

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУК І ТЕХНОЛОГІЙ  
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУК І ТЕХНОЛОГІЙ  
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КАМКІН ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ**

УДК 669.187:621.771.23.002.2

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗРОБКА НАСКРІЗНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА  
НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ВИСОКОЯКІСНОГО ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ**

136 - Металургія

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня **доктора філософії**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Камкін В.Ю.

Науковий керівник:

**Величко Олександр Григорович,**

Член-кореспондент НАНУ, докт.техн.наук, професор

Дніпро 2026

## 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 за спеціальністю 136 – Металургія. ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, 2026.

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 зливі 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 ІF 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 нітрідоутворення 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 ( $V_{\text{D}}$  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, %:  $\sigma_5$  в межах 42-44,  $\delta_{10}$  становило 33-36. Механічні властивості за діаграмою «межа міцності – загальне подовження» для листових сталей показує, що вони відповідають рівню, властивому високопластичним ІF-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  $A_1$ ) 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 дугтя” (№ 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%), Мп (0,12...0,13%), Si (0,01...0,02%), Р (0,006...0,008%), S (0,011...0,012%), Al (0,04...0,05%), Ti (0,05...0,06%), N (0,004...0,005%), Са (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-furnace 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 ( $Bi_D$  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, %:  $\sigma_5$  within 42-44,  $\delta_{10}$  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 Ar1) 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.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Публікації у наукових фахових виданнях України*

1. Низьковуглецева сталь для тонкого листового прокату з підвищеними властивостями. Теорія і практика металургії. - № 1-2 (112-113). – 2018. – С. 35-44. Камкіна Л.В., Проїдак Ю.С., **Камкін В.Ю.**, Ремез О.А., Безшкуренко О.Г.

[https://nmetau.edu.ua/file/zh2018\\_1-2\\_w10.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh2018_1-2_w10.pdf)

2 Распределение азота, титана и алюминия между нитридами и твердым раствором в сталях типа АТЮ. Теория и практика металлургии. - №5. - 2019. – С. 31-35. ISSN 1028-2335. Исаева Л.Е., Лев И.Е., **Камкин В.Ю.**, Проїдак С.В. <https://doi.org/10.34185/tpm.5.2019.03>

3. Технологія виплавки чистої сталі та особливості позапічної обробки. Теорія і практика металургії. - №3. – 2019. - С. 5-13. ISSN 1028-2335. Куцова В.З., **Камкін В.Ю.**, Кнапинський М.Г., Проїдак С.В., Варицев А.О. <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.01>.

4. Зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі 08Ю шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів. Камкіна Л.В., Мішалкін А.П., **Камкін В.Ю.**, Грищенко Ю.М., Ісаєва Л.Є. Теорія і практика металургії. - №6. – 2019. – С. 16-24. ISSN 1028-2335. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.03>.

5. Фізико-хімічні основи і математичне моделювання процесів дегазації при позапічній обробці сталі. Камкіна Л.В., Величко О.Г., **Камкін В.Ю.** Теорія і практика металургії. - №3(128). – 2021. - С. 31-40.

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.05>.

6. Velychko O.G., **Kamkin V.Yu.**, Projdak Yu.S. Coordinated control of the composition of 01yut steel and deformation processing modes to achieve specified mechanical properties. Теорія і практика металургії. №2(143), 2024. С 36-44. ISSN 1028-2335. <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2024.06>

[https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_02\\_2024\\_ok.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_02_2024_ok.pdf)

7. Фізико-хімічні закономірності газокисневої конверсії метану. Сухий К.М., Гришин О.М., Величко О.Г., Надточій А.А., Камкін В.Ю. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2025, No. 3, pp. 56-64. ISSN 0321-4095

<http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-160-3-56-64>

*Публікації в закордонних фахових виданнях або виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:*

1. Внепечная обработка электростали опытными шлакообразующими смесями с целью получения низкоуглеродистой стали. “New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering”. Monografie. № 68. – Czestohowa, Poland, 2017. – С. 38-41. Пройдак Ю.С., Куцова В.З., Мешалкин А.П., **Камкин В.Ю.**, Констанчак А., Сеницин Я.С.

2. Interaction of low-carbon electrical steel with a refractory lining of the ladle during out-of-furnace processing. Series: Monografie Nr 78. «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics». - Czestochowa, Poland, 2018. - S. 225-230. Jurij Projdak, **Vladimir Kamkin**, Jana Mianovska, Anna Konstanciak

*2. Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

1. Вакуум-кислородное обезуглероживание электропечного полупродукта для получения особо низкоуглеродистой стали. Матеріали VIII Міжнародної конференції «Молоді вчені 2017 - від теорії до практики». 17 лютого 2017 р., м. Дніпро, Україна. – С. 48-52. **Камкин В.Ю.**, Куцова В.З.

2. Оптимізація складу низьковуглецевої сталі 01ЮТ методом фізико-хімічного моделювання. I Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених «Наука і металургія». 18-19 травня 2017 р. Україна, м. Дніпро, ІЧМ НАНУ. – С.48. Куцова В.З., **Камкін В.Ю.**, Стеценко Г.П.

3. Застосування інформаційних технологій в процесах одержання високоміцної сталі. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції

«Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ІТММ'2018. м. Дніпро, 27 – 29 березня 2018 р. – С. 147. **Камкін В.Ю.**, Куцова В.З.

4. Аналіз впливу шлаку на процеси при виплавці електросталі. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2019). 26 - 28 березня 2019 року. м. Дніпро. – С. 9. **Камкін В.Ю.**, Безшкуренко О.Г.

5. Особливості позапічної обробки при одержанні ІФ сталі. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених “МОЛОДА АКАДЕМІЯ 2020”. - Том 1. м. Дніпро. 21-22 травня 2020 року. НМетАУ. – С. 31. Ходак В.М., **Камкін В.Ю.**, Анкудінов Р.В.

6. Моделювання розчинення вапна в шлаку окислювального періоду виплавки сталі в ДСП. Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні" ІТММ'2022. м. Дніпро, 18 травня 2022 р.- С. 259-260. **Камкін В.Ю.**, Мішалкін А.П.

7. Modeling the process of carbon oxidation during evacuation in the production of low-carbon steel. 15th International Symposium of Croatian Metallurgical Society „Materials and Metallurgy“ (SHMD '2022). Zagreb, Croatia, March 22 – 23, 2022. METALURGIJA 61 (2022) 2, PROCESS METALLURGY – SECTION “B” - P. 563. Yu. Proydak, **V. Kamkin**

#### *Патенти*

1. Патент України на винахід. (51) МПК: С21С 7/06 (2006.01), С21С 7/064 (2006.01), С21С 7/076 (2006.01), С22В 9/10 (2006.01). Спосіб двоетапної позапічної обробки низьковуглецевої сталі. Камкіна Л.В., Пройдак Ю.С., Мішалкін А.П., Колбін М.О., **Камкін В. Ю.**, Надточій А.А., Синицін Я.С., Безшкуренко О.Г., Мянговська Я.В., Исаева Л.Є. №122000. Заявл.: 16.07.2018. Опубл.: 25.08.2020, бюл. № 16/2020. - 4с.

#### *Додаткові публікації*

1. Проблемные вопросы использования техногенных отходов промышленного происхождения в процессах рафинирования стали. Теория и

практика металлургії. - № 3-4 (110-111). – 2017. – С. 47-53. Мешалкин А.П., **Камкин В.Ю.**, Колбин Н.А., Турищев В.В., Бабенко А.В.

2. Наближення реакцій дегазації сталі до рівноваги при вакуумуванні в ковші. Теорія і практика металургії. - № 3-4 (110-111). – 2017. – С. 54-57. Пройдак Ю.С., **Камкін В.Ю.**, Камкіна Л.В., Безшкуренко О.Г.

3. Спінювання шлаку в ДСП як ефект застосування шлакоутворюючих сумішей з регульованим співвідношенням компонентів при вдуванні у ванну в струменях газу. Теорія і практика металургій. – 2018. - № 6. - С. 50-56. ISSN 1028-2335. Камкін В.Ю., Токарев С.І., Мішалкін А.П., Анкудінов Р.В., Безшкуренко О.Г. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.06>

4. Патент України на винахід. (51) МПК: C21C 5/30 (2006.01), C21C 5/40 (2006.01), C21C 5/42 (2006.01). Спосіб виробництва легованої низьковуглецевої сталі в конвертерах з боковим підведенням дуття. Камкіна Л.В., Пройдак Ю.С, Мішалкин А.П., Колбін М.О., **Камкін В.Ю.**, Безшкуренко О.Г., Анкудінов Р.В. №.122507. Заявл.: 16.07.2018. Опубл.: 25.11.2020, бюл. № 22/2020. – 5с.

4. Теоретические и технологические особенности внепечной обработки металла ДСП для получения низкоуглеродистой стали. Inżynieria Produkcji. Strona społeczna i przemysłowa. Seria: Monografie nr 52. Częstochowa, 2015. – С. 130-136. Л. Камкина, Я. Мянновская, А. Стовпченко, **В. Камкин**

5. Рациональные режимы выплавки стали с минимальным содержанием углерода в дуговой электропечи. Inżynieria Produkcji. Strona społeczna i przemysłowa. Seria: Monografie nr 52. Częstochowa, 2015. – С. 102-111. Людмила Камкина, Юрий Пройдак, Яна Мянновская, **Владимир Камкин**

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП.....	21
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	27
РОЗДІЛІ АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗРОБОК ОДЕРЖАННЯ УЛЬТРАНИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОСОБЛИВО ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ.....	30
1.1 Огляд існуючих технологій виробництва низьковуглецевої сталі.....	30
1.1.1 Вибір матеріалу для автомобільної промисловості.....	30
1.1.2. Аналіз наукової інформації щодо виплавки низьковуглецевої сталі .....	35
1.2 Сучасний стан інтенсифікації плавки сталі в електродугових печах.....	40
1.3 Організація позапічної обробки ІF-сталі у сучасній металургії .....	48
1.4 Автолистові сталі для глибокої витяжки без атомів впровадження в кристалічній решітці фериту.....	51
1.5 Вплив домішкових елементів на властивості низьковуглецевої сталі .....	54
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ, ПОСТАНОВКА ЦІЛЕЙ ТА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	60
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	63
РОЗДІЛ 2 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	76
2. 1 Характеристика енергетичного обладнання ДСП.....	76

2.2 Матеріали дослідження.....	80
2,3 Деформаційні режими прокатки.....	81
2.4 Визначення механічних властивостей та мікроструктури	83
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	86
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИПЛАВКИ І ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ НА ВЛАСТИВОСТІ ГОТОВОГО МЕТАЛУ.....	88
3.1 Аналіз технологічних параметрів виплавки низьковуглецевої сталі в умовах діючого виробництва.....	88
3.2 Регресійний аналіз ступеню впливу технологічних параметрів на характеристики металу на випуску .....	98
3.3 Вплив характеристик напівпродукту на перебіг процесів при подальшій позапичній обробці для отримання сталі з заданим рівнем механічних властивостей.....	105
3.3.1 Оцінка рівня розкисленості металу перед вакуумуванням.....	104
3.3.2 Розрахунки розкислювальної здатності елементів.....	109
3.4 Наближення реакцій дегазації сталі до рівноваги при вакуумуванні в ковші.....	115
3.5 Визначення характеристик газової фази при газокисневій конверсії метану.....	123
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	130
РОЗДІЛ 4 ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР	

РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЕЛЕКТРОСТАЛІ, ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПРИ ПРОКАТЦІ...	134
4.1 Обґрунтування та вибір технологічної схеми одержання сталі .....	134
4.1.1 Визначенні особливостей вакуумної обробки низьковуглецевої сталі. Вибір схеми.....	134
4.1.2 Вибір схеми позапічної обробки сталі.....	136
4.2 Технологія вакуумування особливо низьковуглецевої сталі з напівпродукту ДСП.....	142
4.3 Зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів.....	143
4.3.1 Аналіз інформації щодо впливу алюмінію та азоту на структуру сталі.....	143
4.3.2 Термодинамічна оцінка нітридоутворюючої здатності розкислювачів, що вводяться в сталь.....	145
4.4 Дослідна виплавка низьковуглецевої сталі.....	148
4.5 Режими обробки сталі з особливо низьким вмістом вуглецю на установці ківш-піч.....	150
4.6 Фізико-хімічне моделювання для прогнозування та управління властивостями сталі.....	155
4.6.1 Загальний опис методології фізико-хімічного моделювання.....	155
4.6.2 Методика проведення розрахунків та визначені концентраційні дівпзони елементів	157
4.7 Опрацювання деформаційних режимів прокату зразків дослідної сталі.....	161

ВИСНОВКИ .....	165
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	168
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	172
РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	174
ДОДАТКИ.....	

## ВСТУП

Конкуренентоспроможність і затребуваність металопродукції на світовому ринку залежать від рівня експлуатаційних характеристик готового виробу. За останні роки вимоги до основних службових характеристик (штампуємість, міцність, корозійна стійкість) сталей зросли в кілька разів, що свідчить про необхідність пошуку нових, принципово відмінних способів досягнення заданого рівня властивостей. Фізико-хімічні властивості металу формуються протягом усього виробничого циклу, що обумовлює необхідність підбору раціональних параметрів виплавки, позапічної обробки та прокатки в залежності від характеристик цільового продукту.

Історія металургії свідчить про циклічний характер появи революційних змін в техніці і технології чорної металургії [1]. Поступове зникнення мартенівського виробництва створило об'єктивні передумови для паралельного розвитку високопродуктивних способів виробництва сталі в дугових сталеплавильних печах, використання яких дозволяє переробляти значну кількість брухту та за рахунок здешевлення електроенергії забезпечує економічну ефективність виробництва сталей масового сортаменту. З 1960 р по 1984 р частка електросталі в загальному виробництві сталі в світі збільшилася з 10% до 23%, а в окремих країнах (США, Канада, Італія та ін.) перевищила 30% і навіть 50% [2].

Світове виробництво сталі за 2024 рік становило 1,84млрд т, про що свідчить глобальний рейтинг 71 країн-виробників сталі World Steel Association [3]. Динаміка розвитку виробництва сталі в електропечах показує, що за останні роки виробництво сталі цим способом зросло в усім світі на 4,1%, у той час як загальна виплавка сталі — на 2,7%. Збільшення виплавки сталі в електропечах можна пояснити перевагами цієї технології: меншими капітальними витратами, високою виробничою гнучкістю, меншим забрудненням навколишнього середовища. Короткий процес в електродугових печах становить 29% світового виробництва сирової сталі, а інтенсивність викидів вуглецю значно варіюється через різницю в сировині:

середня інтенсивність викидів  $\text{CO}_2$  в електропічному процесі з використанням заліза прямого відновлення, як сировини, становить 1,37 тонни на тонну сирової сталі, а при використанні сталевого брухту інтенсивність викидів може бути додатково знижена до 0,68 тонни на тонну сирової сталі [4].

Світова сталеливарна промисловість споживає 8% виробленої енергії та викидає в навколишнє середовище 7% загальної емісії вуглекислого газу (2,6 Гт у 2020 р.) [5, 6]. Утворення  $\text{CO}_2$  пов'язане переважно з використанням вугілля, яке на 75% забезпечує галузь енергією. Концепція протидії змінам клімату, сформульована у 2019 р. як ініціатива ЄС Green Deal (Зелений курс), передбачає до 2050 р. обмеження викидів  $\text{CO}_2$  у металургії до 0,25 т на тонну сталі проти нинішнього рівня 0,75 т.

У контексті Green Deal пріоритетного розвитку в перспективі набудуть електрOMETALургійні процеси виробництва сталі як менш енергомісткісні та екологічно безпечніші. Ці технології поступово витіснятимуть технологічний маршрут доменна піч — конвертер, який домінує на сьогодні, наближаючись при цьому до умовної вуглецевої нейтральності завдяки очікуваному прогресу та здешевленню «зеленого» водню як відновника в перспективних процесах виробництва металізованої сировини, а також електроенергії з відновлюваних джерел (енергія води, вітру, сонця) [7]. Автори відмічають, що поєднання подачі кисню та вуглекислого газу знизу в конвертері не лише прискорює процес плавки, а й мінімізує утворення нітридів (наприклад,  $\text{TiN}$ ,  $\text{AlN}$ ) та шкідливих газів (наприклад,  $\text{NO}_x$ ), сприяючи розвитку технологій виробництва низьковуглецевої сталі.

Застосування в складі насипних матеріалів рідкого чавуну без шкідливих домішок дозволяє значно підвищити чистоту та якість розплавленого металу, однак оптимальним є  $\approx 30\%$  [8], оскільки з одного боку він приносить додаткову кількість фізичного та хімічного тепла, що призводить до зниження споживання електроенергії та підвищення продуктивності, а інша причина — необхідність значного окислення кількості

вуглецю, що збільшує тривалість плавлення і знижує продуктивність [8, 9]. Також застосування рідкого чавуну у шихті ДСП призводить до збільшення споживання кисню для очищення металу на 35 м<sup>3</sup>/т при роботі без чавуну, при заряді до 37 м<sup>3</sup>/т, при цьому вміст заліза становить 30% і до 45 м<sup>3</sup>/т при вмісті 50%.

В умовах Загострення глобальної кліматичної кризи та необхідність досягнення цілей Паризької угоди щодо вуглецевої нейтральності привело до проблем у сталеливарній промисловості, яка є одним з провідних джерел глобальних викидів парникових газів, що потребує забезпечення сталої промислової трансформації за допомогою інноваційних низьковуглецевих технологій виробництва сталі

Автомобілебудування є одним із найбільш крупних споживачів продукції металургійних підприємств. Важливе місце в продукції металургійних підприємств, яку постачають автомобілебудуванню, належить тонкому холоднокатаному листу для глибокої та особливо складної витяжки [8-10]. У ряді робіт [9-20] приділяється велика увага питанням розробки технології виробництва низьковуглецевої сталі, особливо детально досліджено вплив сформованої структури металу на механічні властивості металу. Для виробництва чистих сталей можливим вирішенням є застосування сучасного комплексу «дугова сталеплавильна піч – установка піч-ківш - вакууматор - машина безперервного лиття заготовки (МБЛЗ)» (далі - ДСП-УКП-VD-МБЛЗ), що особливо важливо для випуску низьковуглецевих сталей. Детального опису фізико-хімічних особливостей взаємодій при реалізації процесу виплавки сталі не приводилось. Є інформація щодо формування структури металу при прокатці та гартуванні, тому не зрозуміло змінення складу металу по етапам обробки шихтових матеріалів.

Тому одним з актуальних завдань для металургії України виробництва ультра низьковуглецевих сталей (УНВС) типу 01ЮТ, 01ЮТА та тонкого листа з них з підвищеним комплексом механічних властивостей. Ця продукція використовується для виготовлення методом холодної штамповки

деталей конструкцій автомобілей, а також може використовуватись для виготовлення деталей у ракето– та машинобудуванні. IF-сталь (Interstitial Free Steel) – сталь, вільна від атомів впровадження) має феритну структуру без атомів впровадження в кристалічних ґратах  $\alpha$ -заліза [18].

Таким чином, актуальним на сьогоднішній день завданням є отримання високоякісної сталі з заданим комплексом властивостей, який значною мірою визначається вмістом основних елементів і домішок, а також кількістю, морфологією і розподілом неметалічних включень. Вирішення цього завдання потребує встановлення закономірностей взаємодії компонентів в рідкому стані та вплив на окисленість металу, зниження вмісту розчинених газів та показники вакуум вуглецевого розкислення, характеристики нітрідоутворення та розробка на цій основі комплексної наскрізної технології виробництва чистої сталі, яка включає у себе ефективну виплавку сталі в електродуговій печі, раціональний вибір схеми позапічної обробки та розкислення низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями.

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 нітрідоутворення 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.

Основні наукові положення, які виносяться на захист:

- результати розрахунково-теоретичного аналізу величини активності кисню у напівпродукті з ДСП для забезпечення заданого вмісту вуглецю на випуску, окислення вуглецю з феросплавів та вуглецю з електродів при нагріві металу на печі-ковші. Теоретично обґрунтовано та підтверджено експериментально - активність кисню 1100ppm, вуглець на випуску 0,03...0,048%, температура металу 1600°C.
- розвинені теоретичні уявлення 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 блокування значної частини поверхні розділу метал – газова фаза потоком кисню.
- теоретично оцінено закономірності впливу титану на зменшення дії азоту у сталях на появу дефектів металу, які викликають виділення нітридів алюмінію та на основі експериментальних даних одержано аналітичний вираз, який визначає кількість титану для зменшення шкідливого впливу азоту з урахуванням концентрації алюмінію.

- визначення оптимального складу низьковуглецевої сталі при використанні методики фізико-хімічного моделювання та встановлені інтегральні параметри, які характеризують стан сплаву і обумовлюють зміну властивостей у встановленому концентраційному інтервалі модифікуючих елементів.
- визначено вплив встановлених режимів деформаційної обробки дослідних зразків сталі на показники механічних властивостей та структури прокатаних зразків, які відповідають характеристикам низьковуглецевої сталі, як по отриманому складу, так і за властивостями

### **Апробація матеріалів дисертації**

VIII Міжнародна конференція «Молоді вчені 2017 - від теорії до практики». 17 лютого 2017 р., м. Дніпро, Україна.

Перша Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених «Наука і металургія». 18-19 травня 2017 р. Україна, м. Дніпро, ІЧМ НАНУ.

X Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ІТММ'2018. м. Дніпро, 27 – 29 березня 2018 р.

Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2019). 26 - 28 березня 2019 року. м. Дніпро.

Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених “МОЛОДА АКАДЕМІЯ 2020”. Том 1. м.Дніпро. 21-22 травня 2020 року. НМетАУ.

Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні" ІТММ'2022. м. Дніпро, 18 травня 2022 р.

15th International Symposium of Croatian Metallurgical Society „Materials and Metallurgy“ (SHMD '2022). Zagreb, Croatia, March 22 – 23, 2022.

### **Повнота викладу результатів роботи в наукових фахових виданнях**

Основний зміст дисертації опубліковано в 17 наукових працях: з них 6 статей у фахових виданнях, що відповідають переліку ДАК МОН України; 1 стаття у науково-метричній базі Scopus, 1 патент України на винахід; 2 статті в закордонних наукових монографіях; 7 тез доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукових напрямків науково-дослідницької діяльності кафедри металургії чавуну і сталі Українського державного університету науки і технологій. Розглянуті в роботі актуальні проблеми і задачі в області виплавки та позапічної обробки металу відповідають пріоритетам науково-технічного розвитку.

Основу роботи складають результати досліджень, що виконані автором та викладені у звіті з науково-дослідницької роботи «Новітня енергозберігаюча технологія виплавки та пластичної деформації ультра низьковуглецевих сталей для особливо тонкого листового прокату подвійного призначення з підвищеними властивостями», де автор був виконавцем, № держреєстрації 0117U002340, що виконувалась в Українському державному університеті науки і технологій Міністерства освіти і науки України. Термін виконання: (2018-2019 рр).

Дисертаційна робота складається з 4 розділів, об'ємом 175 сторінок, два додатки.

### **Список літератури**

1. Мазур В. Л. Металургія України: стан, конкурентоспроможність, перспективи // Металургійна і гірничорудна промисловість. 2010. № 2. С.12-16.

2. <https://uas.su/books/2011/dsp/1/razdel1.php>

3. Сайт World Steel Association. Annual report 2021.

[https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steeldata/P1\\_crude\\_steel\\_total\\_pub/CHN/IND](https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steeldata/P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND)

4. Sustainability Indicators of the Steel Industry. Worldsteel News 2024. Available online: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024> (accessed on 3 December 2024).

5. Smirnov O.M., Timoshenko S.M., Narivskiy A.V. Renovation and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and Green Deal. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (4): 21—38.

<https://doi.org/10.15407/visn2023.04.021>

6. A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. 2019. <https://bit.ly/40gWrbi>

7. Sustainable Transition Pathways for Steel Manufacturing: Low-Carbon Steelmaking Technologies in Enterprises. Jinghua Zhang, Haoyu Guo, Gaiyan Yang, Yan Wang, Wei Chen. *Sustainability*. Volume 17. Issue 12. 2025. DOI 10.3390/su17125329

8. J.-P. Birat. Impact of steelmaking and casting technologies on processing and properties of steel // *Ironmaking and Steelmaking*.- 2001.- Vol. 28.- № 2.-P. 152-158.

9. Jean-Pierre Birat. Steel cleanliness and environmental metallurgy. *Metall. Res. Technol.* Volume 113, Number 2, 2016. <https://doi.org/10.1051/metal/2015050>

10. David K. Matlock, John G. Speer. Processing Opportunities for New Advanced High-Strength Sheet Steels. Volume 25, 2010 - Issue 1-3: 2nd International Conference on Thermo-Mechanical Simulation and Processing of Steels. *Materials and Manufacturing Processes*. Original Articles. Pages 7-13.

<https://doi.org/10.1080/0426910903158272>

11. Miklós Tisza. Development of Lightweight Steels for Automotive Applications. 2020. *Engineering Steels and High Entropy-Alloys*. IntechOpen. *Engineering Steels and High Entropy-Alloys*. Edited by Ashutosh Sharma, Zoia Duriagina, Sanjeev Kumar. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91024>

12. Lesch C, Kwiaton N, Frank B. Advanced High Strength Steels (AHSS) for automotive applications: Tailored properties by smart microstructural

adjustments. *Steel Research International*. 2017;88:1-21. DOI: 10.1002/srin.201700210

13. Nanda T, Singh V, Singh V, Chakraborty A, Sharma S. Third generation of advanced high-strength steels: Processing routes and properties. *Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(2):209-238. DOI: 10.1177/1464420716664198

14. Matlock DK, Speer JG, Moor ED, et al. Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: An overview. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2012;15:1-12

15. International Iron and Steel Institute. UltraLight Steel Auto Body Concepts (ULSAB) Overview Report. 2002. Available from: [www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org)

16. WorldAutoSteel. UltraLight steel auto closures—ULSAC. Engineering Report. 2001. Retrieved from: <http://www.worldautosteel.org/projects/ulsac-2/ulsac/>

17. WorldAutoSteel. UltraLight steel auto body—Advanced vehicle concepts—ULSAB-AVC. Engineering Report. 2002. Retrieved from: <http://www.worldautosteel.org/projects/ulsab-avc-2/>

18. Takechi H. Metallurgical Aspects on Interstitial Free Sheet Steel from Industrial Viewpoints. // *ISIJ International*, Vol. 34 (1994), No. 1, pp. 1-8. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.1>

19. Yu. V. Milman, S. I. Chugunova, I. V. Goncharova, and A. A. Golubenko, Plasticity of Materials Determined by the Indentation Method, *Usp. Fiz. Met.*, **19**, No. 3: 271—308 (2018), doi: 10.15407/ufm.19.03.271

20. Удосконалення методики визначення спектрального складу границь зерен у низьковуглецевих сталях. Сухомлін Г.Д., Щудро Р.Е., Щудро А.Е. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2015. №2. С.30-35. <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/30-35>

# **1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗРОБОК ОДЕРЖАННЯ УЛЬТРАНИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОСОБЛИВО ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ**

## **1.1 Огляд існуючих технологій виробництва низьковуглецевої сталі**

### **1.1.1 Вибір матеріалу для автомобільної промисловості**

Підвищення ефективності роботи автомобіля має першочергове значення для збереження природних ресурсів та зменшення глобального потепління, що спричиняють викиди вуглецю від автомобільних транспортних засобів. Зменшення маси транспортного засобу, що є одним із способів ефективності використання палива, може відігравати важливу роль у загальному скороченні викидів вуглецю [1]. Перевагою легкої ваги автомобіля є також характеристики водіння, які покращуються. Однак, незважаючи на всі ці зусилля протягом останніх років, впровадження вдосконаленої безпеки та системи комфорту, а також бажання клієнта мати більш потужні автомобілі призвело до збільшення, а не зменшення ваги автомобіля [1].

