of metal on the UCP after vacuuming, the heating was conducted in slag mode, the duration of the smelting under current at the UCP was the minimum possible.

For the first time, the method of physicochemical modeling, which was developed at the Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, was used to determine the optimal composition of low-carbon steel, and the integral parameters that characterize the state of the alloy and cause the change in properties in the established concentration interval of modifying elements were established: 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%) and show that under the established modes of deformation processing of prototype steel, indicators of mechanical properties and structure of rolled samples are achieved, which correspond to the characteristics of low-carbon steel: tensile strength 354... 362 MPa, the relative narrowing was 84-85%, and the relative elongation, %: σ_5 in the range of 42-44, σ_{10} was 33-36. The mechanical properties according to the "tensile strength – total elongation" diagram for sheet steels shows that they correspond to the level inherent in highly ductile IF steels, both in terms of the composition obtained and in terms of properties. The samples after rolling were cooled in air from the temperature of the end of rolling to the ambient temperature, the cooling rate was 5-80C/s, or for the purpose of simulating the winding of the sheet, they were loaded into an electric furnace, the temperature of which corresponds to the temperature of rolling into a roll, and cooled together with the furnace to the ambient temperature. The microstructure of the samples was studied using the Neophot-21 optical microscope.

The microstructure of 01UTA steel, which is rolled in two passes: the first - in the austenitic region, the second - in the ferritic region of temperatures with a degree of deformation of 60.0% and cooled in air is characterized by the presence of a fine-grained layer in the surface zone of the sheet with a thickness of 150-200 microns. The size of the ferrite grain in this layer is 10-20 microns. The grain size in the central zone is 20-130 microns. Thus, zonal variegation is observed. After hot rolling of steel, 01YUTA, 01UT, 01UT(Sa) were subjected to IPD by the KGT method. 01UT steel after CGT has a more homogeneous structure from the center to the middle of the sample radius, and clearly defined strain bands are formed on the periphery of the sample, coinciding with the direction of torsion, the grinding of grains is enhanced.

Rational modes of intensive plastic deformation are proposed to improve the properties of steels of type 01UT, 01UTA and to obtain high-quality especially thin sheet products capable of deep drawing: two-pass rolling in the austenitic region at temperatures $T_{1pr} = 970-980^{\circ}\text{C}$ and in the ferritic region $T_{2pr} = 730-740^{\circ}\text{C}$, $T_{zm} = 660-680^{\circ}\text{C}$. It has been established that the best indicators of strength and ductility of the studied steels are provided by intensive plastic deformation by the KGT method at 5 revolutions and a pressure of 310 kg/cm². This will expand the scope of use of ultra-low carbon steels in aviation, automotive and rocket construction in order to reduce the weight of structures.

On the basis of the physical and chemical substantiation and development of technological modes of smelting and out-of-furnace processing of low-carbon electric steel for thin plates with increased mechanical properties, a new ultra-low-carbon steel (0.002–0.005% carbon content), microalloyed aluminum steel, with a minimum content of harmful impurities ($P < 0.010\%$) was smelted; $S < 0,005\%$; $N < 50\text{ppm}$; $O < 30\text{ppm}$; $H < 2\text{ppm}$). The peculiarities of the formation of a thin structure, the formation of the texture of low-carbon electric steel at low temperatures (below A_{r1}) of the end of rolling and winding have been revealed. The regularities of the influence of recrystallization processes, texture formation on grain size in the structure of sheet steel have been established, and the relationships between the texture, microstructure and mechanical properties of thin sheet steel have been identified.

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" (No. 122000 dated 25.08.2020); "Method of production of alloyed low-carbon steel in converters with lateral blowing" (No. 122507 dated 26.11.2020).

The practical significance of the work lies in establishing the value of oxygen activity in the chipboard intermediate sufficient for carbon oxidation reactions to a given value, oxidation of carbon from ferroalloys and carbon from electrodes when the metal is heated on a ladle furnace; in establishing the regularities of metal degassing in ladles with argon purging, taking into account the distribution of gases from the metal according to three items – into CO bubbles, into argon bubbles and through the open surface of the metal; Data were obtained on 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 for nitrogen.

Calculation data based on physicochemical modeling allow you to select the concentration of elements for steels of type 01YUTA, 01UT. The concentration interval of the elements, established according to the calculated data, can provide an optimal set of properties of steels. The calculated concentration intervals of the elements have been experimentally confirmed and will be used to determine the optimal composition of ultra-low carbon steels. The obtained data allows: to increase the technical and economic indicators of low-carbon electric steel smelting, to reduce the consumption of deoxidizers and to improve the quality of

electric steel by reducing the amount of dissolved gases and non-metallic inclusions.

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