Зменшення ваги може бути досягнуто шляхом заміни матеріалу або, альтернативно, архітектурних змін [1, 2]. Навіть незважаючи на те, що алюміній широко використовується в автомобілях найвищого класу, де це можна собі дозволити, кузов завжди складається зі сталі. На кузов автомобіля і салон припадає приблизно 40% загальної ваги автомобіля. Тому він має найбільший потенціал для зниження ваги [1]. Було показано, що зменшення ваги автомобілів на 100 кг може зменшити викиди вуглекислого газу приблизно на 130 кг на рік [3-5]. Головним завданням є зменшення маси кузова без шкоди для міцності автомобіля.

Відколи Генрі Форд розпочав масове виробництво автомобілів у 1913 році, сталь завжди була основним матеріалом для автомобільної промисловості та численні дослідження завжди доводили, що сталь є найбільш конкурентоспроможною та має переваги не тільки з точки зору рентабельності, але й в обсягах виробництва над конкуруючими матеріалами, такими як композити, алюміній і магній [2]. Незважаючи на те, що відтоді були розроблені сталі, індуковані трансформацією пластичності (TRIP) з міцністю в районі 800 МПа (TRIP 450/800), дуже малоймовірно, що TRIP та інші високоміцні сталі, такі як двофазна сталь (DP), будуть використовуватись.

Потрібна розробка надвисокоміцних сталей (UHSS) з покращеними механічними властивостями. Термін «надвисокоміцна сталь» (UHSS) іноді використовується як синоніми з «удосконалені високоміцні сталі» (AHSS Advanced High-Strength Steel). Передбачається, що ці сталі мають кращий баланс міцності та пластичності порівняно зі звичайними сталями. Деякі автори припускають, що індукована двійникуванням пластичність (TWIP) сталі може стати альтернативою. В роботі [6] досліджували механічні властивості TWIP940 і показали, що рівномірне подовження понад 60% і стиснення близьке до 1000 МПа може бути досягнуто. Однак високі витрати на виробництво, а також розщеплення кінців (форма відстроченого руйнування) є однією з основних проблем, які заважають виробникам використовувати сталі TWIP [7].

Зроблено припущення, що так звана «нанопрещіпітація» може забезпечити мікроструктурну стратегію, яка дозволяє розвинути міцність і пластичність поза поточними межами [8-10]. Було стверджено, що нанопрещіпітати можуть забезпечити як високу міцність, так і зберегти високу пластичність [7, 11, 12]. Відомо, що на дислокаціях і межах зерен утворюються інші виділення (наприклад, карбід ніобію, що виділяється в аустеніті, і карбіди ванадію, що утворюються у фериті). Виділення перешкоджають руху дислокацій, що призводить до виникнення додаткових

напружень. Автори [7] висловили думку, що оптимальним є дисперсійне зміцнення чисто феритної мікроструктури без перліту або цементиту, отже, мінімізація локалізованих концентрацій напруги, що дасть найкраще поєднання пластичності та міцності. Однак цей підхід має тенденцію ігнорувати переваги інших фаз. Присутність мартенситу може значно підвищити міцність, тоді як залишковий аустеніт може створити ефект TRIP, який покращує міцність під час деформування. Результати робіт [10, 13] підтверджують цей підхід.

Автори [13] стверджують, що вони виготовили високоміцну низьколеговану сталь (HSLAS) з міцністю до 780 МПа та зміцнену нанопреципітацією, демонструючи високий коефіцієнт текучості та високу формуємість, а також хороші властивості покриття. Раабе та ін. [10] повідомили, що завдяки поєднанню ефекту TRIP і ефекту мартенситного старіння вони розробили низьколеговану високоміцну сталь, загартовану сильно деформованим мартенситом. Вважається, що мартенситне утворення відповідає за утворення нанопреципітатів, які діють як перешкода для руху дислокацій, підвищуючи міцність матеріалу.

Незважаючи на значну кількість робіт [3-21] в яких розглядаються нові надміцні сталі, автори звертають увагу на високі витрати на виробництво, що заважають виробникам використовувати надміцні сталі типу TWIP. Стверджується [16], що найпоширеніший у світі сплав, сталь, є матеріалом вибору, коли йдеться про виробництво таких різноманітних виробів, як нафтові вежі та автомобілі, від літаків до хмарочосів, просто через його функціональність, адаптивність, придатність до обробки та міцність. Нещодавно розроблені марки вдосконаленої високоміцної сталі (AHSS) значно перевершують конкуруючі матеріали для поточних та майбутніх автомобільних застосувань. Це є прямим результатом гнучкості характеристик сталі, а також її численних переваг, включаючи низьку вартість, можливість зниження ваги, характеристики безпеки, зниження викидів парникових газів та чудову придатність до вторинної переробки [16]. Для підвищення

удароміцності та економії палива за рахунок зменшення загальної ваги автомобілів виробники все частіше використовуює сталі класу AHSS.

Широкий спектр властивостей інноваційних сталей найкраще ілюструє відома діаграма міцності та пластичності сталі (<https://toughsteel.eu/ahss/>), що представлена на рисунку 1.1.

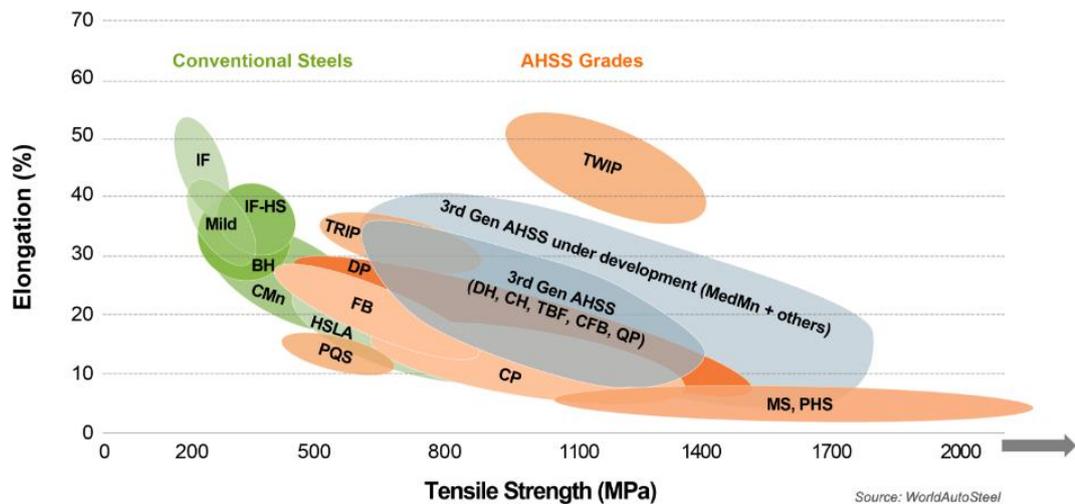


Рисунок 1.1 - Загальна діаграма формоздатності, що порівнює міцність і подовження поточних і нових марок сталі

Джерело: надано WorldAutoSteel. <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/>

Існують різні способи класифікації автомобільних сталей. Одним із них є металургійне позначення, що надає деяку інформацію про процес. Поширені позначення включають сталі з низькою міцністю (без інтерстиціальних включень та м'які сталі); звичайні високоміцні сталі, такі як гартовані при охолодженні і та високоміцні, низьколеговані сталі (HSLA); вдосконалені високоміцні сталі (AHSS), такі як двофазні та пластичні сталі з трансформацією. Додаткові сталі з більш високою міцністю включають сталі для пресового загартування та сталі, розроблені для унікальних застосувань, які мають покращені характеристики розтягування кромки та розтягування-згинання.

Другим способом класифікації, важливим для конструкторів деталей, є за міцністю сталі. Основна відмінність між звичайними сталями HSLA та AHSS полягає в їхній мікроструктурі. Звичайні сталі HSLA є однофазні феритні сталі з потенціалом для деякої кількості перліту в сталях C-Mn. AHSS - це в першу чергу сталі з багатофазною мікроструктурою, що містить одну або кілька фаз, відмінних від фериту, перліту або цементиту, наприклад, мартенсит, бейніт, аустеніт та/або залишковий аустеніт у кількостях, достатніх для отримання унікальних механічних властивостей. Деякі типи AHSS мають більш високу здатність до деформаційного зміцнення, що призводить до балансу міцності та пластичності, що перевищує звичайні сталі. Інші типи мають надвисоку межу плинності та межу міцності на розтягування та гартуються при охолодженні.

Попередні дослідження щодо вибору матеріалів для автомобільних кузовів розглядали як композитні, так і алюмінієві альтернативи, але завжди знаходили сталь найбільш економічно ефективним варіантом при обсягах виробництва, що зустрічаються у переважній більшості моделей транспортних засобів [11, 15, 17]. Сталь довгий час була основним матеріалом вибору автовиробників по всьому світу. Вона забезпечує бажані стандарти міцності та безпеки для транспортних засобів за відносно низьких витрат у порівнянні з іншими матеріалами. Однак, зважаючи на глобальне потепління та зміни клімату, на автовиробників чиниться все більший тиск з метою дотримання суворих правил, що стосуються викидів та паливної економічності їхніх автомобілів. Регулюючі органи у різних частинах світу зараз намагаються вирішити цю проблему, встановлюючи обмеження на викиди автомобілів та стандарти економії палива .

Автовиробники все більше уваги приділяють тому, як ефективно зменшити вагу автомобілів, щоб скоротити викиди транспортних засобів. Це викликало необхідність інтелектуальних інновацій, які можуть замінити традиційний сталевий матеріал. Хоча алюміній легкий, він не має необхідної міцності і коштує набагато дорожче. Коли справа доходить до зосередження

на матеріалі, який може підвищити паливну економічність і якість, не жертвуючи при цьому довговічністю та доступністю, то потрібна AHSS. Ця сталь нового покоління має велику потужність, забезпечуючи високу міцність, легкість і довговічність одночасно, зберігаючи формованість, яка має вирішальне значення для виробничого процесу.

З постійним розвитком технологій у цій галузі застосування AHSS в автомобілях буде лише розширюватись. Крім автомобільної промисловості, є низка інших галузей, які можуть виграти від розробок у галузі передових високоміцних сталей – суднобудування, аерокосмічна промисловість, енергетика та інфраструктура. Безпека при зіткненнях, економія палива, підвищення продуктивності двигуна та максимальні швидкості внаслідок зниження ваги – ось причини, через які AHSS – це майбутнє.

### 1.1.2 Аналіз наукової інформації щодо виплавки низьковуглецевої сталі

Процеси виробництва заліза та сталі за порівняно короткий час зазнали великих технологічних змін, пов'язаних з використанням технічно чистого кисню і електричної енергії та способів її перетворення в теплову. Ці та інші події різко вплинули на спосіб виготовлення сталі, ціну, якість та асортимент виробленої продукції та змінили основну структури галузі [18-21]. Поступове зникнення мартенівського виробництва та мала питома витрата брухту в конвертерному переділі, створило об'єктивні передумови для паралельного розвитку високопродуктивних способів виробництва сталі в дугових сталеплавильних печах, що дозволяють переробляти значну кількість брухту. Здешевлення електроенергії забезпечило економічну ефективність виробництва в дугових сталеплавильних печах сталей масового сортаменту.

Важливе місце в продукції металургійних підприємств, яку постачають автомобілебудуванню, належить тонкому холоднокатаному листу для глибокої та особливо складної витяжки [19, 20, 22]. Для його одержання використовують ультра низьковуглецеві сталі типу 01ЮТ, 01ЮТА. IF-сталь (Interstitial Free Steel) – сталь, вільна від атомів впровадження) має феритну

структуру без атомів впровадження в кристалічних ґратах  $\alpha$ -заліза. Елементи впровадження в ґрати заліза (вуглець, азот, сірка), а також ті, які не вдається повністю видалити із металу в процесі його виплавки, повинні бути зв'язані в міцні хімічні сполуки, які присутні в металі у вигляді неметалевих включень, причому вміст цих включень також повинен бути мінімальним.

Практично всі ІF-сталі виплавляють в конвертерах з комбінованою продувкою киснем і аргоном [21, 22]. Близько 70% сталі в даний час виробляється за допомогою різних варіантів основних кисневих конвертерів [21-24]. Конвертерна техніка продування, методологія керування процесом, конструкція печі та довговічна футеровка відіграють ключову роль у оптимальному виробництві сталі, включаючи оптимальне досягнення бажаного кінцевого складу та температури сталі [24].

Особливістю технології безперервної розливки низьковуглецевої сталі є ковшова обробка ІF-сталі на вакууматорах циркуляційного типу та на агрегаті ківш-піч [25]. Для оцінки якості макроструктури металу використовують середню величину ступеню розвитку осьової рихлості, тріщин, що перпендикулярні граням заготовки, та точкову неоднорідність. Для підвищення якості мікроструктури литого металу доцільно розливати метал при температурі, що перевищує температуру ліквідус не більше ніж на  $25^{\circ}\text{C}$  [22, 26].

Застосування вакууматорів, що дозволяють отримати сталі з наднизьким вмістом вуглецю в конверторному виробництві основних металургійних підприємств, які виробляють автолистові сталі, відкриває нові можливості для виробництва високоштампованих наднизьковуглецевих сталей та сталей підвищеної міцності. Одним з основних обмежень хімічного складу малокремністих автолистових сталей є регламентований вміст кремнію (на рівні слідів), оскільки кремній підвищує межу текучості та межу міцності, але знижує відносне подовження сталі [26, 27]. Отримання об'ємних заготовок з нано- або ультрадрібнозернистою (НС, УДЗ) структурою сталей методами інтенсивної пластичної деформації (ПД) – один з перспективних напрямів у

галузі наноматеріалів [28]. Закордонними вченими досліджені питання впливу режимів крутіння під гідростатичним тиском (КГТ) на формування структури та властивостей сталей [28, 29]. Також представляють науковий інтерес дослідження механічних властивостей НС та УДЗ структури матеріалів методом наноіндентування [30] та визначення відносної кількості (спектрального складу) границь у феритній складовій конструкційних сталей.

Якщо стосовно методів прокатки автолистових сталей приділено значну увагу, то виплавка сталі викликає ряд питань. Найбільш детально описана технологія виробництва IF-сталі фірмою Voest-Alpine Stahl Linz GmbH [31], яка виплавляє IF-сталь в конвертерах місткістю 150 т з наступною обробкою металу на приладі циркуляційного вакуумування. Основними вимогами до виплавки IF-сталі фірмою є: досягнення мінімального вмісту домішкових елементів – кисню, азоту, сірки, вуглецю, фосфору; дотримання вимог до ступеню чистоти металу за оксидами, сульфідами та нітридами; зв'язування в міцні неметалеві включення кисню, азоту, сірки та вуглецю за допомогою титану та ніобію; забезпечення мінімального сумарного вмісту супутніх елементів – міді, нікелю, хрому, молібдену, олова, цинку, ванадію та свинцю; мінімізація витрат алюмінію; запобігання вторинного окислення металу, насичення азотом та науглецювання. Із конвертеру випускається нерозкислений рідкий метал. Безпосередньо перед випуском вимірюється активність кисню, що дозволяє додавати у ківш при випуску точну кількість вуглецю та мати перед вакуумуванням оптимальне співвідношення вмісту вуглецю та кисню в металі – 0,02...0,03% та 0,04...0,05% відповідно. При вакуумній обробці протягом 15 хвилин вміст вуглецю знижується до 0,0018%. Після добавки розкислювачів та феросплавів вміст вуглецю в металі може збільшитись. На машини безперервного лиття заготовок розплав подається із вмістом вуглецю 0,0022%. Застосування донної продувки забезпечує низький вміст азоту в металі 0,0020...0,0025%. Для отримання низького вмісту сірки в металі в конвертерній плавці використовують чавун з мінімальним вмістом сірки та спеціально відібраний скрап. Ці заходи гарантують, що до кінця

продувки вміст сірки складає в середньому 0,005%. Запобігають попадання в ківш конвертерного шлаку, який зменшує можливість зниження концентрації сірки.

На підприємстві фірми Thyssen Krupp Stahl в Беккервете ІF-сталь виплавляють в 265-тонних конвертерах [32]. Після закінчення продувки плавки випускають без відбору проби. За динамічною моделлю продувки розраховується вміст вуглецю на випуску і за моделлю легування розраховується кількість вуглецю, яку необхідно ввести у ківш для попереднього розкислення. Метою попереднього розкислення є отримання вмісту вуглецю в межах 0,02...0,025% і вмісту кисню 0,045...0,050%. При вакуумуванні сталі на стадії зниження тиску при перевищенні чи недосягненні встановленого вмісту кисню та вуглецю в вакуум-камеру додають вуглець для попереднього розкислення. Мета полягає в тому, щоб із встановленням самого низького вмісту вуглецю перед розкисленням отримати низький вміст кисню. В середньому досягається вміст вуглецю менше 0,002%. Вміст кисню становить приблизно 0,025%.

Вуглець і азот, які залишились в металі після вакуумування, зв'язуються титаном і ніобієм, вміст яких встановлюється на кожній плавці індивідуально в залежності від вмісту вуглецю і азоту, що очікуються. При цьому прагнуть отримати можливо більш низький вміст цих легуючих елементів для того, щоб забезпечити здатність сталі до розливання. З цієї причини важливо, щоб вміст азоту був низьким. Вміст азоту в пробах готового металу у 75% випадків був нижче 0,0025%.

На деяких металургійних підприємствах циркуляційний прилад вакуумування обладнаний газокисневою фурмою, що дозволяє здійснити підведення кисню через водоохолоджуючу фурму у вакуумну камеру. Киснева продувка в процесі вакуумного зневуглецювання при виплавці особливо низьковуглецевої сталі переслідує дві мети: активізація хімічної реакції шляхом підведення газоподібного кисню в першій половині процесу, коли лімітуючим фактором реакції зневуглецювання є підведення кисню;

допалювання в вакуумкамері газоподібного CO, який утворюється в ході реакції зневуглицювання, та використання теплоти, яка виділяється, для компенсації охолодження сталі. З підведенням кисню з'являється можливість досягати кінцевого вмісту вуглецю за менший час чи за той же час провести зневуглицювання при більш високому вихідному вмісті вуглецю. За даними багатьох фірм, завдяки такій можливості вдалось пом'якшити вимоги до вихідних умов чи до параметрів випуску металу із конвертера. Можливість запобігти переокисленню в конвертері та знизити температуру випуску приблизно на 20<sup>0</sup>C, що має позитивний вплив на стійкість футеровки конвертеру.

Інколи застосовують прилад циркуляційного вакуумування обладнаний фурмою з продувкою киснем зверху. Фурму з соплом Лаваля вставляють через купол вакуумної камери і опускають до висоти 3,5 м від донної поверхні футеровки. Кінцевий вміст вуглецю менше 0,003% з кисневою продувкою досягли за менший час, ніж без продувки. До впровадження кисневої продувки в вакуум-камері кінцевий вміст вуглецю в металі в конвертері повинен бути не вище 0,05%, а кінцевий вміст кисню – не нижче 0,07%. При застосуванні продувки киснем в вакуумній камері кінцевий вміст вуглецю в сталі в конвертері підвищили до 0,10%, а вміст кисню знизили до 0,04%, при цьому кінцеву температуру сталі в конвертері знизили на 25...30<sup>0</sup>C.

В киснево-конвертерному виробництві Shanghai Baosteel Group (КНР) освоєно випуск автолистових IF-сталей із вмістом вуглецю не більше 0,0025% та азоту не більше 0,0025%. Продукція призначена для виробництва внутрішніх і лицьових деталей автомобіля [20]. На цей час на заводі існують дві лінії киснево-конвертерного виробництва (BOF), позапічної обробки на приладах ківш-піч (LF) и циркуляційного вакуумування (RH), з розливкою на двох двострумкових приладах (CC) та двох однострумкових (FTSC – Flexible Thin Slab Cast, поставки компанії Danieli, Італія) за наступними схемами:



Технологічна схема BOF → CC на стадії конверторної плавки включає випуск металу без розкислення (вміст кисню в межах 0,050-0,060%), електронагрів плавки на приладі ківш-піч, природне вакуумне зневуглецювання з наступним легуванням та безперервну розливу із захистом струменю металу, який дозволяє виробляти IF-сталь із вмістом вуглецю менше 0,0022 % та азоту менше 0,0030%. Технологічна схема BOF → FTSC включає випуск конверторної плавки з повним розкисленням, утворення відновлювального шлаку на приладі ківш-піч, примусове кисневе зневуглецювання з наступним додатковим легуванням на стадії вакуумування та безперервну розливу із захистом струменю [20].

## 1.2 Сучасний стан інтенсифікації плавки сталі в електродугових печах

Застосування електродугової печі (ЕДП) для виробництва сталі має значний потенціал для розвитку та забезпечує можливість виробляти сталеву продукцію з меншими викидами CO<sub>2</sub>, завдяки переробці та утилізації значної кількості металобрухту [33-35]. В останній час зростає кількість марок сталі, які виробляються в електродуговій печі [36, 37]. Виробництво високоякісної сталі у ЕДП має труднощі, пов'язані з одержанням сталі з низьким вмістом фосфору, азоту та кисню [38-40]. Під час завантаження брухту реакція вуглецю та кисню у розплавленій ванні є недостатньою, що призводить до відсутності бульбашок CO, зменшення перемішування ванни та з труднощами видалення азоту та переокислювання розплавленої сталі [35, 41-45].

Сучасні електродугові печі – це гнучкі та ефективні установки для виробництва високоякісної сталі. З розвитком сталеливарної промисловості в найближчі десятиліття (з метою досягнення нульових викидів вуглекислого газу) все більше уваги приділятиметься енергоспоживанню та викидам

електродугових печей. У 2023 році 29% світового виробництва сталі вироблено з використанням електродугових печей (ЕДП) [46]. Очікується, що частка виробництва з використанням ЕДП зростатиме в міру того, як сталеливарна промисловість переходитиме до зниження своєї вуглецевої місткості. Перехід від доменно-кисневої технології (ДП-КП) до комбінації виробництва заліза шляхом прямого відновлення “зеленим” воднем і виробництва сталі з використанням ЕДП ( $H_2DRI$  - EAF) вимагатиме значно більше електроенергії: близько 3,5 МВт·год на тонну нерафінованої сталі, виробленої за технологією  $H_2DRI$ -EAF.

Одним із найважливіших показників енергоефективності дугової печі є споживання електроенергії на тонну рідкої сталі. Залежно від конструктивних особливостей дугової печі, технології плавки, засобів інтенсифікації плавки значення питомих витрат варіюються від 300 до 450 кВт·г/т [47-52]. Для зниження питомих витрат на електроенергію використовуються деякі організаційно-технічні заходи, включаючи попередній нагрів шихти димовими газами (електродугова піч Tenova Consteel®процес), збільшення питомої встановленої потужності трансформаторів печі до 1,0–1,2 МВт/т (інтенсифікація електричного режиму на стадії плавки шихти), збільшення частки рідкого заліза, розширення використання новітньої технології плавки «піч-ківш» тощо. Як стверджується авторами [49], концепція підвищення енергоефективності дугової печі заснована на комплексі рішень: збільшення питомої введеної потужності за рахунок зниження садки при даній продуктивності; зменшення коефіцієнта форми ванни (відношення діаметра до глибини) з традиційного 5 до 2,5 і, відповідно, її поверхні, що випромінює, шляхом поглиблення; оптимізація відносної площі охолоджуваної поверхні стін і зводу, де не використовується масивна теплоємна футеровка; застосування енергозберігаючих водоохолоджуваних елементів із просторовою структурою, що сприяє утворенню теплоізолюючого й теплоакумуючого гарнісажу. Крім того, збільшення встановленої потужності прискорює стадію плавлення [46], а застосування елементів

бічної стінки та даху з водяним охолодженням, допоміжні пальники та металургійні модифікації забезпечують більш високу концентрацію потужності під час плавлення.

Електродугова технологія виплавки сталі [47-54] застосовує різноманітні вхідні матеріали, включаючи залізо прямого відновлення, карбід заліза та гарячий метал, а також різні види вхідної енергії – газ, нафта та вугілля на додаток до електроенергії. Велика кількість різноманітних удосконалень, що стосуються технології процесу та компонентів печі, сприяли успіху плавки в ЕДП: технологія надвисокої потужності, практика спінювання шлаку, свод та стіни з водяним охолодженням, покращені графітові електроди, технологія постійного струму, попередній нагрів брухту, подвійний кожух печі та складний контроль процесу. Як стверджує автор, подальших удосконалень можна досягти, вводячи молекулярні гази в дуги, що призведе до підвищення напруги, а при постійній потужності – до зниження струму, що, у свою чергу, зменшить знос графітового електрода.

Для підвищення ефективності виробництва сталі в електродугових печах, економії енергії та зменшення споживання авторами [55] було проведено аналіз енергоефективності виробництва сталі в електродугових печах. Встановлено, що оптимізація системи подачі кисню та живлення призводить до підвищення енергоефективності, скорочення часу подачі електроенергії, скорочення циклів плавки, а також досягнення зниження витрат і підвищення ефективності процесів плавки.

Розглянуто [56] ряд енергетичних інновацій для виплавки сталі в ЕДП: попередній нагрів брухту з використанням вертикальних і горизонтальних шахтних печей; ковшові та подвійні підігрівачі; утилізація тепла гарячих шлаків; збільшення вилучення металу при встановленні локалізованої концентрації Fe в первинних кристалах шпінелі, що дозволяє відокремити кристал, багатий на Fe, від аморфної фази, збідненої Fe; перетворення теплової енергії CO/CO<sub>2</sub> газів, що відходять від ЕДП, у хімічну енергію.

Аналіз потоку енергії у поєднанні з аналізом потоку маси дозволяє відстежувати вплив на споживання енергії та втрати заліза [57].

Електричні печі мають істотні переваги в порівнянні з іншими сталеплавильними агрегатами, тому високолеговані інструментальні сплави, нержавіючі шарикопідшипникові, жаростійкі і жароміцні, а також багато конструкційних сталей виплавляють тільки в цих печах [58, 59]. Потужні електропечі успішно застосовують для отримання низьколегованих і високовуглецевих сталей мартенівського сортаменту, отримувати різні феросплави. Інтенсифікацію плавки сталі в ЕДП здійснювали шляхом поступового збільшення потужності пічних трансформаторів та вдосконалення конструкції дугового печі і механізмів, що забезпечують її роботу. Поява в середині ХХ століття газоподібного кисню на металургійних підприємствах дозволило інтенсифікувати процес окислення вуглецю і скоротити тривалість окислювального періоду плавки. Питома потужність електропічних установок продовжує зростати, удосконалюються конструкція дугових печей, електрообладнання та електричні режими плавки, поліпшується якість застосовуваних вогнетривів і електродів, широкого поширення набуває позапічна обробка сталі, скорочується тривалість плавки і витрата електроенергії.

У сучасному електросталеплавильному виробництві використовують різні способи інтенсифікації процесу плавки, застосовуючи ці способи як окремо, так і комплексно [53]: застосовують паливно-кисневі пальники для підігріву і прискорення розплавлення брухту в робочому просторі печі [60-62]; проводять окислювання вуглецю, що додатково вводиться в піч, газоподібним киснем з метою збільшити прихід тепла [63]; окислюють частину заліза та інших елементів шихти газоподібним киснем для збільшення приходу тепла від екзотермічних реакцій і прискорення формування окисного основного шлаку [64]; застосовують спеціальні фурми

для допалювання CO в робочому просторі печі з метою збільшити прихід тепла від окислення вуглецю [65]; використовують газоподібний кисень для прискорення окислення вуглецю металу в окислювальний період плавки [66]; проводять донну або глибинну продувку ванни інертним газом (іноді киснем) для прискорення плавлення, нагрівання металу і окислювання вуглецю, а також зменшення угару заліза [67, 68]; використовують рідкий чавун в якості складової шихти для прискореного розплавлення брухту за рахунок фізичного тепла і додаткового приходу тепла від окислення домішок чавуну; підігрівають лом, використовуючи фізичне тепло відхідних пічних газів [69]; проводять чисто технологічні та організаційні заходи для прискорення розплавлення шихти і нагрівання металу [61-64]: робота із рідким залишком, використання спіненого шлаку, спеціально підготовленого брухту та інше [70-72].

Застосування різних способів інтенсифікації в сучасних електросталеплавильних цехах привело до суттєво зростання питомих витрат альтернативних енергоносіїв: витрата природного газу становить 8-10 м<sup>3</sup>/т сталі; коксу або вугілля (кускового і порошкоподібного) 2-14 кг/т; газоподібного кисню 30-45 м<sup>3</sup>/т. В зв'язку з цим, наприклад, на надпотужних 100-т печах тривалість плавки скоротилася до 40-60 хв.; при цьому питома витрата електроенергії становить 320-420 кВт-год/т, електродів 1,42 кг/т, однак зменшився вихід рідкого металу до 92% маси завантажених залізовмісних шихтових матеріалів для сучасних печей.

Якщо навіть прийняти вміст заліза в брухті рівним 98% (решта 2% – неметалеві складові), то не менше 6% заліза шихтових матеріалів втрачається під час плавки, причому значна кількість заліза втрачається саме в результаті інтенсифікації процесу плавки (при виробництві сталі в старих дугових печах, які працювали за класичною схемою без інтенсифікації плавки, вихід придатного металу по залізу становив 96-96,5%). З сучасної

надпотужної дугової печі виноситься з газами у вигляді пилу до 1,5% заліза шихтових матеріалів (вміст заліза в пилу близько 50% і більше). При кратності пічного шлаку порядку 0,10...0,12 і середньому вмісті оксидів заліза в шлаку 25% зі шлаком втрачається до 2,5% заліза шихти. Решта 2-3% заліза шихтових матеріалів губляться у вигляді корольків і скрапін металевого заліза, що потрапляють в шлак.

Використання різних альтернативних видів енергії в сучасній надпотужній дуговій печі нерівноцінні з урахуванням величини експлуатаційних витрат і впливу на собівартість металу, що виплавляється. Економічна ефективність застосування конкретного виду альтернативної енергії при виплавці сталі в дуговій печі в значній мірі визначається вартістю одного кВт·год теплової енергії, засвоєної продуктами плавки (металом і шлаком) з урахуванням цін на конкретні енергоносії.

У сучасній надпотужній дуговій печі, частка енергії спалювання природного газу в газокисневих пальниках в прибутковій частині балансу порівняно невелика і знаходиться на рівні 10%. Пов'язано це з тим, що на більшій частині сучасних дугових печей встановлені стаціонарні стендові газокисневі пальники, потужність і тривалість роботи яких обмежені через недопал палива, що виникає при проходженні продуктів повного згоряння природного газу через нагрітий лом. Залізо при цьому окислюється, а  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  відновлюються до  $\text{CO}$  і  $\text{H}_2$ .

При підвищенні температури брухту і наближенні до температури його плавлення, що швидко досягається в порівняно невеликих обсягах шихти, прилеглих до стаціонарних пальників, недопал палива різко зростає. Тому стаціонарні стінові пальники можуть ефективно працювати не більше 15 хв від початку плавлення, а підвищення їх одиничної потужності ще більш скорочує тривалість роботи пальників. Для збільшення кількості тепла, переданого шихті пальниками, деякі зарубіжні фірми йдуть по шляху

підвищення сумарної потужності пальників шляхом збільшення числа відносно малопотужних пальників і їх розосередження по периметру і висоті печі. Наприклад, на 90-т дуговій печі Danarc встановлені 12 пальників: нижній рівень – 8 пальників потужністю по 3,5 МВт, верхній рівень – 4 пальника потужністю по 3,5 МВт. Загальна потужність пальників становить 42 МВт, майже половину потужності двох використовуваних трансформаторів ( $2 \times 43,5$  МВ-А) [62]. Але збільшення числа пальників створює певні труднощі щодо їх розміщення в стінах печі, ускладнює конструкцію печі і збільшує витрати на її обслуговування.

Вигідніше піти шляхом збільшення одиничної потужності газокисневих пальників, виконавши їх поворотними, здатними в значних межах змінювати напрямок факела. При роботі такого пальника факел переміщується від уже нагрітих до відносно холодних мас брухту. У результаті зона дії факела збільшується в кілька разів і в стільки ж разів може бути збільшена корисна потужність пальника.

Компанія Acciaierie Bertoli Safau, Італія, встановила електродугову піч Danarc Plus M2 на сталевому заводі Acciaierie Bertoli-Safau (ABS) в Італії, де вона зарекомендувала свою ефективність [73, 74]. Піч постійного струму обладнана одноразовим завантаженням металевої шихти з попереднім підігрівом брухту, з контролем викидів та повною автоматизацією, хімічним очищення газу, контролем шуму печі. Піч із масою металу 90 т була введена в експлуатацію в 1999 році. Отримані результати роботи відповідають проектним значенням, що чітко показує енергетичні переваги попереднього нагріву брухту.

Через складність обслуговування сводові поворотні пальники на сучасних надпотужних печах не застосовують. Більш ефективним варіантом є використання факела, який змінює напрямки, установкою високо

потужного поворотного пальника в еркері печі [61]. Потужність такого пальника для 100-т печі може бути в межах 15-20 МВт.

У поєднанні з поворотним віконним пальником потужність двох пальників може досягти 30 МВт, що дозволяє замінити 6-8 стаціонарних стінових пальників, забезпечивши при цьому отримання більш високих результатів (скорочення тривалості плавлення брухту, зниження витрат електроенергії). Значне збільшення частки альтернативного тепла від спалювання природного газу може бути забезпечено в ЕДП зі спеціально влаштованими еркерами для введення в робочий простір печі потужних поворотних газокисневих пальників. Найбільш ефективно ідея використання тепла газокисневих пальників в робочому просторі реалізується в концепції двох стадійного процесу плавки сталі в так званій паливно-дуговій печі, що викладено в роботах [62-64]. Електродугові печі дуже швидко вдосконалюються. Опис сучасних нововведень представлено в роботі [61], в якій наведено критичний аналіз цих нововведень, що допомагає вибрати найбільш ефективні з них для успішної реалізації.

Таким чином, існуючі способи інтенсифікації плавки сталі в електродугових печах досить різноманітні. Так, використання різних «альтернативних» джерел тепла для інтенсифікації процесів плавки сталі в сучасній дуговій печі, не повинно бути пов'язано за великими експлуатаційними затратами і впливом на власне виробництво металу. Найменша вартість одного кВт·год теплової енергії, яка передається металу і шлаку, забезпечується при спалюванні природного газу в пічних газокисневих пальниках [75]. Найбільшу високу цінність має енергія, наявна в робочому просторі печі від окислення заліза шихтових матеріалів газоподібним киснем. Для зменшення втрат по переділу при виплавці сталі процеси виробництва металу в дуговій печі бажано організувати так, щоб збільшити частку енергії, яку вносять в робочий простір газокисневими

пальниками, і, по можливості, зменшити кількість заліза, що окислюється по ходу плавки киснем, не зменшуючи, істотно продуктивність. Необхідно враховувати можливості збільшення кількості пічних газів, що відходять, при зменшеній кількості пилу у випадку значного збільшення потужності газокисневих пальників [75].

Електродугова піч, очевидно, єдиний сталеплавильний агрегат, який все ще має великі можливості для модифікацій, як з точки зору загальних обсягів виробництва, так і з точки зору технології. У нещодавньому опублікованому проекті робочої групи Міжнародного Інституту чорної металургії містяться прогнози про збільшення виробничих потужностей електродугових печей за період з 1998 по 2010 р.р. на 80 мегатонн, при цьому велика частка цього приросту припаде на виробництво листової сталі. Таке різке збільшення капіталовкладень у виробництво сталі в електродугових печах повинно стимулювати розвиток нових технологій, заснованих на таких екологічно ефективних розробках, як попередній нагрів скрапу до високих температур, герметичні печі, ефективне очищення відхідних газів для зниження рівня діоксинів до нуля.

### 1.3 Організація позапічної обробки IF-сталі у сучасній металургії

У виробництві низьковуглецевої сталі ефективне видалення вуглецю є важливим кроком, який суттєво впливає на якість та ціну кінцевого продукту; тому багато уваги приділяється видаленню вуглецю з рідкої сталі. Коли вміст вуглецю в рідкій сталі досягає дуже низького значення, реакція між [C] та [O] майже не відбувається при нормальному тиску. До появи вакуумної обробки найнижчий вміст вуглецю становив близько 0,02%, а вміст кисню досягав 0,10% або більше. За допомогою вакуумної термічної обробки рідкої сталі

можна знизити вміст вуглецю до менш ніж 0,005% ( $\approx 50$  ppm). Зневуглецювання в конвертері відбувається таким чином, що вміст вуглецю може бути зменшений мінімум до 0,02-0,04%, після чого рідка сталь переходить на обробку RH для безперервного виробництва наднизьковуглецевої (ULC) сталі. Коли вміст вуглецю у рідкій сталі досягає дуже низького значення, реакція між [C] та [O] майже не відбувається при нормальному тиску. До появи вакуумної обробки найнижчий вміст вуглецю в сталі становив близько 0,02%, а вміст кисню досягав 0,10% або більше. Можна знизити вміст вуглецю до менш ніж 0,005% (50 ppm) за допомогою вакуумної термічної обробки рідкої сталі, тому дегазатор RH є потенційним процесом і забезпечує високу продуктивність одержання ULC сталі. Вміст вуглецю може бути зменшений до мінімум 0,02-0,04%, після чого рідка сталь переходить на обробку киснем для безперервного зневуглецювання. При такому низькому рівні вуглецю необхідно подавати кисень або/та створювати вакуумну атмосферу або/та збільшувати турбулентність рідкої сталі, щоб підвищити швидкість зневуглецювання.

При виплавленні сталі із вмістом вуглецю не більше 0,07%, масова доля його після закінчення продувки не перевищує 0,06%, а для металу з наступною обробкою на вакуумному приладі – 0,05% та менше. На початку випуску плавки у ківш вводиться алюміній у кількості до 25% від загальних витрат. При наповненні ковшу металом вводиться навуглецьовувач, а потім при наповненні ковшу – всі феросплави, які містять хром, марганець, кремній, фосфор і ванадій. Після цього вводиться алюміній, що залишився, а потім мікролегуючі добавки (феротитан, феробор, силікокальцій, фероніобій, рідкоземельні метали). Присадка розкислювачів закінчується при наповненні ковша металом. Під час зливу металу із конвертера здійснюється також обробка металу твердою шлакоутворюючою сумішшю [77]. Суміш складається із вапна (80-85 % від загальної кількості) та плавикового шпату. Витрати шлакоутворюючої суміші складає 5-8 кг/т. Після цього ківш з

металом транспортується на ділянку позапічної обробки, де здійснюється доводка металу за хімічним складом і температурою.

Схеми обробки металу на всіх агрегатах позапічної обробки не відрізняються [78]. На початку обробки здійснюється продувка металу аргоном через верхню фурму чи шаруваті вставки у днищі ковшу. Тривалість продувки складає приблизно 3 хвилини. Вводиться розрахункова кількість алюмінію: для низьковуглецевої сталі – 280 кг, для вуглецевих – 280-320 кг. Після цього здійснюється вимірювання температури та відбір проби металу. Після отримання результатів хімічного аналізу, здійснюється коректування хімічного складу металу шляхом присадки феросплавів і алюмінію. Після отримання результатів хімічного аналізу металу здійснюється коректування хімічного складу металу. Якщо температура металу після обробки перевищує температуру, замовлену з машини безперервного лиття заготовок, то здійснюється охолодження металу за допомогою сляба із низько вуглецевої сталі. Після отримання потрібного хімічного складу і температури ківш з металом транспортується на машину безперервного лиття заготовок.

При позапічній обробці сталі з використанням установки «піч-ківш» схема відрізняється від вказаної вище. При необхідності на даному приладі здійснюється десульфурація металу та електронагрівання з метою підвищення температури. Для проведення десульфурації на установці «піч-ківш» наводиться «білий» високоосновний шлак шляхом присадки шлакоутворюючих матеріалів (вапна і плавикового шпату). Витрати шлакоутворюючих матеріалів складають ~ 10 кг/т. Шлакоутворюючі матеріали вводяться порціями по 0,4 кг/т. Тривалість десульфурації металу складає 40-60 хвилин, а ступінь десульфурації – приблизно 60%. Електронагрівання металу на приладі «піч-ківш» проводиться під час очікування результатів хімічного аналізу із лабораторії аналітичного

контролю. Швидкість нагрівання металу складає 2-4 град/хв, а тривалість визначається підвищенням температури, що вимагається.

Для дегазації металу застосовують циркуляційний прилад вакуумування сталі. Перед початком вакуумування футеровку вакуумної камери нагрівають до 1500-1600°C. Ківш з металом встановлюється під вакуумну камеру, а потім обидва патрубки камери занурюються в метал. Після утворення в камері розрядження метал підіймається на висоту ~ 1,4 м. При цьому у патрубках подається аргон з витратою 60-70 м<sup>3</sup>/годину і здійснюється вакуумне знеуглецювання сталі. Тривалість вакуумної обробки складає 20-30 хвилин. За час обробки вміст вуглецю знижується з 0,05% до 0,01% [77, 78]. Охолодження металу під час знеуглецювання складає 30-50°C. Якщо температура металу недостатня, то ківш з металом транспортують на установку «під-ківш», де проводять нагрів металу до потрібної температури.

В результаті високоефективної позапечної обробки сталі стало можливо появлення нового класу IF-сталей з невеликою кількістю карбідотвірних елементів (титан, ніобій, бор), що дозволяє повністю виключити наявність вільних атомів впровадження (вуглецю та азоту) в кристалічних ґратах при будь-яких умовах охолодження після прокатки та термічної обробки та суттєво підвищити пластичні властивості, реформованість та штампованість металопродукції.

1.4 Автолистові сталі для глибокої витяжки без атомів впровадження в кристалічній решітці фериту

IF-сталі – це сталі, які набули широкого вжитку з відносно високою міцністю і достатньою пластичністю, застосування яких дозволило зменшити масу автомобіля, витрати палива і емісію вуглекислого газу в

навколишнє середовище [81, 82]. В даний час велика кількість металевих деталей при виробництві побутової техніки та кузовів легкових автомобілів отримують із тонкого холоднокатаного сталевго листа методами штамповки та глибокої витяжки. Основні вимоги до листових сталей для глибокої витяжки – підвищена реформованість, висока міцність та якість поверхні виробів. Даним вимогам задовольняють ІF-сталі, досягнення властивостей у яких визначається вимогами за хімічним складом – надверхнизьким вмістом вуглецю, азоту, низьким вмістом домішок кольорових металів ( $Cr < 0,03\%$ ,  $Cu < 0,03\%$ ), кремнія ( $Si < 0,2\%$ ), сірки ( $S < 0,01\%$ ), так і вимогами до механічних властивостей та якості поверхні листа. Закордонні виробники отримують в ІF-сталях наднизькі концентрації вуглецю менше  $0,002\%$  і азоту менше  $0,002\%$ , що забезпечує підвищені пластичні властивості та добру штампованість. Одним з важливих критеріїв якості сталі є чистота за неметалевими включеннями.

На цей час технології, які використовуються на металургійних підприємствах, не дозволяють отримувати наднизький вміст вуглеці та азоту в кінцевому продукті. Вибір марок сталей, які використовуються в кузові сучасного автомобіля, здійснюється на основі норм безпеки, експлуатаційних характеристик та економічних критеріїв для кожної окремої деталі [79].

Стандартною технологією виплавки ІF-сталей в киснево-конверторному цеху є виплавка напівпродукту в кисневому конвертері. При випусканні металу із конвертора для розкислення, легування та наведення шлаку в ківш додають алюміній, металевий марганець або феромарганець, а також вапно. Далі метал рафінують на циркуляційному вакууматорі і проводять мікролегування ніобієм і титаном на агрегаті ківш-піч [80].

Пластична анізотропія холоднокатаного листа незмінно збільшується. Коефіцієнт нормальної анізотропії холоднокатаних листів для деяких марок сталі виріс до  $R=2,2-2,4$  [83]. Тонкі сталеві листи, що застосовуються в

автомобілебудуванні, можна розділити на три групи: традиційні сталі для холодного штампування ( $\sigma_T < 210$  МПа,  $\sigma_B < 340$  МПа); високоміцні сталі ( $\sigma_T > 210$  МПа,  $\sigma_B > 340$  МПа); особливоміцні сталі ( $\sigma_T > 550$  МПа,  $\sigma_B > 750$  МПа).

Холоднокатані і гарячекатані (травлені) автомобільні листові сталі постачаються зазвичай у відносно вузькому діапазоні товщин (0,5-4,0 мм) з відповідними показниками якості, які призначенні на виготовлення конкретних деталей, вузлів, панелей автомобіля. Якість автомобільної сталі оцінюють, перш за все, по її здатності до формозміни, за рівнем міцності, ступенем поглинання енергії руйнування, за величиною модуля пружності, здатності сприймати процес з'єднання деталей лазерним променем, по надійності зчеплення своєї поверхні з лакофарбовим покриттям, за рівнем корозійної стійкості.

Склад і рівень показників якості автомобільного листа зумовлюють застосування відповідних марок сталі для внутрішніх і зовнішніх панелей кузова (IF, BH, DP, CP), для елементів пасивної безпеки (HSLA, TRIP), для виготовлення несучих вузлів і силових деталей (Mart, MnB). В Україні до теперішнього часу сталі класу IF не виготовляються, що пояснюється, перш за все, відсутністю сталеплавильного цеху, який може забезпечити відповідну систему технологій виплавки, позапічної обробки і розливання сталі.

Вміст хімічних елементів, що визначають склад IF-сталі представлено в таблиці 1.1. Відносний обсяг мікролегуєчих елементів (титану і ніобію), які вводяться в сталь в залежності від фактичного вмісту в розплаві вуглецю, азоту і сірки визначається розрахунковим шляхом:

а) для сталі, мікролегованої титаном:  $Ti = (4C + 1,5S + 3,43N)$ , %;

б) для сталі, мікролегованої титаном і ніобієм:  $Ti = (2,4S + 3,43N)$ , %;  
 $Nb = 7,75C$  %. Допускається відхилення вмісту в сталі по титану + 0,03%, по ніобію + 0,02%.

Таблиця 1.1 -Хімічний склад IF-сталі, % (мас.) [77]

Вміст елементів, %									
C	S	P	Si	Cr	Ni	Cu	Mn	Al	N <sub>2</sub>
Не більше							0,20	0,030	0,005
0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005			

Жорсткі вимоги ринку до вмісту в сталі вуглецю, азоту і сірки на ряді металургійних підприємств ще більше посилюються в прагненні підвищити якість прокату в конкурентній боротьбі: не більше 0,003...0,004% C; 0,004% N і; 0,007% S.

#### 1.5 Залежність властивостей низьковуглецевої сталі від домішкових елементів

Виробництво IF-сталей успішно освоєно на металургійних підприємствах Європи, Америки. Ця сталь по своїй суті є добре дегазованим технічним чистим залізом, що має високу пластичність [78-81]. Запропонована в 70-х роках як сталь, ферит якої не містить атомів впровадження (C, B, N, H, O), пройшла тернистий шлях становлення в виробництві, перейшовши з класу м'яких в клас високоміцних сталей. Цей клас IF-сталей був розроблений в 90-х роках минулого століття. Створення його було продиктовано необхідністю звести до мінімуму ризик вм'ятин на зовнішніх панелях кузова: капота, крил, даху автомобіля, а також все більш наполегливими вимогами законодавчих організацій і ринку зменшити витрату палива за рахунок зменшення ваги кузова завдяки застосуванню тонких, але досить міцних листів.

Про характер і ступінь впливу на якість прокату хімічного складу ІF-сталі можна судити за наступними даними. Вплив вуглецю на основні показники властивостей гарячеоцинкованого металу показано на рис. 1.2 [82].

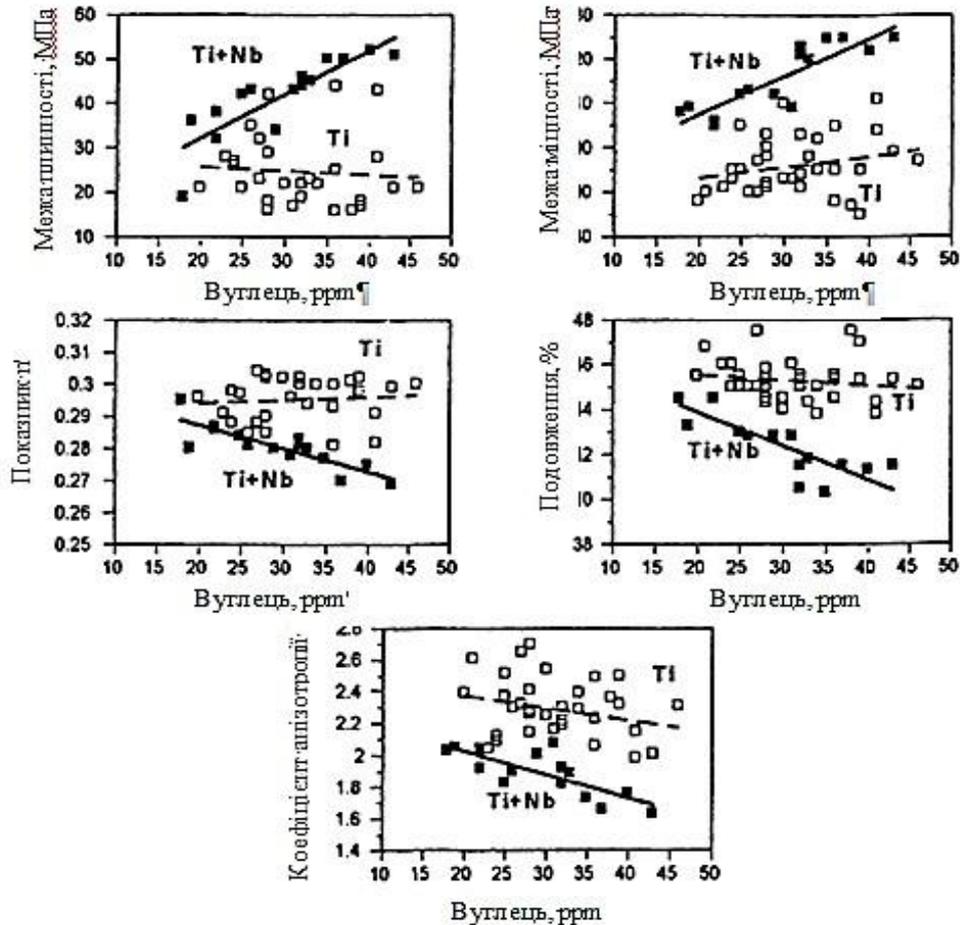


Рисунок 1.2 - Вплив вмісту вуглецю на механічні властивості ІF-сталі [82]

Згідно кривим, зміна вмісту вуглецю в сталі, мікролегованої Ti, не робить помітного впливу на властивості, відмічені координатами рисунків. У випадку, коли разом з Ti в мікролегуванні бере участь Nb, збільшення в сталі вмісту вуглецю помітно збільшує її міцність і зменшує пластичність, що пояснюється меншим розміром зерна фериту. Вміст в ІF-сталях сірки і азоту має бути мінімальним. Це дозволяє зменшити витрати титану на мікролегування.

Етап сталеплавильного переділу виробництва IF-сталей розвивається на металургійних агрегатах киснево-конвертерного цеху. Він формується з наступних основних технологічних процесів: підготовка чистих шихтових матеріалів (частина брухту замінюється твердим чавуном, витрата якого коливається в границях 75-85 кг/т сталі); десульфурація рідкого чавуну гранульованим магнієм, ежектуючим в заливний ківш в струмені азоту, що дозволяє зменшити вміст сірки в два-три рази, до 0,005%; рафінування розплаву в конвертері, з метою досягти мінімального вмісту в розплаві N, S, Si, Ni, Cu, Cr, так як на подальших стадіях виробництва сталі досягнуті концентрації зберігаються (S, Ni, Cu, Cr) або збільшуються (N, Si). Після витрачення на продувку ванни конвертера третьої частини загальної витрати кисню проводять проміжне скачування шлаку. Це дозволяє отримувати шлаки з основністю не нижче 3,2, що забезпечує низький вміст фосфору на рівні (0,006%) і в готовій сталі (0,008%), а також низький вміст сірки – на рівні (0,0096%) і в готовому розплаві (0,0078%). В кінці продувки, після закінчення інтенсивного зневуглицювання, витрата кисню збільшується на 150-200 м<sup>3</sup>/хв, а закінчення продувки проводиться при опущеній "спідниці" газоходу конвертера. Це дозволяє запобігти насичення розплаву азотом в кінці продувки і отримувати низький вміст його на рівні: від 0,0014% до 0,0036%.

Досягнення низьких концентрацій азоту в розплаві ускладнене тим, що він розчиняється в металі при високих температурах, особливо в зонах реакцій, що йдуть з виділенням значної кількості тепла. Інтенсивна деазотація може відбуватися тільки в ході інтенсивного зневуглицювання в ванні конвертера, де створюються умови для вимивання азоту з розплаву бульбашками спливаючих оксидів вуглецю. При цьому продування її необхідно виконати киснем, що містить не більше 0,1% азоту. Перед випуском розплаву з конвертера його температура зберігається на рівень

1700 ± 20°C, вміст вуглецю не перевищує 0,03-0,05% при продувці ванни зверху. При комбінованій продувці розплаву у ванні конвертера необхідно прагнути до вмісту вуглецю в сталі в межах 0,025...0,035% і її температурі 1650°C.

Застосування традиційної технології десульфурації розплаву під час випуску його з конвертера не доцільно, так як подальша технологічна операція глибокого зневуглецювання вимагає, щоб метал був з високим вмістом кисню. Тому особливість технології виплавки IF-сталей полягає в застосуванні шихтових матеріалів з мінімальним вмістом сірки і видаленням її з матеріалів на стадії підготовки до плавки: вміст сірки в чавуні не повинен перевищувати 0,005%; металобрухт може містити сірку не більше 0,015%; допускається застосування металобрухту, що містить Cr, Ni, Cu не більше 0,1% кожного. Жорстка регламентація шихтових матеріалів по сірці забезпечує отримання сталі з вмістом цього елемента не більше 0,006-0,008%. При цьому вміст фосфору в готовій сталі не перевищує 0,012%.

Технологічним процесом виробництва IF-сталей передбачено вакуумування рідкої сталі, зливої з ванни конвертера. Зневуглецювання протікає під глибоким вакуумом, при тиску над ванною металу не більше 1 мм рт. ст. (0,133 кПа), при інтенсивній продувці розплаву аргонном протягом 15-20 хв: витрата аргону становить під час окисного вакуумування 60-70 м<sup>3</sup> [82, 83].

Прагнення до виробництва IF-сталей з низьким вмістом сірки пояснюється і тим, що через відносно високу поверхневу активність вона істотно гальмує хід реакції зневуглецювання. Як показує досвід, лише при вмісті в металі сірки не більше 0,006% стає можливим зменшити в сталі вуглець до 0,0015%.

Вміст азоту в готових холоднокатаних IF-сталях повинен бути якомога менше. Це може бути досягнуто: зупинкою продувки ванни в момент

відносно високого вмісту вуглецю в розплаві (0,04...0,06%); скороченням часу обробки металу на установці вакуумування; усуненням процесу насичення відкритого розплаву азотом перенесенням розкислення і мікролегування розплаву на етап ковшового вакуумування. Однак процес деазотації контролюється в першу чергу вмістом в розплаві до вакуумування поверхнево-активних речовин - сірки і алюмінію.

Для отримання автомобільної IF-сталі її мікролегування може бути здійснено тільки титаном, який помітно дешевше фероніобію. Однак сталі, мікролеговані титаном, схильні до утворення на поверхні прокату пльон та інших дефектів. Щоб уникнути цього застосовують подвійну стабілізацію – азот зв'язують титаном, а вуглець – ніобієм. Крім того, ніобій подрібнює зерно і сприяє зменшенню вмісту фосфору на границях зерен, попереджаючи окрихчення сталі. Присадку ніобія виконують після розкислення сталі алюмінієм до вмісту його в металі не менше 0,04%. Присадку титану виконують після остаточного доведення сталі по температурі. Подальша обробка сталі аргонном – не менше 3 хвилин.

Низький вміст в IF-сталях вуглецю, досягнутий на етапі її виплавки і вакуумування, можна досить швидко втратити, якщо не вжити вичерпних заходів збереження досягнутих результатів.

Поряд з вирішенням проблем отримання сталі з вмістом вуглецю не більше 0,002% і азоту не більше 0,003% вирішується задача мінімізації шкідливих домішок і неметалевих включень, зокрема – зниження окислення шлаку перед розливанням сталі.

Термін "мікролегування" означає, що в рідку сталь ввели елемент, вміст якого зазвичай не перевищує 10-15 %. Крім очевидної відмінності в масовій частці, що дозволяє відрізнити легуючі і мікролегуючі елементи, різний і механізм їх впливу: легуючі елементи переважно впливають на матрицю сталі, в той час як вплив мікролегуючих елементів значною мірою

визначається виділенням надлишкових фаз і утворенням нітридів і карбідів. Дисперсні виділення фаз, які формуються в структурі при розпаді пересичених твердих розчинів, перешкоджають руху дислокацій, викликаючи зміцнення матриці, впливають на розмір аустенітного і феритного зерна, на типи структурних складових. Разом з утворенням карбідів і нітридів кількість вільних атомів вуглецю і азоту настільки зменшується, що виключається (або в значній мірі зменшується) проникнення їх в кристалічну решітку заліза в якості атомів впровадження.

За спорідненості до азоту і вуглецю, а також потенціалу вільної енергії, необхідної для утворення нітридів і карбідів елементи, придатні для мікролегування сталей можна розташувати в ряд: Cr, Mo, W, V, Nb, Ta, Ti, Zr, Hf. Однак зіставлення їх властивостей, форми кристалічної решітки, атомного радіусу (відносно Fe) дозволяє виділити зі згаданого ряду в якості нітридокарбідоутворюючих елементів V, Ti і Nb. Ванадій практично не формує виділень в аустеніті, але утворює багато частинок в процесі або після  $\gamma$ - $\alpha$  перетворення, які забезпечують дисперсійне твердіння і деяке зростання міцності. Титан формує нітриди, які стабільні при високих температурах в аустенітній області і тому дозволяють контролювати розмір зерна аустеніту при температурі нагріву сталі перед гарячої прокаткою.

Ніобій є ефективним мікролегуючим елементом для подрібнення зерна, як аустеніту так і фериту в процесі нагрівання сталі під прокатку. Ніобій гальмує рекристалізацію аустеніту в процесі прокатки, що призводить до такого подрібнення зерна, яке не може бути досягнуто жодним процесом термічної обробки, знижує температуру  $\gamma$ - $\alpha$  перетворення за рахунок твердорозчинного ефекту, створює дисперсійне зміцнення. Спорідненість ніобію до кисню досить низька. Тому засвоєння ніобію при присадці в повністю розкислену сталь дуже високе.

Мікролегуючі елементи, на відміну від легуючих (марганець, хром, нікель), що впливають на властивості сталі, змінюючи залізну основу,

виконують принципово іншу роль. При взаємодії з вуглецем і азотом вони здатні (не змінюючи при цьому залізної основи) утворювати в матриці вторинні фази. Впливаючи на ці фази умовами їх утворення або розчинення (деформацією матриці або її температурою) можна цілеспрямовано керувати мікроструктурою сталі, а отже, і її властивостями.

Одним з найбільш відповідальних джерел появи неметалевих фаз в сталі є реакції рафінування, перш за все розкислення і десульфурація. Для полегшення видалення продуктів рафінування розплав модифікують за допомогою спеціальних добавок – вапна, силікокальція або алюмокальцієвих сплавів. Під час перемішування розплаву в ковші формування включень відбувається за участю оксидних фаз шлаку. Тому співвідношення інгредієнтів, що вводяться, наприклад алюмінію і кальцію, має бути скоригованим в залежності від хімічного складу шлаку.

Одним з основних дефектів тонких холоднокатаних листів з IF-сталей є «пльони». Джерелом утворення «пльон» являються неметалеві включення. Зовнішній вигляд дефекту «пльон» представляє собою тонкі, лускаті, язикоподібні відшарування пластинок металу від поверхні листа. Колір цих хвилеподібних відшарувань може змінюватися від брудно-сірого до світло-білого. Головними компонентами складу таких включень є силікати кальцію з флюсами  $\text{CaF}_2$  і  $\text{Na}_2\text{O}$ , що вказує на їх походження від шлакоутворюючої суміші в кристалізаторі: вони захоплені металом поблизу скоринки слябової смуги у меніска.

Таким чином, при реалізації програм щодо створення сучасних автомобілів з надлегким сталевим кузовом, автомобілебудівники розширюють спектр вимог до механічних властивостей і якості сталевого листа. У порівнянні з традиційними сталями новітні матеріали характеризуються оптимальним поєднанням високої міцності і хорошої формуючості. Розвиток їх виробництва стримується складною технологією

виробництва, необхідністю значної модернізації устаткування і суворого дотримання технологічних параметрів процесів виплавки, позапічної обробки і безперервного розливання [84-87].

Висновки за розділом, постановка цілей та задач дослідження.

Підвищення рівня вимог щодо економії палива і безпеки експлуатації вимагає підвищення міцності автолиста для виготовлення різних складових деталей автомобіля. Однак, для забезпечення високого рівня технологічності виробництва металопродукції складної форми необхідно використовувати лист з високоштампуємих сталей. Більшість традиційних шляхів підвищення міцності автолиста призводить до зменшення характеристик штампуємості, зниження величини коефіцієнта нормальної пластичної анізотропії.

Як встановлено дослідженнями, на якість прокату впливає хімічний склад IF-сталі, особлива увага звернута на вміст азоту. Розчинність газу  $N_2$  значно збільшується зі збільшенням концентрації Al і B в сталі за рахунок утворення асоціантів AlN і BN. Змінення вмісту вуглецю в сталі, мікролегованої титаном, робить помітний вплив на механічні властивості. У випадку, коли разом з титаном в мікролегуванні бере участь Nb, збільшення в сталі вмісту вуглецю помітно збільшує її міцність і зменшує пластичність, що пояснюється меншим розміром зерна фериту.

Потребує уваги визначення особливостей позапічної обробки низьковуглецевої сталі при застосуванні різних схем обробки зокрема розташування агрегату вакуумної обробки. У сучасному виробництві сталі в основному плавильному агрегаті випускається, по суті, напівпродукт. Причому цей напівпродукт не придатний для розливання, а вимагає обов'язкового доведення металу, яке проводиться в агрегатах позапічної (ковшової) металургії – на ковші-печі і вакууматорі. Агрегат ківш-піч виконує функції рафінування напівпродукту і доведення його за хімічним складом і температурою, а агрегат вакуумування (в незалежності від його виду)

зазвичай виконує завдання видалення газів зі сталі, в тому числі і в ході вакуумвуглецевого розкислення.

Встановлення показників видалення розчинених газів кисню, азоту, водню та впливу технологічних факторів на їх величину дозволить уточнити маршрут позапічної обробки. Склад напівпродукту, що випускається з ДСП, в першу чергу окисленість металу, впливає на поведінку металу при вакуумуванні та забезпечує протікання реакції вакуум-вуглецевого розкислення, що дозволить скоротити витрату розкислювачів, а також отримувати особливо низьковуглецеві сталі без введення додаткових окиснювачів.

Підсумовуючи відомості про існуючі технології одержання сталей з низьким вмістом вуглецю і їх розкислення можна зробити висновок про те, що найбільш поширена схема включає виплавку, випуск металу в ківш, обробку на установці ковшового вакуумування (вакуумне зневуглецювання, розкислення і легування) і розливання на МБЛЗ [61]. При розкисленні низьковуглецевих сталей слід враховувати можливий приріст концентрації вуглецю з феросплавів, а також перехід його в метал з футерування. Для таких сталей розкислення зазвичай проводять кальційвмісними феросплавами і алюмінієм, а також мікролегують сталь титаном, ванадієм і ніобієм.

Актуальність роботи полягає у фізико-хімічному обґрунтуванні та розробленні технологічних режимів виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії компонентів в рідкому стані та вплив на окисленість металу, зниження вмісту розчинених газів та показники вакуум вуглецевого розкислення, характеристики нітрідоутворення.

Мета роботи – розроблення енергозберігаючої технології виплавки та пластичної деформації ультра низьковуглецевих сталей для особливо тонкого

листового прокату з підвищеними властивостями, встановлення закономірностей впливу деформаційних режимів прокатки на формування властивостей, структуроутворення тонколистового прокату.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- виконати термодинамічні розрахунки зневуглецювання низьковуглецевої сталі з вмістом вуглецю менше 0,02% в дуговій сталеплавильній печі;

- встановити зв'язок між витратою кисню на окислення домішок та величиною окисленості та температурою металу на випуску для забезпечення умов вакуум-вуглецевого розкислювання сталі;

- визначити межі вмісту основних елементів низьковуглецевої сталі для забезпечення необхідних механічних властивостей ;

- обґрунтувати режими деформаційної обробки дослідних зразків сталі, визначити показники механічних властивостей та структури прокатаних зразків;

- виконати розрахунки рівноважних концентрацій кисню в діапазоні характерних температур технологічного процесу та встановити раціональну величину тиску у вакуумній камері для переважаючого окислення вуглецю;

- провести термодинамічний аналіз реакцій утворення нітридів та на основі аналізу експериментальних даних встановити рівняння для розрахунку необхідної кількості присадок титану для нейтралізації шкідливого впливу азоту;

- визначити особливості позапічної обробки низьковуглецевої сталі при застосуванні різних схем обробки та встановити розташування агрегату вакуумної обробки;

- на основі фізико-хімічного обґрунтування встановити раціональний компонентний та хімічний склад сталі для забезпечення високих механічних властивостей;

- провести математичне моделювання та встановити вплив технологічних параметрів на видалення розчинених газів з металу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wallentowitz H. Materials for future automotive body structures. Business Briefing: Global Automotive Manufacturing & Technology. 2003. (Accessed 18/02/2011). - Режим доступу:

[http://www.touchbriefings.com/pdf/11/auto031\\_r\\_wallentowitz.pdf](http://www.touchbriefings.com/pdf/11/auto031_r_wallentowitz.pdf)

2. E. R. H. Fuchs, F. R. Field, R. Roth, R. E. Kirchain. Strategic materials selection in the automobile body: Economic opportunities for polymer composite design, Composites Science and Technology. Issue 9, vol. 68, pp. 1989-2002, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.01.015>

3. Alfonse Chamisa. Development of Ultra High Strength Steels for Reduced Carbon Emissions in Automotive Vehicles. 2014. Engineering, Materials Science, Environmental Science. P. 244. PhD thesis, University of Sheffield.

- Режим доступу: <https://etheses.whiterose.ac.uk/6274/1/Alfonse%20-%20Thesis.pdf>

<https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-Ultra-High-Strength-Steels-for-in-Chamisa/a7296903ac843d69770eda85507e84be24811340>

4. Jean-Hubert Schmitt, Thierry Iung. New developments of advanced high-strength steels for automotive applications. 2018. Comptes Rendus Physique, 19(8).

<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.004> - Режим доступу:

[https://www.researchgate.net/publication/329241147\\_New\\_developments\\_of\\_advanced\\_high-strength\\_steels\\_for\\_automotive\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/329241147_New_developments_of_advanced_high-strength_steels_for_automotive_applications)

5. Manabu Takahashi. Development of High Strength Steels for Automobiles. 2003. Nippon Steel Technical Report 88(88). Nippon Steel & Sumitomo Metal.

- Режим доступу:

[https://www.researchgate.net/publication/242739758\\_Development\\_of\\_High\\_Strength\\_Steels\\_for\\_Automobiles](https://www.researchgate.net/publication/242739758_Development_of_High_Strength_Steels_for_Automobiles)

6. K. Chung, K. Ahn, D.-H. Yoo, K.-H. Chung, M.-H. Seo, S.-H. Park. Formability of TWIP (twinning induced plasticity) automotive sheets. International Journal of Plasticity, vol. 27, pp. 52-81, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.03.006>

7. Development of High Strength Hot-rolled Sheet Steel Consisting of Ferrite and Nanometer-sized Carbides. Y.Funakawa, T.Shiozaki, K.Tomita, T.Yamamoto, E.Maeda. ISIJ International, vol. 44. pp. 1945–1951. 2004.

<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1945>

8. Isothermal treatment influence on nanometer-size carbide precipitation of titanium-bearing low carbon steel. T.-P. Wang, F.-H. Kao, S.-H. Wang, J.-R. Yang, C.-Y. Huang, H.-R.Chen. Materials Letters, vol.65, pp. 396-399, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.10.022>

9. Effect of nanoprecipitates and grain size on the mechanical properties of advanced structural steels, M.A.Suarez, M.A.Alvarez-Pérez, O.Alvarez-Fregoso, J.A.JuarezIslas, Materials Science and Engineering: A, vol.528, pp. 4924-4926, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.016>

10. Nanoprecipitate-hardened 1.5 GPa steels with unexpected high ductility. D. Raabe, D. Ponge, O. Dmitrieva, B. Sander. Scripta Materialia, vol. 60, pp. 1141-1144, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.062>

11. Bhadeshia H.K.D.H., Honeycombe R.W.K. Steels: Microstructure and Properties. E. publishing, Ed., 3rd ed Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 88, 147, 148, 220 – 233. Hardback ISBN: 9780081002704. eBook ISBN: 9780081002728. - Режим доступа: <https://shop.elsevier.com/books/steels-microstructure-and-properties/bhadeshia/978-0-08-100270-4>

<https://www.sciencedirect.com/book/9780081002704/steels-microstructure-and-properties>

12. T.S. Wang, Z. Li, B. Zhang, X.J. Zhang, J.M. Deng, F.C. Zhang. High tensile ductility and high strength in ultrafine-grained low-carbon steel. Materials Science and Engineering: A, vol. 527, pp. 2798-2801, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.072>

13. Yokota T, Kobayashi A, K. Seto, Hosoya Y, Heller T, Bode R, Stich G. A High strength steel excellent in uniform elongation properties and method of manufacturing the same. European Patent 1 790 737 A1, May 30, 2007.

- Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US20070119521A1/en>

14. SteelworksOnline. (June, 2013). Steel is the solution to achieve 54.5MPG by 2025. American Iron and Steel Institute (Accessed - 05/06/2013). - Режим доступа:

[http://www.steel.org/en/sitecore/content/Autosteel\\_org/Web%20Root/Research/Growth%20of%20AHSS.aspx](http://www.steel.org/en/sitecore/content/Autosteel_org/Web%20Root/Research/Growth%20of%20AHSS.aspx)

15. Effect of Deformation during Stamping on Structure and Property Evolution in 3rd Generation AHSS. D. Branagan, C. Parsons, T. Machrowicz, J. Cischke, A. Frerichs, B. Meacham, S. Cheng, G. Justice, A. Sergueeva. Open Journal of Metal, Vol.8. No.2, 28, 2018. - Режим доступа:

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2309834>

16. Nazim Baluch, Zulkifli Mohamed Udin, C.S. Abdullah. Advanced High Strength Steel in Auto Industry: an Overview. 2014. Engineering, Technology and Applied Science Research. 4(4). P.686-689. <https://doi.org/10.48084/etasr.444>

17. Strategic materials selection in the automobile body: Economic opportunities for polymer composite design. Erica R.H. Fuchs, Frank R. Field, Richard Roth, Randolph E. Kirchain. Composites Science and Technology. Volume 68, Issue 9. 2008, Pages 1989-2002.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.01.015>

18. J.-P. Birat. Impact of steelmaking and casting technologies on processing and properties of steel. Ironmaking and Steelmaking.- 2001. Vol. 28. № 2. P. 152-158. <https://doi.org/10.1179/030192301677885>

19. J.-P. Birat. Steel cleanliness and environmental metallurgy. Metall. Res. Technol. Volume 113, Number 2, 2016. <https://doi.org/10.1051/metal/2015050>

20. Ху Минь, Ма Фань, Сонг Мантань. Практика производства автолистовых IF-сталей / Metallургическая и горнорудная промышленность. №5. (290). 2014. С. 5-7. - Режим доступа: <https://www.metaljournal.com.ua/5-290-201/>

21. David K. Matlock, John G. Speer. Processing Opportunities for New Advanced High-Strength Sheet Steels. Volume 25, 2010. Issue 1-3: 2nd

International Conference on Thermo-Mechanical Simulation and Processing of Steels. Materials and Manufacturing Processes. Original Articles. Pages 7-13.

<https://doi.org/10.1080/10426910903158272>

22. Назюта Л.Ю., Денисенко В.С. Анализ окисленности конечного металла при выплавке стали в большегрузных конвертерах. // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. - 2011. - Вип. 22. - С. 68-76. - Режим доступу::

<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-okislennosti-konechnogo-metalla-pri-vyplavke-stali-v-bolshegruznyh-konverterah>

23. Numerical investigation and physical modeling for optimisation hydrodynamic processes in continuous casting tundish. Smirnov, A., Verzilov, A., Semenko, A., Skorobagatko, Y., Hoida, D. Metallurgical Research & Technology. 2023, Volume 120 Issue (3), id.310, 11 pp. <https://doi.org/10.1051/metal/2023037>

24. Heikki Jalkanen, Lauri Holappa. Chapter 1.4 - Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes. 2014, Pages 223-270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00014-6>

25. An Hoang Le, Cao-Son Nguyen, Anh-Hoa Bui. Experimental processing of ultra-low carbon steel using vacuum treatment. 2018. Acta Metallurgica Slovaca. 24(1):4. <https://doi.org/10.12776/ams.v24i1.1070>

26. S. Hoile. Processing and properties of mild interstitial free steels. Materials Science and Technology. Volume 16, 2000. Issue 10. Pages 1079-1093. <https://doi.org/10.1179/026708300101506902>

27. B.C.De Cooman, O.Kwon, K-G.Chin. Materials Perspective. State-of-the-knowledge on TWIP steel. Materials Science and Technology. Volume 28, 2012 - Issue 5. Pages 513-527. <https://doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000095>

28. Concurrent microstructural evolution of ferrite and austenite in a duplex stainless steel processed by high-pressure torsion. Y. Cao, Y.B. Wang, X.H. An, X.Z. Liao, M. Kawasaki, S.P. Ringer, T.G. Langdon, Y.T. Zhu. Acta Materialia. Volume 63, 2014, Pages 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.09.030>

29. S. Scheriau, Z. Zhang, S. Kleber, R. Pippan. Deformation mechanisms of a modified 316L austenitic steel subjected to high pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 528, Issue 6. 2011. Pages 2776-2786. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.023>

30. Сухомлін Г.Д., Щудро Р.Е., Щудро А.Е. Удосконалення методики визначення спектрального складу границь зерен у низьковуглецевих сталях. // *Металознавство та термічна обробка металів*. - 2015. - № 2. - С. 30-35.  
- Режим доступу: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/handle/123456789/7313>

31. Флессхольцер Х. Использование установки циркуляционного вакуумирования в производстве сталей для тонкого листа фирмой Voest-Alpine Stahl Linz GmbH. / Х. Флессхольцер, К. Яндль, А. Юнграйтмайер. // *Черные металлы*. - 1999. - №1. - Режим доступу: <https://www.voestalpine.com/stahl/en>  
[https://www.home-of-steel.de/storage/media\\_steel/documents/5767/steel-technology-e-paper-02-2023.pdf](https://www.home-of-steel.de/storage/media_steel/documents/5767/steel-technology-e-paper-02-2023.pdf)

32. Selection and use of coated advanced high-strength steels for automotive applications. R. Bode, M. Meurer, T. W. Schaumann, W. Warnecke. *Rev. Met. Paris*. Volume 101, Number 7-8, 2004. P. 551 – 558. <https://doi.org/10.1051/metal:2004123>

33. Li J, Wei G, Han C. Fundamental Study on Electric Arc Furnace Steelmaking with Submerged Carbon Powder Injection with CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Mixed Gas. *Metals*. 2023; 13(9):1602. <https://doi.org/10.3390/met13091602>

34. R. Karimov. Improving steel melting intensity in the process of electrosmelting from waste and pellets (hbi). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774 3/1 (99), 2019. P.35-42.

35. S. Timoshenko, A. Smirnov, E. Niemtsev. Increasing energy efficiency of arc steelmaking furnace with electromagnetic stirring. *Proceedings 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials Brno, Czech*

Republic, EU, May 26 - 28, 2021. Pages:21-26. ISBN:978-80-87294-99-4; ISSN:2694-9296. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4080>.

36. Lee B., Sohn I. Review of Innovative Energy Savings Technology for the Electric Arc Furnace. *JOM* 66, 1581–1594 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1092-y>

37. Research and Analysis on the Physical and Chemical Properties of Molten Bath with Bottom-Blowing in EAF Steelmaking Process. Wei, G., Zhu, R., Dong, K. et al. *Metall Mater Trans B* 47, 3066–3079 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0737-3>

38. Li, M., Shao, L., Li, Q. et al. A Numerical Study on Blowing Characteristics of a Dynamic Free Oxygen Lance Converter for Hot Metal Dephosphorization Technology Using a Coupled VOF-SMM Method. *Metall Mater Trans B* 52, 2026–2037 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02155-0>

39. Zurutuza I, Isasti N, Detemple E, Schwinn V, Mohrbacher H, Uranga P. Effect of Dynamic Recrystallization on Microstructural Evolution in B Steels Microalloyed with Nb and/or Mo. *Materials*. 2022; 15(4):1424. <https://doi.org/10.3390/ma15041424>

40. Dong, K.; Zhu, R.; Liu, W.J. Bottom-Blown Stirring Technology Application in Consteel EAF. *Adv. Mater. Res.* 2012, 361–363, 639–643. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.361-363.639

41. Singh, M.K., Keshari, K.K., Prasad, A., Das, A. (2021). Effect of Steel Making Parameters on Nitrogen Level in Steel. In: Pal, S., Roy, D., Sinha, S.K. (eds) *Processing and Characterization of Materials*. Springer Proceedings in Materials, vol 13, 63-73. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3937-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3937-1_7)

42. Harashinia, K.; Mizoguchi, S.; Kajioaka, H. Kinetics of Nitrogen Desorption from Low Nitrogen Liquid Iron by Blowing Ar and Reducing Gas Mixture or by Top Injection of Iron Ore Powder under Reduced Pressure. *Tetsu-to-*

Hagane 1988, 74, Issue 3. Pages 441–448.

[https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.74.3\\_441](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.74.3_441)

43. Lee, M.; Trotter, D.; Mazzei, O. The production of low phosphorus and nitrogen steels in an EAF using HBI. *Scand. J. Met.* 2008, 30, 286–291.

<https://doi.org/10.1034/j.1600-0692.2001.300502.x>

44. Wei, G.; Zhu, R.; Wu, X.; Dong, K.; Yang, L.; Liu, R. Technological Innovations of Carbon Dioxide Injection in EAF-LF Steelmaking. *JOM* 2018, 70, 969–976. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2814-3>

45. S.M. Timoshenko, M.V. Gubinski, E.M. Niemtsev. Energy-efficient solutions of foundry class steelmaking electric arc furnace. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, № 3. PP.81-87.

<https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/081>

46. Zhuo, Q.; Al-Harbi, M.N.; Pistorius, P.C. Feature Engineering to Embed Process Knowledge: Analyzing the Energy Efficiency of Electric Arc Furnace Steelmaking. *Metals* 2025, 15, 13. <https://doi.org/10.3390/met15010013>

47. Paranchuk Y, Jancarczyk D, Falat P. Study and Analysis of Dynamics and Energy Efficiency of Arc Steelmaking Furnace Electrical Mode with a Fuzzy Control Algorithm. *Energies*. 2023; 16(8):3451.

<https://doi.org/10.3390/en16083451>

48. Lee, B., Sohn, I. Review of Innovative Energy Savings Technology for the Electric Arc Furnace. *JOM* 66, 1581–1594 (2014).

<https://doi.org/10.1007/s11837-014-1092-y>

49. A.R. Kadam, A.R. Tajik, V. Hindasageri. Heat transfer distribution of impinging flame and air jets – A comparative study. *Applied Thermal Engineering*. Volume 95, 2016. PP. 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.008>

50. Mysik, V.F.; Zhdanov, A.V.; Bessonov, E.D. Increasing the energy efficiency of steelmaking. *Mod. Technol. Prod. Ferr. Met.* 2012, 183–185. (In English) [Google Scholar]

51. Timoshenko, S.N.; Stovpchenko, A.P.; Kostetsky, Y.V.; Gubinsky, M.V. Ways Of Increasing The Energy Efficiency Of Electric Arc Furnaces. *Mod. Electrometall.* 2019, 46–56. DOI: 10.15407/sem2019.01.06

52. Effects of fuel input on coherent jet length at various ambient temperatures. Guangwu Tang, Yuchao Chen, Armin K. Silaen, Yury Krotov, Michael F. Riley, Chenn Q. Zhou. *Applied Thermal Engineering*. Volume 153, 2019, P. 513-523. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.019>

53. Foamy slag practice to enhance the energy efficiency of electric arc furnace: An industrial scale validation. Ankur Agnihotri, Prince Kumar Singh, Dinesh Singh, Mukesh Gupta. *Materials Today: Proceedings*. Volume 46, Part 3, 2021, Pages 1537-1542. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.770>

54. Dieter Neuschutz. State and trends of the electric arc furnace technology. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. Volume 4, Issue 1, 2000, 12 pages. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v4.i1.80

55. Xu, A., Zhu, R., Wei, G., Zhang, H., Zhao, R. (2024). Optimization of Energy Efficiency of Electric Arc Furnace Steelmaking. In: Peng, Z., et al. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2024*. TMS 2024. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-50304-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-50304-7_3)

56. Lee, B., Sohn, I. Review of Innovative Energy Savings Technology for the Electric Arc Furnace. *JOM* 66, 1581–1594 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1092-y>

57. Harvey, L.D.D. Analysis of the Theoretical and Practical Energy Requirements to Produce Iron and Steel, with Summary Equations that Can Be Applied in Developing Future Energy Scenarios. *J. Sustain. Metall.* 6, 307–332 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00276-5>

58. Jorge Madias. Chapter 1.5 - Electric Furnace Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes. 2014, Pages 271-300. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00013-4>

59. Madias, J. (2016). Electric Arc Furnace. In: Cavaliere, P. (eds) Ironmaking and Steelmaking Processes. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39529-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39529-6_16)

60. Hu S, Zhu R, Dong K, Wei G (2018) Effect of oxygen flow rate and temperature on supersonic jet characteristics and fluid flow in an EAF molten bath. *Canad Metall Quat* 57(2):219–234. <https://doi.org/10.1080/00084433.2017.1409945>

61. Pasquale Cavaliere. Electric Arc Furnace: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement. In book: Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. Pp. 303-375. 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_6)

62. Guangwu Tang, Yuchao Chen, Armin K. Silaen, Yury Krotov, Chenn Q. Zhou. (2019). Effects of steel scrap oxidation on scrap preheating process in an electric arc furnace. Pp. 453-465. In: 10th international symposium on hightemperature metallurgical processing. the minerals, metals & materials series. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05955-2\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05955-2_43)

63. Advanced EAF oxygen usage at Saint-Saulve steelworks. S. Cantacuzene, M. Grant, P. Boussard, M. Devaux, R. Carreno, O. Ironmaking & Steelmaking. Processes, Products and Applications. Volume 32, 2005 - Issue 3. Laurence, C. Dworatzek. Pages 203-207. <https://doi.org/10.1179/174328105X45811>

64. Development and application of electric arc furnace combined blowing technology. G. Ma, R. Zhu, K. Dong, Z. Li, R. Liu, L. Yang & show all. Ironmaking & Steelmaking. Processes, Products and Applications. Volume 43, 2016 - Issue 8. Pages 594-599. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1144547>

65. EAF steelplant optimisation using EFSOP technology. Howard D. Goodfellow, Luis Ferro & Paolo Galbiati. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*. Volume 32, 2005 - Issue 3. Pages 216-220  
<https://doi.org/10.1179/174328105X45875>

66. Dong K, Liu W, Zhu R (2015a) Study on indirect measuring technology of EAF steelmaking decarburization rate by off-gas analysis technique in hot state experiment. *High Temp Mater Processes* 34(6):539–547.

<https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0076>

67. Kim DS, Jung HJ, Kim YH, Yang SH, You BD (2014) Optimisation of oxygen injection in shaft EAF through fluid flow simulation and practical evaluation. *Ironmak Steelmak* 41(5):321–328.

<https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000143>

68. Wei G, Zhu R, Wang Y, Dong K, Wu X, Liu R, Chen F (2018). Simulation and application of pulsating bottom-blowing in EAF steelmaking. *Ironmak Steelmak* 45(9):847–856.

<https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1498759>

69. Lee B, Sohn I (2014) Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace. *JOM* 66:1581. <https://doi.org/10.1007/s11837-0141092-y>

70. Extensive experimental characterization of Moroccan steel and iron industry by-product for high-temperature thermal energy storage. Hmida Slimani, Abdechafik Elharrak, Abdessamad Faik. Yousra Filali Baba, Fayrouz El Hamdani, Hicham Bouzekri. 2024. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 149(11):1-12. DOI: 10.1007/s10973-024-13197-2.

71. Experimental characterization of a solid industrial by-product as material for high temperature sensible thermal energy storage (TES). 2013. *Applied Energy* 113. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.08.082. Laia Miró, Helena Navarro, Priyamvadha Suresh, Antoni Gil, Ana Inés Fernández, Luisa F. Cabeza

72. Wei G, Zhu R, Tang T, Dong K, Wu X (2019) Study on the impact characteristics of submerged CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> mixed injection (S-COMI) in EAF steelmaking. Metall Mater Trans B. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1482-6>

73. A. Michielan, G. Lavaroni and A. Fior The Danieli Danarc<sup>TM</sup> furnace at ABS. Rev. Met. Paris, Vol. 97, N°6 (Juin 2000), pp. 745–752. Published online 2017.

<https://doi.org/10.1051/metal/200097060745>.

74. Sanz, Alejandro, Lavaroni, Giancarlo. Advanced approaches to electric arc furnace off-gas management. MPT Metallurgical Plant and Technology International. Volume 23, Issue 4, August 2000, Pages 72, 74, 76, 78, 80, 82. -

Режим

доступу:

[https://www.researchgate.net/publication/294142998\\_Advanced\\_approaches\\_to\\_electric\\_arc\\_furnace\\_off-gas\\_management](https://www.researchgate.net/publication/294142998_Advanced_approaches_to_electric_arc_furnace_off-gas_management)

75. Kun He, Li Wang. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. 70(1). DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.007

76. Физическое моделирование комбинированной продувки ванны подовых сталеплавильных агрегатов. Л.В. Камкина, А.П. Мишалкин, Н.А. Колбин, Я.В. Стомба, С.В. Пшигоцкий. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології», випуск 5 (76). 2011. С. 32–37.

77. Особенности современного оборудования и технологий внепечной обработки стали / В.П. Пиптюк, В.Ю. Болотов, И.А. Павлюченко, И.Н. Логозинский // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2005. — Вип. 11. — С. 67-79. — Бібліогр.: 35 назв.

78. Пивцаев, И.В. Модернизация участка внепечной обработки стали с целью расширения марочного сортамента сталей. Методы внепечной обработки стали, особенности производства низкоуглеродистых

легированных марок стали. Сообщение 1. Реализация проекта по модернизации участка внепечной обработки стали. И.В. Пивцаев, С.В. Коноваленко, Г.В. Дервянко. *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 55–58. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-55-58>

79. Miklós Tisza. Development of Lightweight Steels for Automotive Applications. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91024/> Open access peer-reviewed chapter. From the Edited Volume: Engineering Steels and High Entropy-Alloys.. Edited by Ashutosh Sharma, Zoia Duriagina, Sanjeev Kumar. - Режим доступа: <https://www.intechopen.com/chapters/70940>.

80. Zuocheng Wang, Xianjin Wang. A new technology to improve the -value of interstitial-free (IF) steel sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 113, Issues 1–3, 2001, Pages 659-661. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00593-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00593-3)

81. Pradhan R. Cold-rolled interstitial-free steels: A discussion of some metallurgical topics. / R. Pradhan // Invited Lecture, Bethlehem Steel Research Labs, – P. 165 – 178.

82. Takechi H. Metallurgical Aspects on Interstitial Free Sheet Steel From Industrial Viewpoints. *ISIJ International*. Volume 34 (1994) Issue 1. JOURNAL FREE ACCESS. Pages 1-8. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.1>

83. You D, Bernhard C, Viertauer A, Linzer B. Simulation of the Refining Process of Ultra-Low Carbon (ULC) Steel. *Crystals*. 2021; 11(8):893. <https://doi.org/10.3390/cryst11080893>

84. Processing of ultra low carbon steels with mechanical properties adequate for automotive applications in the as-annealed condition. R. Mendoza, J. Huante, M. Alanis, C. Gonzalez-Rivera, J.A. Juarez-Islas. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 276, Issues 1–2, 2000, Pages 203-209. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00267-1)

85. Christian Lesch, Norbert Kwiaton, Frank B. Klose. Advanced High Strength Steels (AHSS) for Automotive Applications – Tailored Properties by Smart Microstructural Adjustments. 2017. Steel Research International. 88(10). DOI: 10.1002/srin.201700210

86. Takehide Senuma. Processing and Properties of Advanced high strength steel sheets. 2004. Canadian Metallurgical Quarterly. 43(1):1-12.  
<https://doi.org/10.1179/cmq.2004.43.1.1>

87. Alireza Kalhor, Ali Karimi Taheri, Hamed Mirzadeh. Processing, microstructure adjustments, and mechanical properties of dual phase steels: a review. Pages 561-591. 2021. <https://doi.org/10.1080/02670836.2021.1944524>

## РОЗДІЛ 2

## ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

## 2. 1 Характеристика енергетичного обладнання ДСП

Виплавку сталі здійснювали на 120-тонній печі, склад та призначення допоміжного енергетичного обладнання показаний на рис. 2.1 (згідно технологічної інструкції по виплавці сталі в дуговій сталеплавильній печі та вимогам системи якості ІСО 9002). Технологія виробництва сталі в ДСП-2 передбачає подачу досить великої кількості вуглецевих матеріалів (кокс, природний газ) до печі для нагрівання металу та вдування кисню для його спалювання та окислення домішок за допомогою кількох типів пальників і фурм [1, 2 ].

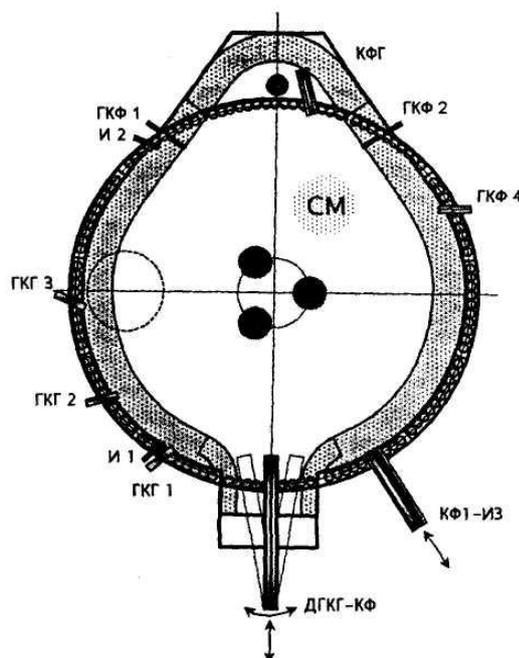


Рисунок 2.1. Принципова схема розташування енергетичного обладнання для сталеливарного процесу ДСП: ГКГ 1 - ГКГ 3 - настінні газОВО-

кисневі пальники; обидва (1 і 2) - настінні інжектори для подачі порошкового коксика; І2 – інжектор з у комплекті з кисневою фурмою; КФ1 — киснева фурма; ДГКГ-КФ - маніпулятор дверей, оснащений пальником і кисневою фурмою; КФГ – комбінована фурма-пальник від фірми Stein; ГКФ 1, ГКФ 2, ГКФ 4 – бокові газОВО-кисневі фурми; СМ – місце для подавання сипких матеріалів.

На печі ДСП-2 використовують:

- систему газОВО-кисневих пальників на стіні, складених з 4-6 струменних пальників одного типу, потужністю 3,6 МВт, споживання кисню до 4800 м<sup>3</sup>/т, що забезпечують велике полум'я для ефективного нагрівання та можливість розрізати металеву шихту і спалювати СО до СО<sub>2</sub> у робочому просторі печі);

- маніпулятор «Палмур» призначений для вдування кисню (до 3000 м<sup>3</sup>/год) та порошкового коксу (до 40 кг/хв) для прискорення плавлення металеві шихти в холодній зоні печі, перемішування розплавленого металу завдяки великій швидкості струменевого руху, зневуглецьовування ванни, допалювання СО, утворення та підтримки спіненого шлаку;

- маніпулятор ММЗ прискорює процес плавлення та покращує якість металу завдяки плавленню металеві шихти в області робочого вікна ДСП за допомогою газокисневого пальника та контрольованого зневуглецьовування розплаву потужним і компактним кисневим струменем, який створюється кисневою фурмою зі споживанням кисню до 3000 м<sup>3</sup>/год, газокисневий пальник потужністю 7,3 або 10 МВт, який споживає кисню до 2200 м<sup>3</sup>/год, природний газ до 1100 м<sup>3</sup>/год, а також досягається енергозбереження завдяки додатковому впровадженню альтернативного джерела енергії та скороченню тривалості роботи печі під струмом;

- комбінована фурма пальник фірми Stein, яка призначена для отримання додаткової теплової енергії шляхом подачі природного газу та кисню в піч (потужність 3,2 МВт, витрата природного газу до 350 Нм<sup>3</sup>/год,

кисень на фурму до 2000 Нм<sup>3</sup>/год і на пальник до 700 Нм<sup>3</sup>/год), що дозволяє підвищити продуктивність сталеплавильного агрегату, зменшити витрати електроенергії та графітованих електродів;

- система бокових кисневих фурм забезпечує подачу газоподібного кисню до ванни через дві фурми в районі 5 і 7 панелей водяного охолодження печі, що сприяє інтенсифікації процесу плавлення металеві шихти в ділянках, які безпосередньо не піддаються впливу електричних дуг або газокисневих пальників; перемішування розплаву під час виплавки сталі, окислення вуглецю та допалювання СО у робочому просторі печі з одержанням додаткової енергії).

Швидке нагрівання шихти забезпечується поєднанням зовнішнього змішування 4-6 настінних (3,6 МВт) і дверних (7,5–10 МВт) газокисневих пальників, конструкція яких передбачає підготовку достатньо яскравого двофронтального полум'я з розширеною випромінювальною поверхнею та високою проникною силою, що ефективно як при нагріванні, так і при розрізанні металеві шихти.

З метою підвищення ефективності використання палива безпосередньо в місцевій зоні робочого простору ДСП та зменшення втрат тепла від пічних газів в цей період змінюється окиснювальна здатність факелу, що прискорило плавлення металобрухту і скоротило цей період за рахунок зниження коефіцієнтів споживання теплової енергії. Покращення умов для допалювання палива в робочому просторі печі забезпечує зниження вмісту СО у складі технологічних газів, стабілізацію та зниження їхньої температури в газовому каналі.

Багатофункціональна водяна охолоджувана фурма, розроблена Stein, по черзі використовується як пальник або як спалювальна киснева фурма. Застосування принципу когерентного струменю дозволяє забезпечити надзвукову швидкість подачі до 2700 м<sup>3</sup>/год центрального окиснювача (з початковим значенням 2,0 Мах) на відстані 1,6–1,8 м. Коли пристрій використовується в режимі пальника, потужність пальника становить 3,2

МВт. Ефективність пристрою значною мірою визначається його раціональним розташуванням у ДСП та рівнем струменя над поверхнею розплаву.

При використанні металевих залишків попередньої плавки, які позитивно впливають на продуктивність пристрою, у завалку додають до 7 кг/т коксового дрібязку (горішку) для прискорення карбюризації. Для стабілізації горіння довгих дуг у початковий період плавлення до зони проникнення струменів через шлях постачання насипних матеріалів до ДСП закладають до 5 кг/т коксу. Для спінювання шлаку до 6 кг вугілля, подрібненого до частки 0,5–3,0 мм, подається до дзеркала розплаву у стисненому повітрі.

При глибинному продуванні ванни з розміщенням двопровідних газокисневих дутьових пристроїв в кожусі печі, нижче дзеркала ванни на 300 - 500 мм, інтенсивність подачі окислювача через кожну від двох до чотирьох фурм підтримується на рівні 180 - 220 м<sup>3</sup>/год. При цьому загальна кількість кисню, що направляється в розплав зсередини ванни становить 5...15% від витрати його на продування 20...25 м<sup>3</sup>/т. Поліпшення технологічних показників плавки при заглибленні частини кисневого дуття досягнуто за рахунок оптимізації процесів усереднення температури та хімічного складу металу при його перемішуванні. Це дозволяє забезпечити випуск сталі з ДСП із температурою на 10 - 15° нижче.

У традиційних конструктивних рішеннях дугових печей (ДСП) зниження витрати електроенергії забезпечується енергією паливного факела та екзотермічних реакцій згоряння вуглецевмісних матеріалів, що вводяться в розплав по ходу плавки, а також енергією реакцій допалювання в робочому просторі печі СО паливного факелу та продуктів окислення розплаву.

Як альтернативне джерело енергії можна використовувати і енергію пневматичного перемішування розплаву, наприклад інертним газом, який додатково подається у ванну через подину ДСП. Цей прийом інтенсифікації сталеплавильного процесу в подових печах останнім часом набуває все більшого поширення.

*Шихтові, додаткові і допоміжні матеріали.* В якості металошихти використовується: метали чорні вторинні, вуглецевий сталевий брухт тв відходи, чавун переробний, окатиші металізовані термічно пасивовані, подрібнені шматки чавуну, брикети залізної руди. Феросплави та шлакоутворюючі: феросиліцій, феромарганець, феросилікомарганець, концентрат плавикошпатовий, як легуючі та для розрідження шлаку. В якості шлакоутворюючих використовують доломітизований вапняк, свіжообпалене вапно. Для навуглецювання застосовують коксовий дрібязок і графіт фракції 0-25мм, для спінення і розкислення шлаку - порошок коксу фракції 0-3,5мм

## 2.2 Матеріали дослідження

Для проведення досліджень було одержано картки низьковуглецевої сталі. Після прокатки на безперервному широкополосному стані (НШС 2000) і травленні на безперервно-травильному агрегаті (НТА) відібрані картки сталей 01ЮТА, 01ЮТ товщиною 3,5 мм. Хімічний склад досліджених марок сталей наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Хімічний склад дослідних сталей

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % по масі					
	C	Mn	Si	S	P	Cr
01ЮТА	0.002	0,12	0,01	0,006	0,011	0.01
01ЮТ	0.003	0,13	0,02	0,008	0,012	0.01
01ЮТ(Ca)	0.003	0,12	0,01	0,005	0,011	0.01
Марка сталі	Ni	Cu	Al	Ti	N2	Ca
01ЮТА	0.01	0.02	0.05	0.062	0.005	0.0003
01ЮТ	0.01	0.02	0.041	0.056	0.004	-

01ЮТ(Ca)	0.01	0.02	0.041	0.07	0.004	0.0002
----------	------	------	-------	------	-------	--------

Сталь 01ЮТ [3, 4] — це ультранизьковуглецева (01) сталь, розкислена алюмінієм і стабілізована титаном. Прямими міжнародними аналогами є сталі для глибокого та надглибокого протягування (IF-сталі — Interstitial Free), наприклад, DC06 (EN 10130), IF-сталь (ASTM) або St15/St16 (DIN). Основні аналоги 01UT у закордонних стандартах: Європа (EN 10130/10131): DC06, DC06ED; Німеччина (DIN 1623): St15, St16; США (ASTM A620/A620M): IF-сталь, іноді DDQ; Японія (JIS G3141): SPFC (для категорій з високим штамповуванням). Ці сталі характеризуються надзвичайно низьким вмістом вуглецю, що забезпечує високу пластичність і відсутність старіння.

В Україні сталь 01ЮТ регламентується ДСТУ (наприклад, гармонізовані з європейськими EN) або галузевими ТУ, що визначають суворий хімічний склад (низький вміст ( $C < 0.02\%$ ), (Mn, Si, P, S) та легування (Al) та (Ti). Окрім державних стандартів (ДСТУ), на конкретних підприємствах-виробниках (наприклад, заводи-виробники прокату) діють власні ТУ (Технічні умови України), що уточнюють допустимі відхилення за товщиною та фізико-механічними параметрами.

### 2.3 Деформаційні режими прокатки

Деформаційні режими прокатки досліджених марок сталей показані в таблиці 2.2. Нагрівання металу перед прокаткою проводили в електричній печі СН 1,62,51/11-И2 зі швидкістю  $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , час витримки 2-4 сек. Прокатку здійснювали на лабораторному одноклітьовому стані ДУО 280 за два проходи в аустенітному та феритному інтервалах температур (швидкість прокатки становила 1,4 м/с, тривалість паузи між проходами 13-15 сек). Картки після прокатки з метою моделювання процесу змотування завантажували в електричну піч типу 25414/11-И1, температура якої

відповідає температурі змотки в рулон, і охолоджували разом з піччю до температури навколишнього середовища ( $V_{\text{охол}} \sim 0,05^\circ\text{C}/\text{с}$ ). В табл. 2.2 наведено параметри кручення під гідростатичним тиском (КГТ) ультра низьковуглецевих сталей (УНВС).

Таблиця 2.2 Деформаційні режими прокатки

Марка сталі	Тнагр	Т1пр	h0	h1	Δh1	ε1	Т2пр
	°C		мм			%	°C
01ЮТА	1000	970-980	3,5	1,80	1,70	48,6	730-740
01ЮТ	1000	970-980	3,5	1,80	1,70	48,6	730-740
01ЮТ(Са	1000	970-980	3,5	1,82	1,70	48,6	730-740
Марка сталі	h2	Δh2	ε2	Δh	Σε	Тзм	
	мм				%	°C	
01ЮТА	1,3	0,5	27,8	2,2	62,9	660-680	
01ЮТ	1,35	0,45	25,0	2,15	61,4	660-680	
01ЮТ(Са	1,4	0,4	22,2	2,1	60,0	660-680	

Примітка: Тнагр – температура нагріву листової сталі; Т1пр – температура прокатки листової сталі в першому проході; Т2пр – температура прокатки листової сталі в другому проході; h0 – вихідна товщина зразка; h1 – товщина зразка після першого проходу; h2 – товщина зразка після другого проходу; Δh1 – абсолютне обтиснення металу в першому проході; Δh2 – абсолютне обтиснення металу в другому проході; Σh – сумарне обтиснення металу за два проходи; ε1 – відносна ступінь деформації металу в першому проході; ε2 – відносна ступінь деформації металу в другому проході; Σε – сумарна ступінь деформації металу за два проходи; Тзм – температура змотки

Інтенсивну пластичну деформацію (ІПД) проводили методом кручення під гідростатичним тиском (КГТ) на установці типу наковалень Бріджмена (рис. 2.1), під керівництвом д.т.н., проф. В. Ф. Балакіна, ДМетІ. Зразки попередньо деформували при кімнатній температурі стисненням і далі крученням до різних ступенів деформації.



Рисунок 2.1. Принципова схема обробки сталей ІПД методом КГТ [5]

#### 2.4 Визначення механічних властивостей та мікроструктури

Вимірювання нанотвердості проводили за допомогою наноіндентора «Nanoindenter G200» виробництва США, з використанням алмазної трьохгранної пірамідки Берковича. Вимірювання проводили до глибини 200 нм. Відбитки наносилися на відстані 15 мкм одна від одної. На кожному зразку проводили по 10 вимірювань (рис. 2.2), потім результати усереднювали. Для визначення твердості будували криву індентування (фактично криву навантаження) в координатах «глибина заглиблення індентора – сила опору впровадженню індентора» (рис. 2.3).



Рисунок 2.2. Вигляд відбитків індентора Берковича при наноіндентуванні (Nanoindenter G200)

Наявність ділянок на експериментальній діаграмі навантаження (рис.2.3) відповідає рекомендованим стандартам вимірювання твердості [6].

Дані індентування та діаграми навантаження при індентуванні досліджуваних низько- та ультранизьковуглецевих сталей представлені у додатках А та Б.

Введені нові показники діаграми індентування та характеристики механічних властивостей матеріалу і їх співвідношення доповнюють ті, які представлені в Міжнародному стандарті ISO 14577 [7]. Метод інструментального автоматичного індентування дозволяє отримати практично повну картину механічних властивостей і структурного стану нових сучасних матеріалів будь-якого фазового складу в будь-якому структурному стані на зразках дуже малих розмірів.

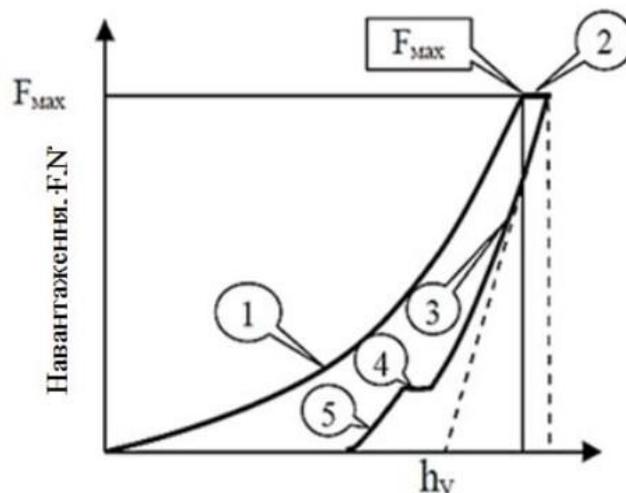


Рисунок 2.3. Діаграма навантаження при індентування [8]:

1 – гілка навантаження, що характеризує опір матеріалу впровадженню індентора; 2 – ділянка, що відповідає витримці зразка при максимальному навантаженні; 3 – ділянка розвантаження; 4 – ділянка витримки при знятті 90 % максимального навантаження; 5 – ділянка розвантаження до нульового значення (повне зняття навантаження)

Механічні властивості досліджуваних сталей після КГТ визначали експериментально методом індентування. Обробку отриманих даних здійснювали розрахунковим методом, використовуючи методологію академіка НАНУ,

д.фіз-мат.н., проф. С. О. Фірстова (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ) [9]. Залучення даної методології дозволяє подолати значні методичні труднощі, пов'язані з отриманням достовірних значень механічних характеристик пружності, міцності і деформації матеріалів з особливими властивостями (в тому числі і в наноструктурному стані), які виникають при використанні традиційних методів випробування.

Характеристику пластичності гарячекатаних сталей після додаткової холодної деформації визначали згідно методології члена-кореспондента НАН України, д.фіз-мат.н., проф. Ю. В. Мільмана (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ) [10].

Мікроструктуру зразків вивчали за допомогою оптичних мікроскопів «Neophot-21» і «Nikon Eclipse MA-200». Шліфи готували в перетині поперечному напрямку прокатки, використовуючи шліфувальний папір (ГОСТ 6456– 82) з послідовно зменшеною зернистістю. Для видалення дрібних рисок, що залишилися після шліфування, і отримання гладкої дзеркальної поверхні шліфа проводили полірування на алмазній пасті. Поліровані зразки піддавали травленню в концентрованій азотній кислоті, або хімічному травленню в насиченому розчині хлорного заліза в соляній кислоті з додаванням деякої кількості азотної кислоти.

Вимірювання мікротвердості низько- і ультранизьковуглецевих сталей у вихідному гарячекатаному стані і після КГТ проводили за допомогою автоматичного твердоміру для визначення мікротвердості по Віккерсу «FM-700», фірми «FutureTech» (Японія) з навантаженням 500 гс., час вдавнення індентора 50 сек. Метод вимірювання мікротвердості регламентується ДОСТ 9450–76 [11].

Дослідження умов холодної прокатки із зсувом ультранизьковуглецевої сталі здійснювали на лабораторному стані 180 з твердими полірованими валками із чавуну. Здійснення процесу прокатки на гладкій бочці з ІПД досягали шляхом осьового зсуву одного з валків. З метою осьового

переміщення валка здійснено проект та виготовлено важільний пристрій. Один кінець важілю контактував із валком через вмонтоване по осі валка кільце, інший – спирався на одну із стійок станини. Співвідношення плечей складало 1:10. Перед прокаткою вихідні зразки із УНВС розрізали на штаби шириною 10 мм і товщиною 2 мм та знежирювали ацетоном. Прокатку здійснювали до товщини штаби 0,82÷0,86 мм за 8-10 проходів. Прокатку зразків УНВС здійснювали за трьома варіантами.

Варіант 1 – прокатка зразку із зсувом за маршрутом 1,52→1,42→1,34→1,25→1,14→1,01→0,95→0,89→0,87→0,83 мм.

При товщині 1,34 мм стан із затиснутою на половині довжини штабою зупиняли із допомогою важільної системи здійснювали зсув, а після цього – прокатку решти зразка. Варіанти 2 і 3 – асиметрична прокатка. Асиметрію процесу досягали за рахунок механічного притискування штаби до верхнього валка на вхідній стороні стану. За варіантом 2 площа контакту зразку з верхнім валком не змінювалась у всіх проходах. За варіантом 3 після кожного проходу зразок повертали уздовж осі кантовки на 180°.

Маршрут прокатки зразка за варіантом 2 (без кантовки): 1,62→1,56→1,54→1,37→1,23→1,04→0,98→0,88→0,82 мм

Маршрут прокатки зразка за варіантом 3 (з кантовкою на 180°): 1,62→1,56→1,53→1,37→1,21→1,07→0,98→0,89→0,86 мм.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mirosław Karbowniczek. Electric Arc Furnace Steelmaking. 2021. P.262. DOI:10.1201/9781003130949. ISBN: 9781003130949.
2. Савьюк А.Н., Лозин Г.А., Дервянченко И.В. Энергообеспечение высокопроизводительного электросталеплавильного процесса//Теория и практика металлургии.-№6.-2004.-С.5-24.
3. C.D. Horvath, Chapter 2 - Advanced steels for lightweight automotive structures, Editor(s): P.K. Mallick, In Woodhead Publishing in Materials,

Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles (Second Edition), Woodhead Publishing, 2021, P.39-95.

4. Стовпченко Г.П., Степаненко Д.В., Медовар Л.Б. Обґрунтування енергетичних та екологічних переваг використання високоміцних сталей за методологією оцінки життєвого циклу. Теорія і практика металургії. ISSN 1028-2335. №5, 2021. С.5-13. 10.34185/tpm.5.2021.01

5. Бриджмен П. У. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов = Studies in large plastic flow and fracture. With special emphasis on the effects of hydrostatic pressure : пер. с англ. / П. У. Бриджмен . – 2-е изд., испр . – М.: Эдиториал УРСС, 2010 . – 448 с.

6. Микро- и наноиндентирование пиролитических карбидохромовых покрытий / С.А. Крохмаль, Г.Н. Толмачева // Физическая инженерия поверхности. – 2011. – Т. 9, № 4. – С. 350–356.

7. ISO 14577-1:2015. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method. <https://www.iso.org/ru/standard/56626.html>

8. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования/ Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова. - Вопросы атомной науки и техники, 2011. – №4 - 182-187.

9. Теоретическая прочность и теоретическая твердость / Фирстов С.А., Роголь Т.Г. // Деформация и разрушение материалов, 2011. – № 5. С. 1-7.

10. Milman Yu.V. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement / Yu.V. Milman, B.A. Galanov, S.I. Chugunova. // Acta Met. and Mater. – 1993, – V. 41, №9, – P. 2523 – 2532. DOI:10.1016/0956-7151(93)90122-9

11. Вимір мікротвердості вдавлюванням алмазних накінцівок. ДОСТ 9450-76. СТ СЭВ 1195-78. <https://www.splav-kharkov.com/gost/662.pdf>

## РОЗДІЛ 3

### ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИПЛАВКИ І ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ НА ВЛАСТИВОСТІ ГОТОВОГО МЕТАЛУ

3.1 Встановлення залежності властивостей металу на випуску від технологічних параметрів процесу в умовах діючого виробництва

В даний час у промисловому виробництві сталі використовуються два основні технологічні процеси [1-3]: перший - тривалий процес доменно-конвертерний, що включає підготовку сировини за допомогою таких процесів, як коксування, спікання і агломерація, з подальшою плавкою в доменній печі для отримання розплавленого заліза і рафінуванням в конвертері; другий - короткий процес, заснований на електродугових печах, в якому як сировина використовується сталевий брухт або залізо прямого відновлення.

Як відомо з матеріалів наукових публікацій, зокрема [4] на запит автомобільної індустрії створено вже три покоління високоміцних сталей, що мають значно покращені фізичні і механічні властивості. Створення та впровадження нових високоміцних матеріалів й екологічних процесів їх виробництва потребує витрат електроенергії з відновлюваних джерел. На ефективність виробництва буде впливати не тільки витрата енергії та режими її подачі до плавильного агрегату, а також співвідношення різновидів металевої шихти та додаткові матеріали, що в цілому впливає на якість напівпродукту.

На показники процесу плавлення та вторинної обробки, до яких відносяться температурний режим, ступінь знесірчення, вміст домішок у металі, вид і кількість розкислювачів та інше впливає співвідношення різних видів металобрухту у складі металевої шихти, витривалості режимів плавлення, кількості та типу добавок на печі-ковші. Для встановлення

залежностей від технологічних параметрів процесу скористалися інформацією з паспортів плавки виробництва низьковуглецевих сталей та встановили максимальні та мінімальні значення показників і розраховали середні значення технологічних параметрів плавки і результатів ведення процесу (таблиця 3.1)

Таблиця 3.1

Середні та граничні значення технологічних показників процесу виплавки низьковуглецевої сталі в ДСП

Показник, розмірність	Середнє (по 200 плавкам) значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Питоме споживання енергії, кВтч/т	425	324	636
Витрата кисню (м <sup>3</sup> /т) на пристрої:			
Маніпулятор «Палмур»	13,25	1,82	23,15
Бічні фурми	1,38	0,67	4,18
Маніпулятор заводу (Фукс)	5,87	2,68	12,1
Пальник спис (Stein Lange)	4,18	2,12	6,85
Киснева труба	1,25	0,1	3,41
Температура на випуску, °С	1625	1560	1720
a <sub>0</sub> на випуску, ppm	1065	454	1987
Вміст елементів на випуску, %			
Вуглець	0,0648	0,0347	0,0986
Сірка	0,0694	0,041	0,112
Склад готової сталі, %			
Вуглець	0,055	0,032	0,078
Марганець	0,359	0,281	0,410
Кремній	0,120	0,045	0,164
Сірка	0,035	0,002	0,063
Ступінь десульфурації, %			
Загальна	80,48	47,70	92,61
В печі	-75,85	-170	-480
На УКП	88,67	57,01	92,61
Угар розкислювачів, %			
Вуглецю	24,78	-24,65	67,58
Кремнію	63,71	44,87	82,60
Марганцю	56,05	31,26	74,96
Алюмінію	97,83	93,94	100
Кальцію	85,84	64,59	96,58

Нестабільність процесу виплавки привела до суттєвої розбіжності даних, але в цілому встановлені середні значення відповідають існуючим

показникам виплавки. Основні технологічні параметри роботи ДСП наведені в таблиці 3.2 (дані були взяті з інформаційної системи АСУТП). Наведено також результати виплавки при змінній загальній витраті кисню

Таблиця 3.2

## Параметри технології виплавки сталі на ДСП

Параметри	Витрата кисню		
	5000 м3/год.	1800м3/год	змінення
Кількість плавок, шт	433	31	
Маса шихти, т/пл.	135,9	134,5	-1,3
Шихтовка, %			
Брухт	98,5	98,7	+0,2
Скрап	0,4	1,2	+0,8
Чавун	0,3	0,0	-0,7
ГБЗ (гаряче брикетоване залізо)	0,8	0,1	-0,7
Маса плавки, т	118,8	122,2	+3,4
Вихід придатного, %	87,4	90,8	+3,4
Тривалість плавки, хв.	58,0	76,3	+18,3
В т.ч. під струмом	46,4	59,5	+13,2
Паузи без струму	11,6	16,8	+5,2
Температура на випуску, °С	1640	1659	+19,0
Окисленість металу, ppm	1165	836	-329,3
Витрата енергоносіїв			
електроенергія кВт·год/т	430,5	535,3	+104,8
кисень, м3/т, загальний	39,1	16,5	-22,6
на хімічні реакції	27,4	9,0	-18,4
на пальник	11,7	7,5	-4,2
природний газ, м3/т	5,9	3,8	-2,1
середньогодинна продуктивність, т/год	122,9	96,1	-26,8

+ економія, - перевитрата

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 м<sup>3</sup>/т кисню забезпечує заміну 4.2 кВт год/т електроенергії.

У таблиці 3.3 наведено технологічні показники роботи ДСП у дослідний період. Річна продуктивність її становить 1 млн т, тривалість плавки — до 45 хв під струмом. При продуктивності печі 133 - 155 т/год витрата електроенергії становить 370 - 420 кВт·год/т. З прибуткової частини теплового балансу (див. табл. 3.1), виведеної з повного матеріального балансу серії плавок за період, що розглядається, впливає, що на частку альтернативних джерел енергії припадає 31,1% (186,4 кВт год/т), з них 14,9% (89,47 кВт год/т) - тепло екзотермічних реакцій.

Таблиця 3.3.

## Показники продуктивності ДСП у дослідний період

Параметр	8 місяців	Найкращий місяць	Найкращий день
Число плавок	5557	753	31
Середня вага плавки, т	120,9	122,1	122,9
Тривалість, хвилин:			
плавки	54,6	55,1	47,0
роботи під струмом	44,5	44,9	39,4
Продуктивність, т/год.	132,8	133,08	155,16
Витрати на 1 т сталі:			
Електроенергії, кВт · ч	413	405	370,5
кисню, м <sup>3</sup>	37,3	37,2	34,4
Природного газу, м <sup>3</sup>	6,5	6,2	6,0
електродів, кг	1,82	1,75	1,56
Матеріали, що містять вуглець, кг	13,91	11,72	12,23
Середня температура на випуску, °С	1600	1604	1600

На діючій електродуговій печі застосовуються різні типи пальників та дуттьових фурм, що забезпечують нагрів ванни та окислюють вуглець та

домішки. Загальне споживання кисню, разом на різних струменних пристроях забезпечує досягнення необхідного вмісту вуглецю на випуску, який визначають хімічним аналізом (рисунок 3.1), та температуру металу(рис.3.2).

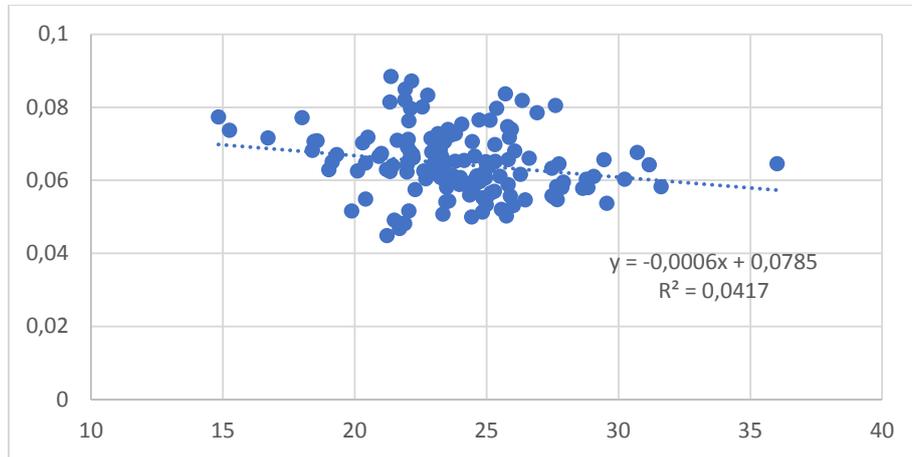


Рисунок 3.1 - Вплив загальної витрати кисню на вміст вуглецю на випуску

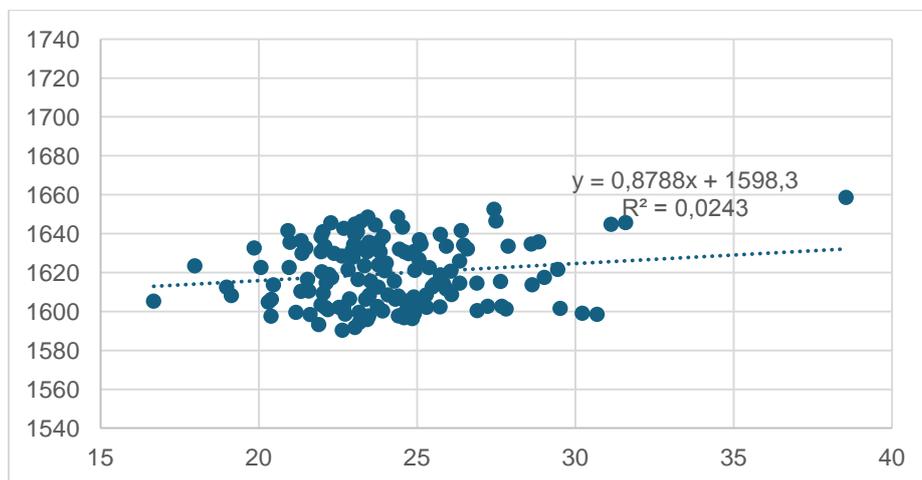


Рисунок 3.2 Вплив загальної витрати кисню на температуру металу перед випуском

Загальна витрата кисню сприяє зменшенню вмісту вуглецю на випуску

та підвищує температуру металу, але цей зв'язок залежить від багатьох факторів. В технології виплавки сталі в ДСП передбачено введення до печі досить великої кількості вуглецевих матеріалів (кокс, природний газ), які застосовують для нагрівання металу при вдуванні кисню для їх спалювання та окислення домішок та використовують декілька типів пальників і фурм. За потреби дозволяється використовувати кисневу трубку в технології виробництва сталі.

При аналізі впливу різних дугтьових пристроїв на ефективність окислення вуглецю від питомої витрати кисню на цих пристроях, встановлено, що збільшення споживання кисню на паливних пристроях (маніпулятор «Палмур» та пальник (Stein Lange Kester-lance) дещо знижує вміст вуглецю в металі на випуску з печі. Споживання кисню на «непаливних» пристроях має більш значний вплив: збільшення споживання кисню призводить до зниження вмісту вуглецю в металі на випуску. Бічні фурми та киснева трубка не використовуються на всіх плавках, на відміну від паливних пристроїв, що може сприяти отриманню низького менше 0,03% вмісту вуглецю на випуску.

Як відомо, окисленість металу на випуску визначається вмістом вуглецю в металі (рис. 3.3 а) і залежить від витрати кисню (рис. 3.3 б) і температури металу (рисунок 3.3 в).

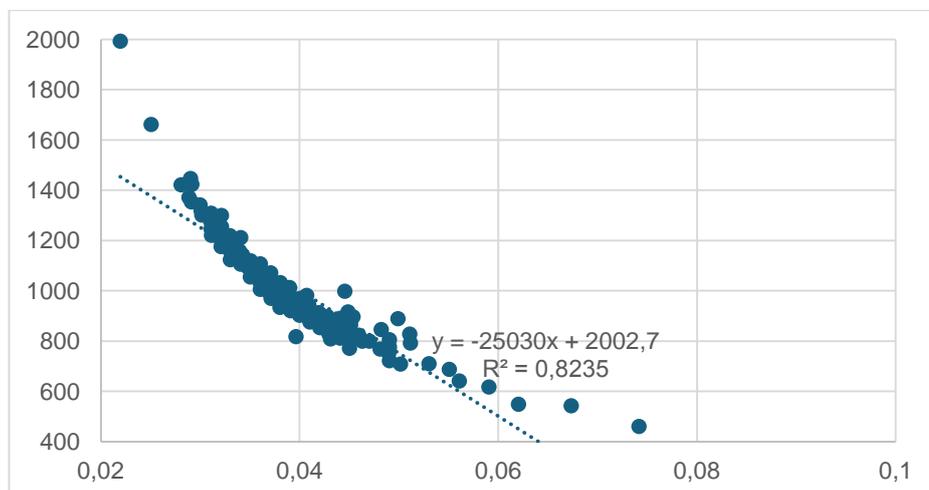


Рисунок 3.3 а Залежність окисленості металу на випуску від вмісту

вуглецю

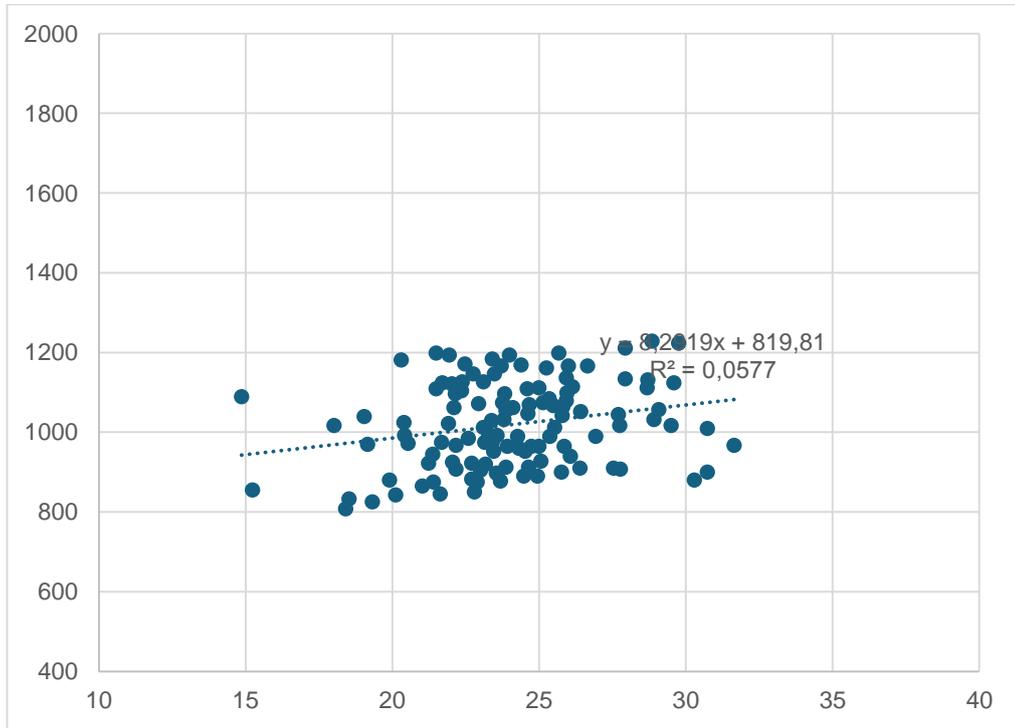


Рисунок 3.3 б Залежність окисленості металу на випуску від загальних витрат

кисню

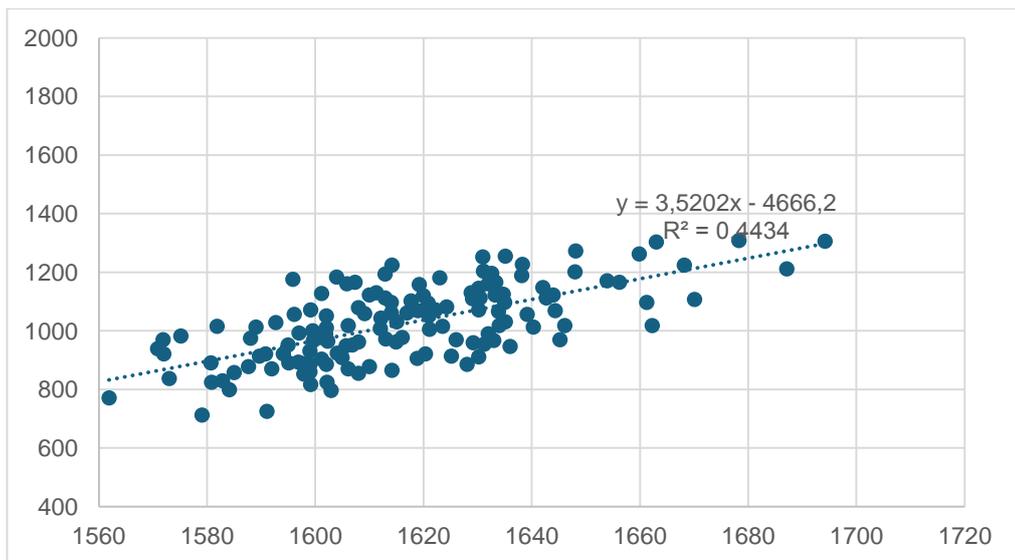


Рисунок 3.3 в Залежність окисленості металу на випуску від температури металу

Як було відмічено, існує суттєва різниця у значенні величини окисленості металу від вмісту вуглецю, визначеного хімічним аналізом, який в більшості випадків вищий, ніж по окисленості, який одержано з використанням датчиком окислення. Існуючі відмінності у значенні вмісту вуглецю згідно з хімічним аналізом і датчиком окислення можуть бути зумовлені різним часом відбору проб і вимірювання. Вплив загальної витрати кисню на плавку не настільки істотний, оскільки, в нього входить витрата як на спалювання палива для прямого нагріву ванни, так і на зневуглецювання.

Було проаналізовано вплив вхідних факторів (вміст вуглецю та окислюваність металу на виході) на зневуглецювання металу на ковші-печі, а також на угар елементів розкислювачів і ступінь десульфурації металу під час вторинної обробки. Вміст вуглецю та активного кисню в металі перед установкою ківш-піч діє суттєво на угар розкислювачів. Встановлено, що зі збільшенням вмісту вуглецю на випуску зростає угар вуглецю на УКП (з урахуванням вуглецю, внесеного розкислювачами) (рисунок 3.4). Як показано на рисунку 3.5, окислюваність металу, який подається на УКП, сприяє зменшенню вмісту вуглецю при вторинній обробці.

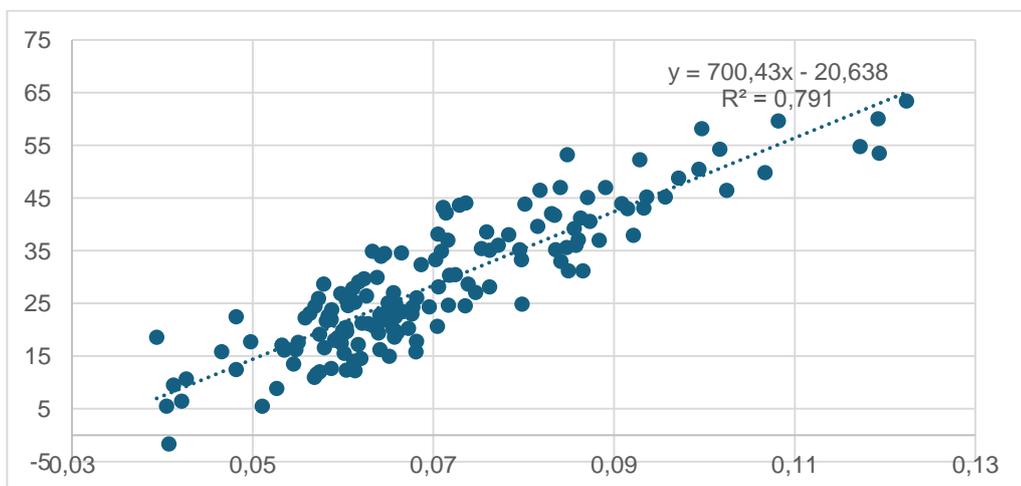


Рисунок 3.4– Залежність угару вуглецю на УКП від вмісту вуглецю на випуску

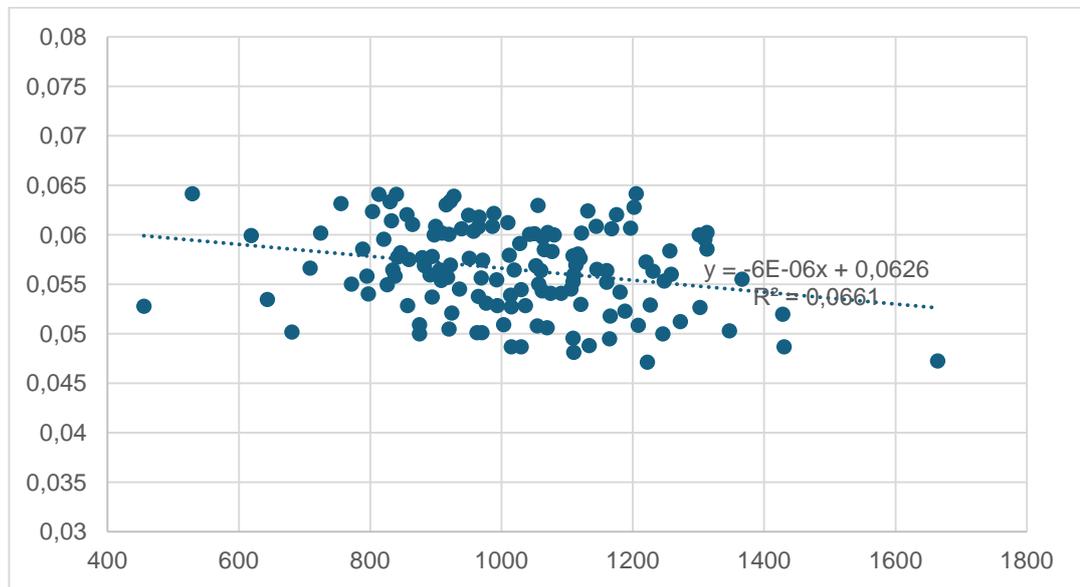


Рисунок 3.5 – Вплив вмісту активного кисню в сталі на випуску на вміст вуглецю в готовій сталі.

Вміст вуглецю і активного кисню у вихідному металі перед УКП істотно впливають на угар елементів-розкислювачів (оборотно і прямо пропорційно, відповідно). Залежності угару кремнію і марганцю від вмісту вуглецю на випуску з печі і зміни вмісту вуглецю на УКП показують, що чим повніше відбувається зневуглецювання металу на УКП, тим нижче угар розкислювачів, особливо кремнію.

Аналіз даних щодо вмісту сірки в металі на випуску (таблиця 3.1), показує, що навіть якщо прийняти середній вміст сірки в металобрухті на рівні верхньої межі рядових марок сталей (рівного 0,04%), то вміст сірки на випуску істотно вище. У печі спостерігається збільшення вмісту сірки за рахунок вдування вуглецьвмісних матеріалів. У той же час відомо, що в

сталеплавильних процесах під час продування киснем, високій температурі і окисленості металу сірка частково видаляється в газову фазу. Як встановлено Меджибозьким М.Я., в окислювальний період плавки в електродуговій печі від 36 до 50% сірки, внесеної усіма шихтовими матеріалами, видаляється з печі з пічними газами. Тенденція зв'язку між концентрацією сірки в напівпродукту на випуску і окисленістю металу простежується і для розглянутих плавок (рис. 3.6).

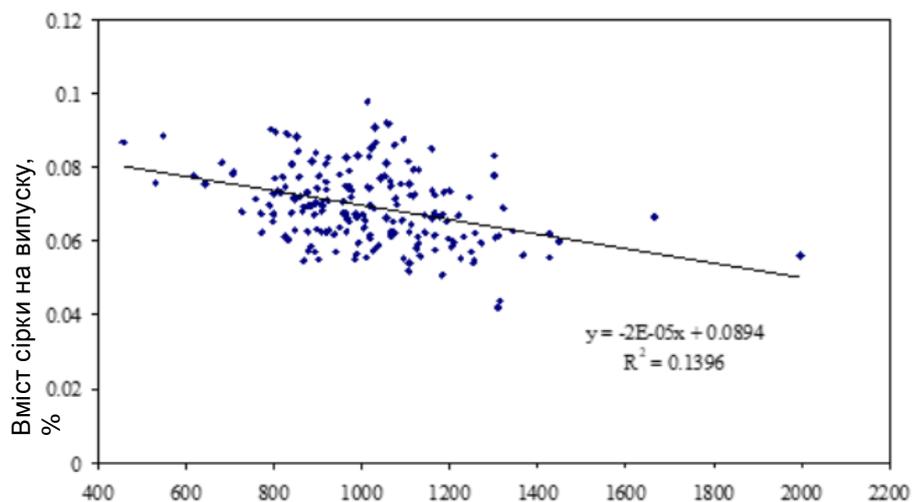


Рисунок 3.6 - Окисленість металу на випуску і вміст сірки в напівпродукту.

Істотної залежності між вмістом сірки в напівпродукті і температурою металу на випуску встановлено не було, що свідчить про превалюючий вплив вдування кисню в піч і величини окисленості металу на видалення сірки в газову фазу. Природно, більш низький вміст сірки в металі на випуску сприяє кращому протіканню процесу десульфурації на УКП, зниженню витрати шлакоутворюючих і десульфуруючих реагентів. З огляду на те, що на випуску з печі вміст сірки істотно вище (таблиця 3.1), ніж потрібно стандартами, очевидно, що всі процеси обробки металу з метою десульфурації

здійснюються на УКП. У зв'язку з цим проаналізували вплив вмісту сірки у вихідному напівпродукту на випуску і витрати вапна, а також кальційвмісних феросплавів на видалення сірки

### 3.2 Регресійний аналіз ступеню впливу технологічних параметрів на характеристики металу на випуску

Для визначення ступеня впливу технологічних параметрів на характеристики отриманого в ДСП напівпродукту і отримання залежностей, що описують зв'язок між ними, проведено регресійний аналіз, при якому значимість коефіцієнтів рівняння визначалася величиною Р-значення (для рівня значущості  $\alpha = 0.05$  величина Р-значення менше 0,05).

Таблиця 3.4

Кореляційно-регресійний аналіз впливу технологічних параметрів плавки (склад металобрухту, температура і окислення) на вміст вуглецю на випуску з ДСП.

висновок підсумків								
регресійна статистика								
множинний R				0.342743807				
R-квадрат				0.117473317				
Нормований R-квадрат				0.108838027				
стандартна помилка				0.018376005				
спостереження				517				
дисперсійний аналіз								
	df	SS		MS		F	значимість F	
регресія	5	0.022968598		0.00459372		13.604	1.76985E-12	
залишок	511	0.172553234		0.000337678				
Разом	516	0.195521832						
коефіцієнти		стандартна помилка	t-статистика	P-значення	Нижні 95%	Верхні 95%	Нижні 95%	Верхні 95%
Вуглець	-0.250573	0.0525	-4.773	2E-06	-0.354	-0.147	-0.354	-0.147
підвид лому 3	-1.28E-05	7E-05	-0.175	0.8609	-2E-04	0.0001	-2E-04	0.0001
підвид лому 17	-3.7E-05	0.0001	-0.312	0.7555	-3E-04	0.0002	-3E-04	0.0002
підвид лому 15	3.363E-05	0.0005	0.0709	0.9435	-9E-04	0.001	-9E-04	0.001
температура	0.0002136	3E-05	6.42	3E-10	0.0001	0.0003	0.0001	0.0003
окисленість	-2.41E-05	3E-06	-7.925	1E-14	-3E-05	-2E-05	-3E-05	-2E-05

Таблиця 3.5

Кореляційно-регресійний аналіз впливу технологічних параметрів плавки (склад металобрухту, тривалість плавки) на вміст азоту на випуску з ДСП.

висновок підсумків								
регресійна статистика								
множинний R				0.215402284				
R-квадрат				0.046398144				
Нормований R-квадрат				0.030700994				
стандартна помилка				0.001951269				
спостереження				248				
дисперсійний аналіз								
	df	SS		MS		F	значимість F	
регресія	4	4.50168E-05		1.12542E-05		2.956	0.020658438	
залишок	243	0.000925211		3.80745E-06				
Разом	247	0.000970228						
коефіцієнти		стандартна помилка	t-статистика	P-значення	Нижні 95%	Верхні 95%	Нижні 95%	Верхні 95%
азот	0.0056	0.001	5.069	8E-07	0.003	0.008	0.003	0.008
підвид лому 3	1.3E-05	8E-06	1.636	0.103	-0	3E-05	-0	3E-05
підвид лому 12	3E-05	1E-05	3.071	0.002	1E-05	5E-05	1E-05	5E-05
підвид лому 34	2.7E-05	6E-05	0.453	0.651	-0	1E-04	-0	1E-04
тривалість плавки	2.1E-05	1E-05	1.541	0.125	-0	5E-05	-0	5E-05

Таблиця 3.6

Кореляційно-регресійний аналіз впливу технологічних параметрів плавки (склад металобрухту, температура і окислення) на вміст фосфору на випуску з ДСП.

висновок підсумків									
регресійна статистика									
множинний R									0.278
R-квадрат									0.077
Нормований R-квадрат									0.075
стандартна помилка									0.005
спостереження									1894
дисперсійний аналіз									
	df	SS	MS	F	значимість F				
регресія	4	0.004	9E-04	39.46	8.91878E-32				
залишок	тисяча вісімсот вісімдесят дев'ять	0.043	2E-05						
Разом	1893	0.047							
коефіцієнти		стандартна помилка	t-статистика	P-значення	Нижні 95%	Верхні 95%	Нижні 95%	Верхні 95%	
фосфор	0.034	0.007	5.052	5E-07	0.021	0.047	0.021	0.047	
підвид лому 3	2E-06	8E-06	0.228	0.82	-0	2E-05	-0	2E-05	
підвид лому 17	-0	1E-05	-5.88	5E-09	-0	-0	-0	-0	
температура	-0	4E-06	-1.87	0.062	-0	4E-07	-0	4E-07	
окисленість	-0	4E-07	-5.61	2E-08	-0	-0	-0	-0	

Таблиця 3.7

Кореляційно-регресійний аналіз впливу технологічних параметрів плавки (склад металобрухту, температура і окислення) на вміст сірки на випуску з ДСП.

висновок підсумків								
регресійна статистика								
множинний R						0.248812		
R-квадрат						0.061908		
Нормований R-квадрат						0.061446		
стандартна помилка						0.011161		
спостереження						2034		
дисперсійний аналіз								
	df	SS		MS		F	значимість F	
регресія	1		0.016705	0.016705		134.0977	4.47167E-30	
залишок	2032		0.253126	0.000125				
Разом	2033		0.269831					
коефіцієнти		стандартна помилка	t-статистика	P-значення	Нижні 95%	Верхні 95%	Нижні 95%	Верхні 95%
сірка	-0.0131	0.016004	-0.81847	0.413195	-0.04449	0.018289	-0.04449	0.018289
підвид лому 3	-6.4E-06	1.77E-05	-0.35891	0.719706	-4.1E-05	2.84E-05	-4.1E-05	2.84E-05
підвид лому 17	-3.6E-06	2.39E-05	-0.14926	0.881365	-5.1E-05	4.34E-05	-5.1E-05	4.34E-05
температура	6.24E-05	1.03E-05	6.080155	1.45E-09	4.22E-05	8.25E-05	4.22E-05	8.25E-05
окислення	-1.4E-05	1.09E-06	-12.7955	5.48E-36	-1.6E-05	-1.2E-05	-1.6E-05	-1.2E-05
тривалість плавки	-3.1E-07	4.01E-07	-0.76608	0.443726	-1.1E-06	4.8E-07	-1.1E-06	4.8E-07

Проведеним аналізом визначено, що вміст вуглецю в напівпродукті залежить від окисленості і від температури металу та описується виразом:

$$[C] = 0,25 + 0,0002 \cdot T + 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot [O], \quad (3.1)$$

де  $[C]$  - вміст вуглецю в напівпродукту;  $T$  - температура металу;  $[O]$  - окисленість металу.

Виявлено, що основним джерелом азоту в напівпродукту є вуглецевий сталевий брухт:

$$[N] = 0,00564 + 3,05 \cdot 10^{-5} \cdot M_1, \quad (3.2)$$

де  $M_1$  – підвід лому 12.

Таблиця 3.8 - Вміст азоту в різних матеріалах, які використовуються у сталеплавильному виробництві

Шихтовий матеріал	Вміст азоту
Скрап (металобрухт)	30-120 ppm
Залізо прямого відновлення або ГБЖ	20-30 ppm
Рідкий чавун із доменної печі	60 ppm
Холодний чавун	20-30 ppm
Гаряча шихта	10 ppm
Кокс	5000-10000 ppm
Кисень	30-200 ppm
Повітря для вдування вуглецю	78%
Газ для донного перемішування ( $N_2$ )	99,9%
Газ для донного перемішування (Ar)	30 ppm
Вапно	400 ppm

Істотна кількість азоту може вноситись із скрапом, коксом і дуттям, а зменшення внесення азоту металошихтою максимальна перевага забезпечується при використанні в металозавалку заліза прямого відновлення. Використовують кілька основних стратегій для зниження вмісту азоту в металі ДСП: спінення шлаків, кипіння ванни за рахунок бульбашок СО при зневуглецьовуванні, обмеження надходження азоту з матеріалами (у тому числі використання першосортного брухту і першородних шихтових матеріалів - чавуну, заліза прямого відновлення).

Виявлено вплив окислення на утримання в сталі шкідливих домішок S і P:

$$[S] = -0,131 + 6,24 \cdot 10^{-5} \cdot T - 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot [O], \quad (3.3)$$

$$[P] = 0,0337 + 6,1 \cdot 10^{-5} \cdot M_2 + 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot [O], \quad (3.4)$$

де  $M_2$  – підвід лому 17.

На підставі статистичного аналізу параметрів 200 плавок поточного виробництва встановлено, що факторами, які сприяють зниженню вмісту вуглецю в готовій сталі, є: *висока окисленість сталі на випуску плавки; низький вміст вуглецю на випуску плавки; висока температура металу на випуску плавки.*

Висока окисленість металу на випуску повинна забезпечувати окислення тих кількостей вуглецю, які потрапляють в метал з феросплавами, а також при нагріванні на УКП (за рахунок електродів).

3.3 Вплив характеристик напівпродукту на перебіг процесів при подальшій позапічній обробці для отримання сталі з заданим рівнем механічних властивостей

### 3.3.1 Оцінка рівня розкисленості металу перед вакуумуванням

Застосування в складі шихтових матеріалів рідкого чавуну чистого від шкідливих домішок дозволяє значно підвищити чистоту і якість виплавленого металу, однак оптимальне його кількість становить  $\approx 30\%$  [5], тому що з одного боку він вносить в ванну додаткову кількість фізичного і хімічного тепла, і це викликає скорочення витрати електроенергії і підвищення продуктивності, а з іншого викликає необхідність окислення значної кількості вуглецю, що збільшує тривалість плавки і знижує продуктивність [6]. Також застосування рідкого чавуну в шихті ДСП призводить до збільшення витрати кисню для продувки металу з  $35 \text{ м}^3/\text{т}$  при роботі без чавуну в шихті до  $37 \text{ м}^3/\text{т}$  при вмісті чавуну в шихті  $30\%$  і до  $45 \text{ м}^3/\text{т}$  при його вмісті  $50\%$ .

Особливістю електропічного напівпродукту є підвищений вміст азоту, що призводить до утворення дисперсних частинок нітридів заліза, що гальмують рух дислокацій і знижують пластичні властивості сталі. Згідно з відомостями авторів [7] вміст азоту в сталях для глибокої витяжки не повинно перевищувати  $30 \cdot 10^{-4}\%$ . Зниження вмісту азоту досягається завдяки селективному відбору металобрухту та ведення процесу в ДСП на вспіненому шлаку [8 -10]. Для ультра низьковуглецевих сталей важливим є також скоординований контроль вмісту вуглецю та кисню для досягнення низького залишкового кисню протягом процесу зневуглецювання, що є корисним для поліпшення чистоти сталі [11, 12].

Для оцінки необхідного рівня окисленості металу перед вакуумуванням визначили вміст вуглецю і величину окисленості напівпродукту із ДСП при його використанні для виробництва низьковуглецевої сталі (табл.3.8) [13].

Таблиця 3.8

## Показники плавки з низьким вмістом вуглецю на випуску з ДСП

№ плавки	Вміст вуглецю, % (дані по хіманалізу/по а <sub>0</sub> )	а <sub>0</sub> на випуску, ррп	Температура перед випуском, °С	Витрата коксу, кг/т сталі	О <sub>2</sub> на горіння коксу, м <sup>3</sup> /т	Кисень на окислення домішок, м <sup>3</sup> /т	Тривалість плавки, хвили
1	0,0554/0,035	1145	1653	10,22	9.54	10.18	49
2	0,0958/0,032	1299	1701	6,5	6.07	20.92	57
3	0,0765/0,038	1118	1719	5,79	5.40	21.55	49
4	0,0742/0,033	1213	1644	24,51	22.88	18.60	59
5	0,0542/0,026	1445	1703	29,76	27.78	11.62	65
6	0,0383/0,030	1316	1660	17,42	16.26	25.36	55
7	0,0293/0,025	1799	1741	8,21	7.66	27.69	73
8	0,0432/0,029	1470	1694	8,73	8.15	26.81	65
9	0,0508/0,025	1741	1707	13,57	12.67	15.64	61

На всіх плавках, незважаючи на досить велику кількість вуглецевмісних матеріалів, що подаються на нагрів металу в печі, отримали низький вміст вуглецю (значення в межах 0,03-0,096% по хімічному аналізу і 0,025-0,038% по окисленості). Окисленість металу на випуску 1118-1799 ррп, температура 1653...1741°С. Наведені також результати розрахунку кількості кисню, що йде на окислення домішок, знайденого як різницю між загальною кількістю кисню, що подається в піч і витрачається на горіння коксу.

Слід відмітити, що існує певний зв'язок між витратою кисню, що перевищує його необхідну кількість для забезпечення стехіометрії реакції горіння коксу, та окисленістю на випуску та температурою металу. Збільшення окислення напівпродукту відбувається при збільшенні витрати кисню, що подається в ДСП і перевищенні величини необхідної по стехіометрії реакцій

горіння палива. За рахунок кількості кисню понад стехіометричного відбувається окислення вуглецю і деяких домішок сталі. У той же час, отримання дуже високою окисленості небажано з точки зору зниження виходу придатного (угар заліза), а також з огляду на зниження стійкості футерівки.

Окисленість при отриманні особливо низьковуглецевої сталі повинна бути такою, щоб забезпечити видалення вуглецю з вихідного напівпродукту до заданої межі, а також тих кількостей вуглецю, які надходять при розкисленні сталі з феросплавів і з електродів при нагріванні сталі на установці ківш-піч, а також з періклазовуглецевої футерівки стальківша (вміст вуглецю в районі шлакового пояса 10-12%, у футерівці стін і днища - 6%).

Як свідчать результати розрахунків мінімально необхідної кількості активного кисню для отримання вмісту вуглецю в сталі 0,005% при різному вихідному його вмісті в напівпродукту, в більшості випадків окисленість на випуску є достатньою, а часто навіть надлишковою, для видалення вуглецю при подальшій позапічній обробці металу. При цьому необхідно врахувати кількість вуглецю, який надходить після випуску металу з печі. Вуглець може поступати з феромарганцем та силікомарганцем. Так при розкисленні вуглецевим феромарганцем ФМн78, який містить до 7% вуглецю, при дачі його в ківш на випуску та при степені засвоєння 35%, розраховали необхідну кількість кисню для окислення вуглецю феросплаву (табл.3.9).

Таблиця 3.9

Необхідна кількість кисню для видалення вуглецю, який вноситься феромарганцем

Вміст марганцю в готовій сталі	Витрата ФМн, кг/т	Приріст вмісту вуглецю, %, який вносить ФМн		Кількість кисню, ppm, необхідного для окислення вуглецю ФМн	
		100	35	100	35
0.10	3.91	0.03	0.01	365.30	127.85
0.15	5.87	0.04	0.01	547.95	191.78
0.20	7.83	0.05	0.02	730.59	255.71

0.30	11.74	0.08	0.03	1095.89	383.56
0.40	15.66	0.11	0.04	1461.19	511.42
0.50	19.57	0.14	0.05	1826.48	639.27
0.60	23.48	0.16	0.06	2191.78	767.12

Виконані розрахунки та урахування реальних величин окислення сталі на випуску з печі, показують, що технологія плавки в ДСП забезпечує окислення додаткових кількостей вуглецю, що вносяться до метал при використанні феромарганцю, для всіх низьковуглецевих марок сталі, в яких марочний вміст марганцю не перевищує 0,3%. У той же час, при вмісті вуглецю на випуску близько 0,03% і з урахуванням ступеня засвоєння вуглецю близько 45% приріст вуглецю не буде суттєвим і на марках сталі з вмістом марганцю до 0,6%.

Для зняття переокисленості металу на випуску перед присадкою розкислювачів необхідне введення певної кількості алюмінію з урахуванням різної величини угару алюмінію та при збереженні здатності металу до саморозкислення вуглецем при вакуумуванні (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

Витрата алюмінію на дослідних плавках для зняття переокисленості.

№ плавки	Величина переокисленості, ppm	Витрата алюмінію на випуску для зняття переокисленості без врахування угару, кг/плавку	Витрата алюмінію на випуску для зняття переокисленості (угар - 50%), кг/плавку	Реальна витрата алюмінію на плавку, кг
1	473	42.04444	84.08889	100
2	88.33333	7.851852	15.7037	100
3	164.6667	14.63704	29.27407	100
4	290.3333	25.80741	51.61481	0
5	789	70.13333	140.2667	150

6	872	77.51111	155.0222	0
7	1475	131.1111	262.2222	100
8	960.6667	85.39259	170.7852	100
9	1130.333	100.4741	200.9481	100

В реальних умовах при вмісті вуглецю на випуску менше 0,04% для низьковуглецевих марок сталі в ківш (120 т) присаджують до 150 кг алюмінію в злитках або стружку пресовану в таблетках, в результаті чого максимальне зниження окислення (при 100% ступеню засвоєння алюмінію) може скласти 1111 ppm. З урахуванням того, що не менше 50% алюмінію угоряє за рахунок впливу атмосфери і шлаку під час випуску, реальне зниження окислення не перевищує 555 ppm.

Порівняння витрат алюмінію за технологічною картою і по розрахунку показує, що реальна величина його кількості не співвідноситься зі ступенем переокисленості металу. В разі перевитрати алюмінію знижується потенційна можливість видалення вуглецю при вакуумуванні (необхідне додаткове введення кисню в тому чи іншому вигляді), а в разі нестачі алюмінію призведе до надмірного угару марганцю з феросплаву або силікомарганцю. Таким чином, при вакуумуванні за рахунок високої окисленості металу може здійснюватись зниження вмісту вуглецю.

### 3.3.2 Розрахунки розислювальної здатності елементів

Зростаючі вимоги до якості сталі підсилюють увагу до процесів розкислення металу, яке є заключною операцією перед розливанням і в значній мірі визначає властивості готового металу. Вміст продуктів розкислення (неметалевих включень) впливає на основні технологічні властивості готової сталі: пластичність, зварюваність, оброблюваність, поріг холодноламкості, схильність до старіння і т.п. Основним завданням розкислення є управління поведінкою і регулюванням вмісту неметалевих включень. Зниження вмісту газів в сталі

забезпечує зменшення вмісту і розміру неметалевих включень, які можуть грати роль концентраторів напружень в структурі металу і бути причиною втомного руйнування сталі. Ступінь зниження вмісту кисню в розчині заліза залежить від розкислювальної здатності елемента, який вводиться в метал. Вона оцінюється вмістом кисню, рівноважного з певною концентрацією розкислювача при заданій температурі.

Кисень в рідкій сталі знаходиться в вигляді розчину і у вигляді оксидних неметалевих включень. Температурна залежність розчинності кисню в чистому рідкому залізі виражається рівнянням [14]:

$$\log\%[O]_{\max} = -6380/T + 2,765. \quad (3.5)$$

При температурі плавлення в чистому залізі в подвійній системі Fe-O розчиняється 0,166% кисню за масою. Реакцію взаємодії кисню з елементом розкислювачем в рідкому залізі в загальному вигляді можна представити рівнянням:



Співвідношення між рівноважним вмістом [O] і [R] визначається константою рівноваги реакції (2), яка при відсутності розчинності оксиду, що утворюється в рідкому залізі визначається рівнянням

$$K = a_R^y \cdot a_O^x = f_R^y \cdot [\%R]^y \cdot f_O^x \cdot [\%O]^x, \quad (3.7)$$

де  $f_R^y$  и  $f_O^x$  коефіцієнти активності. При розкисленні концентрації елемента-розкислювача [R] и кисню [O] невеликі. Можна прийняти  $a_R \sim [R]$  і  $a_O \sim [O]$ , а при утворенні в результаті реакції чистого оксиду його активність дорівнює 1. Значення добутку рівноважних концентрацій розкислювача і кисню використані для порівняння розкислювальної здатності вуглецю, кремнію і марганцю в чистому залізі. При проведенні термодинамічних розрахунків використані вирази, наведені в [15,16]. Як показали результати розрахунків для бінарних систем, розкислювальна здатність вуглецю при його вмісті 0,55-0,62%

вище, ніж кремнію при вмісті 0,25-0,45%. Марганець порівняно слабкий розкислювач і не забезпечує зниження окислення металу до необхідних меж. Однак марганець використовують при виплавці багатьох марок сталі. Позитивна дія марганцю на властивості сталі пов'язана зі зменшенням вмісту сірки, поліпшенням видалення утворених включень MnO через низький міжфазний натяг на межі поділу «метал-включення MnO». Розкислювальний ефект марганцю в присутності вуглецю може виявлятися при введенні його в метал спільно з іншими сильнішими розкислювачами - кремнієм, алюмінієм.

Вплив марганцю і кремнію як слабших розкислювачів на розкислювальну здатність вуглецю для потрійних систем враховують через параметри взаємодії, значення яких наведені в [15, 16]. З огляду на це рівноважний вміст кисню в металі перед вакуумуванням склав максимум 31,4 ppm (при вмісті, %: вуглецю 0,55, кремнію 0,25, марганцю 0,56); мінімум 27,0 ppm (при вмісті, %: вуглецю 0,61, кремнію 0,42, марганцю 0,85). Порівняння отриманих розрахункових значень вмісту кисню з результатами прямого визначення окислення датчиками CELOX, показало їх гарний збіг (мінімум 28 ppm, максимум 43 ppm) при температурі 1610-1630°C.

Алюміній є дуже сильним розкислювачем, більш сильним, ніж кремній і вуглець, так як вже при незначному його вмісті в металі досягаються рівні кисню, які забезпечуються кремнієм і вуглецем при значно більш високих їх концентраціях. Особливої уваги потребує розрахунок присадки алюмінію для одностадійного розкислення металу після вакуумування. За час вакуумування відбувається саморозкислення металу, яке становить 14-20 ppm. Є відомості [17], згідно з якими при вмісті вуглецю в сталі більше 0,2% концентрація розчиненого в металі кисню після вакуумування складає 20 - 40ppm.

При фінішному розкисленні сталі потрібна інформація про вміст активного кисню в металі перед введенням алюмінію і силікокальцію. Це дасть можливість визначити витрату алюмінію, який необхідний для глибокого

розкислення і може запобігти взаємодії кремнію з силікокальцієм та киснем з утворенням первинних силікатних включень.

З урахуванням параметрів взаємодії для визначення рівноважного вмісту активного кисню використані залежності:

- при різному вмісті алюмінію

$$\lg[O]_T = 2/3 \lg K_T - 2/3 \lg[Al] + 1,17[Al], \quad (3.8)$$

где  $\lg K_T = -\frac{63790}{T} + 20,58,$

- при різному вмісті кремнію

$$\lg[O]_T = 1/2 \lg K_T + 1/2 \lg a_{SiO_2} - 1/2 \lg[Si] + 0,037[Si], \quad (3.9)$$

где  $\lg K_T = -\frac{30477}{T} + 11,469.$

У практиці виробництва сталі використання комплексних розкислювачів має ряд переваг. При їх застосуванні істотно поліпшуються термодинамічні умови розкислення. Відомо, що марганець підвищує розкислювальну здатність кремнію. Марганець і кремній окремо і спільно підвищують розкислювальну здатність алюмінію. Це пов'язано зі зменшенням термодинамічної активності утвореного оксиду в складних продуктах розкислення, які відрізняються від складу продуктів при роздільному розкисленні.

При використанні силікокальцію для модифікування сталі кремній, що входить до складу силікокальцію, може надати розкислювальну дію за умови утворення окисної фази (силікатів кальцію), в якій активність  $SiO_2$  буде менше одиниці. При зменшенні активності кремнезему дія кремнію в складі силікокальція збільшується. Згідно з літературними даними мінімальна активність  $SiO_2$  дорівнює 0,024 в двохкальцієвому силікаті. Тому, розрахунки виконані для утворення  $2CaO \cdot SiO_2$ . Результати розрахунку рівноважного вмісту кисню при різній концентрації елементів розкислювачів і температурах наведені

в таблиці 1 (розкислення прийняті  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  і  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Як показують результати розрахунків, в діапазоні концентрацій, які відповідає марочним складом сталі, найбільшу розкислювальну здатність має алюміній. Однак, при утворенні двухкальцієвого силікату кремній силікокальція здатний надавати розкислюючу дію, утворюючи силікатні неметалеві включення. Для того, щоб уникнути утворення силікатів кальцію, необхідно мати вміст активного кисню нижче 2,5 ppm, що забезпечується залишковим вмістом розчиненого алюмінію в сталі 0,025-0,027% (визначається датчиком CELOX).

Висока хімічна активність чистого кальцію і висока пружність його парів при температурі сталеваріння призводять до необхідності використовувати в металургійній технології не чистий кальцій, а його сплави. Найбільш широко використовують силікокальцій різних марок, сплави з алюмінієм, магнієм. Алюміній є найбільш широко використовуваним розкислювачем і елементом, який подрібнює зерно, але викликає утворення тугоплавких включень, здатних до укрупнення. При прокатці вони утворюють ланцюжки з глинозему і погіршують механічні властивості сталі. Якщо одночасно з алюмінієм використовують кальцій, то включення, що утворюються, являють собою легкоплавкі алюмінати кальцію. Вони знаходяться в рідкому стані і здатні швидко спливати в сталі. Включення, що залишилися в сталі, мають малі розміри і сферичну форму і не знижують механічну властивість сталі.

При розкисленні сталі алюмокальцієм склад продуктів розкислення визначається діаграмою станів  $\text{FeO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ . Аналіз даної діаграми показує можливість утворення наступних неметалевих фаз: моно-, бі- і гексаалюмінатов кальцію, оксидів кальцію і алюмінію, герцініта, оксидного розплаву ( $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), а також газоподібного кальцію. Головним є утворення в рідкій сталі легкоплавких з високою рідко плинністю продуктів реакцій розкислення для забезпечення асиміляції їх шлаком.

Сучасними процесами модифікації сталі є продувка металу в ковші порошкоподібною формою кальцію або його сплавів на великій глибині

зануреними фурмами; вистрілювання контейнера з кальцієм в ківш; введення в метал з високою швидкістю дроту, який містить сполуки кальцію, плакованих сталю. Як зазначалося в [18, 19], ефективність кальцієвих сплавів підвищується при використанні їх разом з алюмінієм. У цьому випадку зменшується негативний вплив сульфідних включень і не проявляються характерні для глинозему скупчення частинок (кластерів) оксисульфідних включень.

Таблиця 3.11

Рівноважний вміст кисню при розкисленні алюмінієм і кремнієм

Елемент-розкислювач	Продукт розкислення	Концентрація розкислювача, %	Активність кисню, <i>ppm</i> при температурі (°C)		
			1500	1550	1600
Алюміній	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,015	1,26	2,68	6,1
		0,020	1,05	2,24	5,2
		0,025	0,92	1,96	4,6
		0,030	0,825	1,75	4,1
Кремній	SiO <sub>2</sub>	0,25	28,7	48,5	81,0
		0,30	26,0	44,0	74,5
		0,35	24,0	41,0	69,0
		0,40	22,6	39,0	65,0
Силікокальцій	2CaO·SiO <sub>2</sub>	0,25	4,35	7,5	12,6
		0,30	4,0	6,9	11,5

		0,35	3,7	6,45	10,7
		0,40	3,4	6,0	10,0

Використання комплексних розкислювачів при виробництві сталі дозволяє використовувати синергетичний ефект спільної розкислюючої дії елементів-розкислювачів. Застосування кальцію дозволяє значно поліпшити якість сталі шляхом контролю морфології неметалевих включень, підвищення ступеня розкислення і десульфурації.

#### 3.4 Наближення реакцій дегазації сталі до рівноваги при вакуумуванні в ковші

Основою процесів зневуглицювання в сталеплавильних агрегатах є потоки кисню з газової фази в шлак і метал, і витрачання кисню на накопичення в шлаку, металі та окислення вуглецю і домішок. Рушійною силою перенесення є різниця відповідних потенціалів в фазах, які реагують. Процеси переносу кисню, вуглецю і теплової енергії, які здійснюються в промислових агрегатах за рахунок різниці потенціалів, є нерівноважними и і протікають у відкритих системах. Незворотність реальних нерівноважних процесів супроводжується зміною ентропії, яка при цьому неминуче збільшується.

Обов'язковою умовою виробництва якісної і високоякісної сталі є ковшова обробка. Одним з поширених методів ковшової обробки є вакуумування в ковшах з одночасною продувкою металу інертним газом, зазвичай аргоном. Зниження вмісту в металі розчинених газів водню, кисню і, по можливості, азоту є однією з основних цілей вакуумування. Істотним показником ефективності процесу дегазації є повнота завершення реакцій, яка може бути оцінена за величиною наближення цих реакцій до рівноваги.

За результатами моделювання на математичній моделі [20] оцінювали

наближення реакцій дегазації до рівноваги і з'ясовували фактори, що впливають на неї. Розрахунки теплообміну показали, що прогрів бульбашки аргону відбувається при граничних умовах першого роду, і час його нагрівання до температури металу становить 0,2-0,4 секунди, інші процеси не лімітуються.. Згідно з розрахунками, масообмін газів в бульбашці з металом протікає при значеннях числа Біо дифузійного –  $Bi_D$  менше 0,2, що свідчить лише про зовнішнє лімітування, тобто стадією, що визначає швидкість процесу, є дифузія через прикордонний шар. Це відповідає відомим літературними даними [21, 22], згідно з якими лімітуючою ланкою процесів дегазації є перехід реагентів через прикордонний шар на міжфазному кордоні між металом і газовою фазою. При побудові динамічної моделі за її основу була прийнята відома модель вакуумного зневуглецювання [20] та доповнена процесом одночасного продування металу аргоном.

Основні положення моделі [23]: процеси масообміну металу з бульбашкою аргону при спливанні відбуваються з газом, нагрітим до температури металу, і лімітуються тільки зовнішньою дифузією; в зв'язку з інтенсивним перемішуванням склад металу за його обсягом вважається постійним; видалення розчинених газів відбувається за такими статтями витрат: в бульбашки CO, в бульбашки аргону і через поверхню металу вільну від шлаку. При відхиленні системи від рівноваги виникають потоки речовин з металу в газову фазу, які пропорційні відповідним коефіцієнтам масовіддачі –  $\beta$  (м/с) і різниці концентрацій речовин в металі рівноважної з газовою фазою. При малих концентраціях речовин їх активності можуть бути замінені концентраціями (кг/м<sup>3</sup>).

У початковій стадії видалення газів, коли в бульбашці або над поверхнею металу даний газ відсутній, його парціальний тиск дорівнює нулю і рівноважний з ним вміст газу також дорівнює нулю, отже, і це відношення також дорівнює нулю. При досягненні в металі концентрації, рівноважної з вмістом даного газу в газовій фазі, це відношення дорівнює одиниці.

З метою пошуку можливих оптимальних режимів дегазації металу було проведено математичне моделювання впливу різних технологічних факторів на наближення системи до рівноваги [24]. Кількість сопел в продувальній вставці впливає на наближення до рівноваги реакцій видалення кисню (у вигляді CO) і водню по висоті шару металу при їх дифузії в бульбашки аргону (рис. 3.7).

Збільшення кількості сопел при однаковій витраті аргону призводить до зниження розмірів бульбашок і, як наслідок, зростання загальної площі поверхні. Реакція видалення кисню (зневуглецювання) далека від рівноваги і на повноту її завершення істотне значення справляє загальна поверхня бульбашок. Реакція видалення водню, навпаки, близька до рівноваги, і площа поверхні бульбашок практично не впливає. Як показало моделювання, видалення водню в бульбашку аргону пропорційно його витраті.

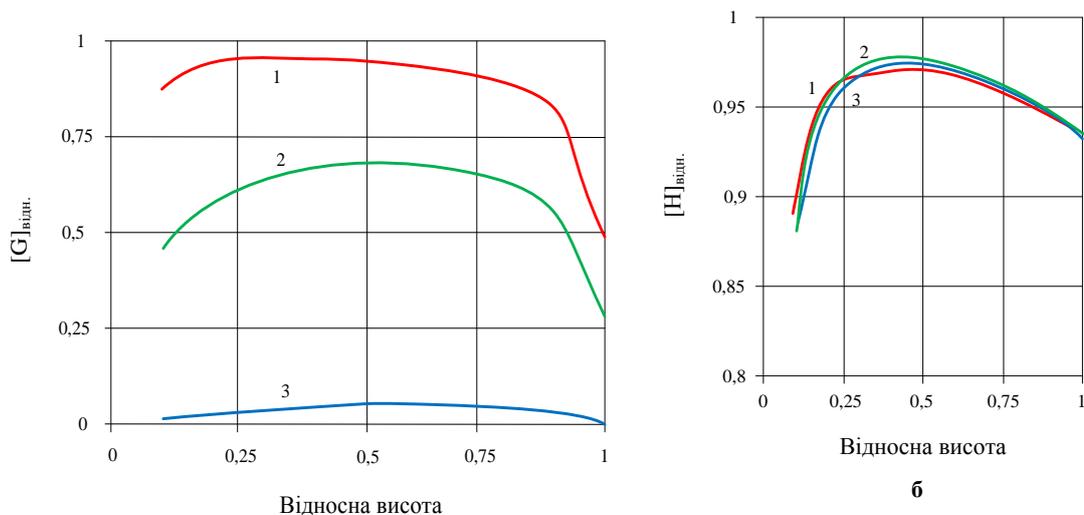


Рисунок 3.7 – Вплив числа сопел у вставці на наближення до рівноваги реакцій видалення кисню – а і водню - б; кількість сопел: 1 – 20, 2 – 10, 3 – 1

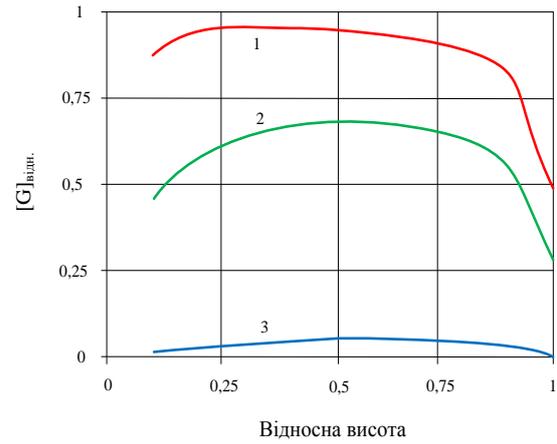


Рисунок 3.8 – Наближення до рівноваги реакцій видалення водню - 1, азоту - 2, кисню – 3.

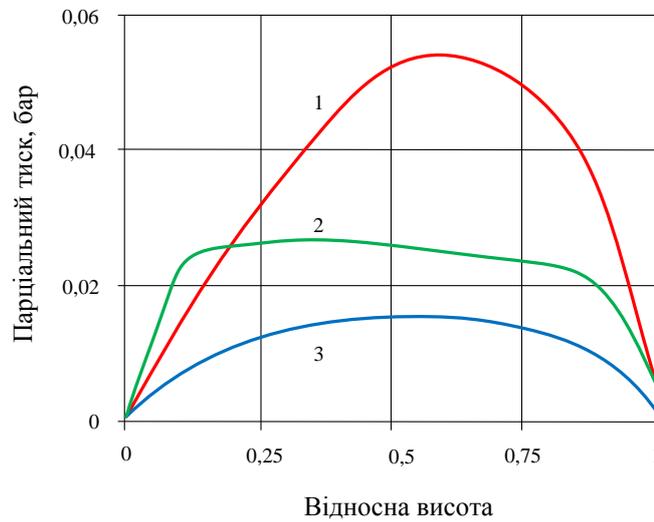


Рисунок 3.9 – Парціальний тиск газів в бульбашці аргону по ходу спливання: 1 – CO, 2 – H<sub>2</sub>, 3 – N<sub>2</sub>.

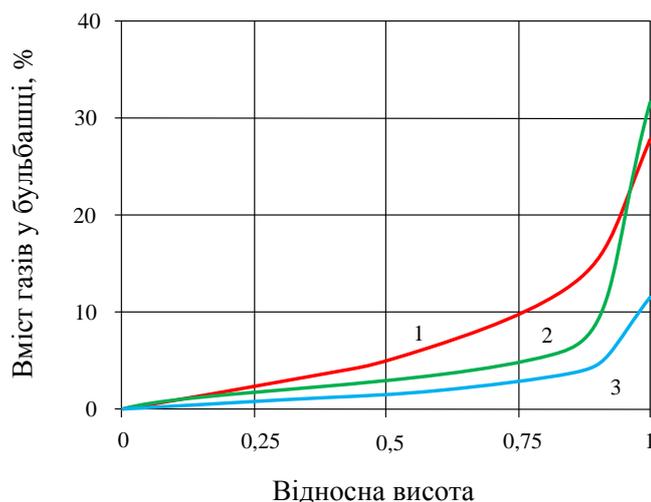


Рисунок 3.10 – Вміст газів у бульбашці аргону: 1 – CO, 2 – H<sub>2</sub>, 3 – N<sub>2</sub>

Швидке наближення реакції видалення водню до рівноваги пов'язано з низькою його масовою розчинністю в залізі і, як наслідок, з низьким рівноважним парціальним тиском водню в бульбашках аргону і CO. Оцінка наближення до рівноваги реакцій видалення кисню, азоту та водню на десятій хвилині процесу вакуумування (рис. 3.8) показала, що найближче до рівноваги знаходиться реакція видалення водню, надалі - реакція видалення кисню, реакція видалення азоту займає проміжне місце. Зміна парціального тиску газів в бульбашці аргону при спливанні в вакуумі показало, що в цьому випадку парціальний тиск водню також швидко досягає свого граничного значення і при подальшому підйомі практично не змінюється (рис. 3.9). Парціальний тиск CO проходить через максимум. У другій половині спливання парціальний тиск падає, так як загальний тиск знижується, а дифузія не встигає компенсувати це зниження.

В процесі спливання вміст газів в бульбашці аргону змінюється (рис. 3.10). Вміст CO в пазирі весь час помітно зростає, в той час як вміст водню істотно зростає тільки в верхніх горизонтах металу при низьких загальних тисках в

бульбашці. Все це дозволяє пояснити суттєве наближення реакції видалення водню до рівноваги і досить слабке наближення для реакції зневуглецювання.

Величина наближення до рівноваги робить істотний вплив на долю видалення газів за статтями: в бульбашки CO, в бульбашки аргону і через відкриту поверхню металу. На рис. 3.11 наведено дані видалення водню за статтями при вакуумуванні, з якого випливає, що збільшення витрат аргону з 0,1 до 0,25 м<sup>3</sup>/хв підвищує його видалення в бульбашки аргону, приблизно, вдвічі, але при цьому падає частка видалення в бульбашки CO. Основною статтею є видалення через поверхню металу (60 – 70 %).

У зв'язку з цим для забезпечення високого ступеня реалізації розкислювальної здатності вуглецю в умовах вакууму необхідно: застосовувати основну футеровку сталерозливних ковшів, до складу якої входять важко відновлювані оксиди; підтримувати високу основність шлаку і мінімальний вміст оксидів заліза в ньому; перемішувати розплав в ковші інертним газом для полегшення умов зародження продуктів реакції окислення вуглецю.

Як показує практика, при вмісті вуглецю в сталі близько 0,50% за рахунок вакуумно-вуглецевого розкислення концентрацію кисню в металі вдається знижувати до 0,002–0,003%, що нижче рівноважної з вмістом кремнію, але вище рівноважної з розчиненим у металі алюмінієм. Тому при введенні кремнію в метал після вакуумно-вуглецевого розкислення первинні ендогенні включення не утворюються. За рахунок зниження вмісту розчиненого в металі кисню шляхом розкислення вуглецем під вакуумом подальше облягати розкислення протікає з мінімальним вигаром розкислювачів. Такий спосіб обробки рекомендується для виробництва вільної від великих оксидних включень і їх локальних скупчень особливо чистої сталі.

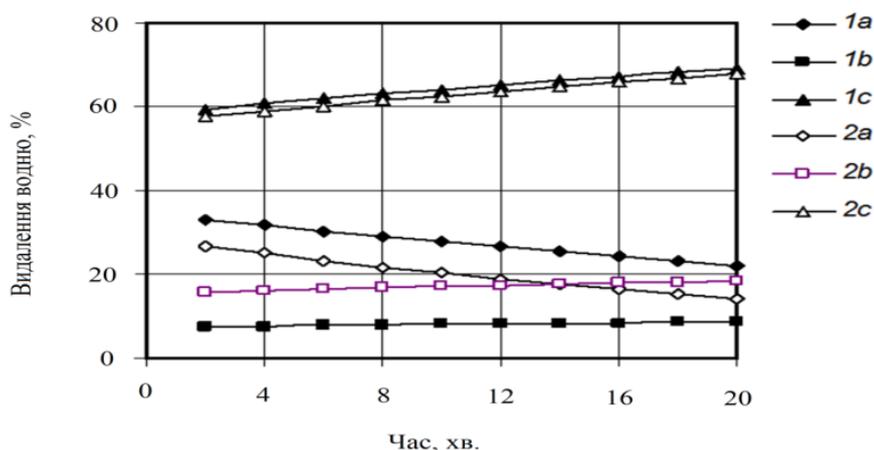


Рисунок 3.11 – Вплив витрати аргону на видалення водню за статтями:

а - в бульбашки CO, б - в бульбашки аргону в - через відкриту поверхню; витрата аргону: 1 – 0,1, 2 – 0,25 м<sup>3</sup>/хв.

Для запобігання надмірно бурхливого розвитку під вакуумом реакції окислення вуглецю проводять часткове розкислення сталі шляхом підвищення в ній вмісту кремнію і (або) алюмінію. Завдяки перемішуванню металу і застосуванню порівняно невеликої кількості розкислювачів, можливе досягнення такого ж високого ступеня чистоти сталі по оксидним включенням, як і при вакуумуванні сталі в нерозкисленому виді. Як показали результати моделювання, реакція видалення водню близька до рівноваги, а кисню - далека від рівноваги. Для видалення водню в бульбашки аргону необхідно збільшувати витрату аргону, а кисню - площу поверхні бульбашок аргону.

У всіх випадках видалення розчинених газів у металі істотну роль відіграє кінетика процесів на межі металу - газова фаза і ступінь наближення до рівноваги реакції розчинений газ - газова фаза, а також реакції видалення декількох газів. Моделювання та докладний аналіз термодинамічних та кінетичних особливостей розчинення газів у металі дозволили з'ясувати їхню поведінку в металі під час продування металу інертними газами у ковші та при вакуумуванні.

Поведінка системи метал – газова фаза при видаленні кисню і водню вивчалася для випадку зміни вмісту кисню в межах 0,002 – 0,01%, витрати аргону при продуванні 0,10 – 0,25 м<sup>3</sup>/хв, кількості сопел у дутьовій вставці 1 -

20. Для всіх випадків приймалася маса металу в ковші - 100 т, висота шару металу - 2,9 м, вміст вуглецю в металі - 0,6%.

Встановлено, що видалення кисню відбувається, головним чином у бульбашки CO. Частка кисню, що видаляється в пузирі CO в більшості варіантів розрахунку становить 60 - 70% і тільки при збільшенні кількості сопел в продувній фурмі частка кисню, що видаляється, в пузирі CO падає до 40%, але при цьому зростає частка видалення водню у бульбашки аргону у зв'язку з підвищенням їхньої питомої поверхні.

Основне видалення водню (50-70%) відбувається через відкриту поверхню металу (рис.3.12). Істотно зростає частка водню, що видаляється через поверхню металу за її збільшення. Встановлено зменшення швидкості видалення водню зі зростанням вмісту кисню. Останнє явище здається незвичайним, оскільки зі збільшенням вмісту кисню зростає кількість бульбашок CO і, здавалося б, має бути зростання видалення кисню в ці бульбашки. Це пояснюється тим, що частка площі, зайнята потоком водню зі зростанням вмісту кисню падає, отже зростає частка площі, зайнята потоком кисню, тобто потік кисню блокує поверхню пазирів CO. Збільшення витрати аргону призводить до зростання частки водню, що видаляється в бульбашки аргону і зменшення частки водню, що видаляється в бульбашки CO. При зміні технологічних параметрів спостерігається блокування значної частини поверхні розділу метал - газова фаза потоком кисню. Це в першу чергу пов'язано з великим відхиленням реакції утворення CO від рівноваги.

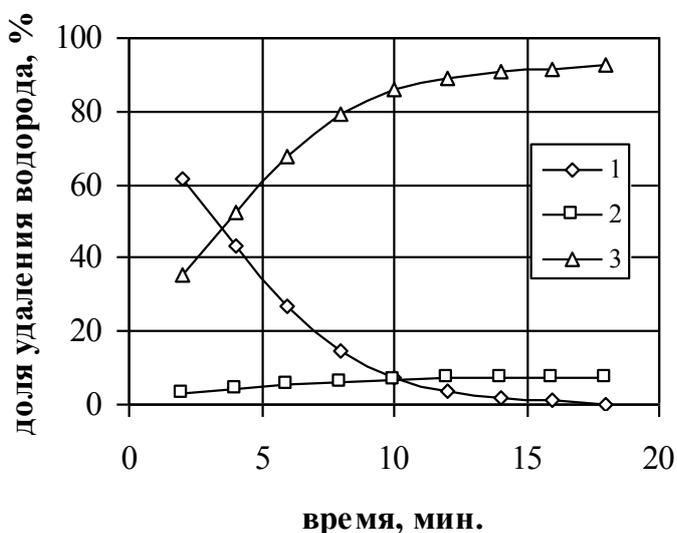


Рисунок 3.12 - Частка видалення водню за статтями: 1 – у пазир СО, 2 – у пазираргону, 3 – через поверхню. Інтенсивність продування  $Ar = 2 \text{ м}^3/\text{хв}$ .

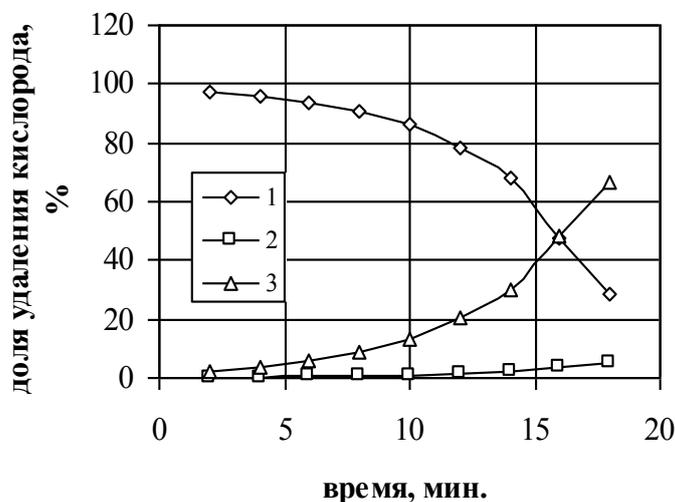


Рисунок 3.13 – Частка видалення кисню по статтям при інтенсивності продувки аргоном (а)  $2 \text{ м}^3/\text{хв}$ : 1 – в пазир СО, 2 – в пазир аргона, 3 – через поверхню

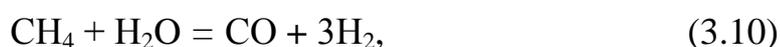
У всіх варіантах зміни технологічних параметрів спостерігається блокування значної частини поверхні розділу метал - газова фаза потоком кисню. Це пов'язано з тим, що потоки кисню по масі приблизно на порядок вищі за потоки водню. При зміні технологічних параметрів відбувається процес саморегулювання перерозподілу потоків водню і кисню. Це в першу чергу пов'язано з великим відхиленням реакції утворення СО від рівноваги.

### 3.5 Визначення характеристик газової фази при газокисневій конверсії метану

Розведення кисневого дугтя природним газом (метаном) ефективніше, ніж використання такої ж кількості водяної пари, для обмеження температури реакційної поверхні та інтенсивності пилоутворення - випаровування заліза (Fe)

та його оксиду (FeO). На цю особливість звернуто в роботі [25]. Зроблено висновок, що поєднання постачання кисню та вуглекислого газу не лише прискорює процес плавки, а й мінімізує утворення нітридів (наприклад, TiN, AlN) та шкідливих газів (наприклад, NO<sub>x</sub>), сприяючи розвитку технологій виробництва низьковуглецевої сталі. Збільшення частки газу в дутті викликає споживання більшої частини кисню на окислення, що призводить, до збільшення обсягу газоподібних продуктів реакції відновлювального характеру та до зниження загального окисного потенціалу дуття.

У металургійному виробництві в якості енергетичного та технологічного газу широко використовується природний газ, використання якого в технологічних процесах відбувається у «сирому» вигляді, або через попередню його конверсію [26]. У процесі конверсії використовується вуглекислий газ, водяна пара і кисень, окремо, або суміші – комплексний окиснювач. При паровій конверсії метану, окиснення проводять водяною паром при високих температурах за наступною основною реакцією:



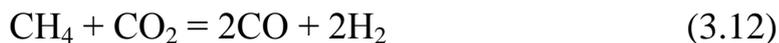
$$\Delta H_{298}^0 = +206 \text{ кДж/моль}$$

Можлива також реакція конверсії при збільшеній кількості водяної пари:



$$\Delta H_{298}^0 = +181,88 \text{ кДж/моль}$$

Збільшення кількості водяної пари, що подається, також підвищує конверсію метану, однак призводить до істотних змін складу конвертованого газу. Парова конверсія можлива при температурі вище ~893K і має високу ендотермічність. В системі також протікають реакції водяного газу та вуглекислотної конверсії. Остання отримує термодинамічну перевагу при T=1083 K. Таким чином, газова фаза, що утворюється за участю реакції (3.10), реакції водяного газу та:



містить надмірну кількість  $\text{CO}_2$ , що знижує відновний потенціал її. Утворення  $\text{CO}_2$  можливе також за реакцією (3.11).

Вуглекислотна конверсія (ВКМ) або сухий риформінг є взаємодією двох парникових газів  $\text{CO}_2$  і  $\text{CH}_4$ . Сухий риформінг для отримання синтез-газу проводять переважно при співвідношенні  $\text{CO}:\text{H}_2=1:1$ . Процес сухого риформінгу може представлений реакцією (3.3),  $\Delta H_{298}^0$  якої дорівнює +247 кДж/моль.

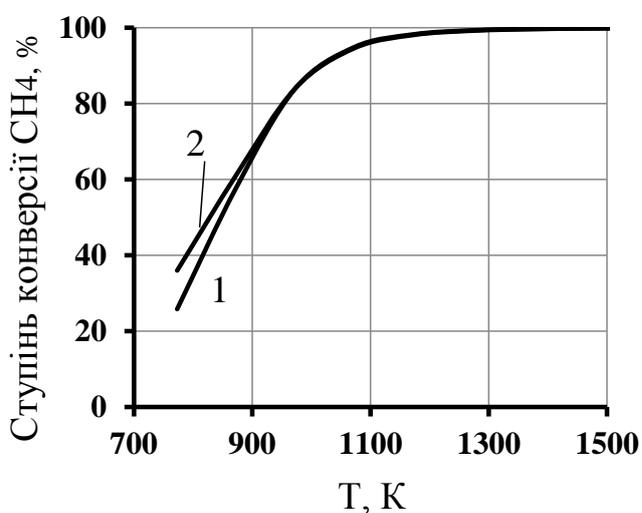


Рисунок 3.14 Температурна залежність ступеня конверсії метану для різних окиснювачів: 1- $\text{CO}_2$ ; 2- $\text{H}_2\text{O}$

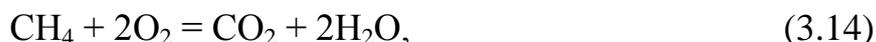
З підвищенням температури вихід  $\text{H}_2$  і  $\text{CO}$  реакції конверсії зростає, досягаючи межі поблизу 1173 К.

Витрати тепла на парову та вуглекислотну конверсію мають бути компенсовані екзотермічною реакцією парціального окиснення метану:



$$\Delta H_{298}^0 = -35,6 \text{ кДж/моль}$$

В умовах надлишку  $O_2$  розвивається процес згорання  $CH_4$  з утворенням  $H_2O$  та  $CO_2$  з виділенням кількості тепла, що більш ніж у 20 разів перевищує величину  $\Delta H^0$  реакції (3.13):



$$\Delta H_{298}^0 = -802 \text{ кДж/моль}$$

Складом окисної газової фази ( $H_2O+CO_2+O_2$ ) можна регулювати не лише склад конвертованої газової фази, а й температурний режим печі. У зв'язку з цим вивчали вплив кисню у вихідній газовій суміші на ступінь конверсії  $CH_4$ , склад конвертованого газу.

Для аналізу використано результати [27], що базується на спільному рішенні рівнянь матеріального балансу з рівняннями констант рівноваги реакцій, що визначаються [28]. У таблицях 3.12 та 3.13 наведено склади рівноважних продуктів парової та парокисневої конверсії  $CH_4$  при різних температурах та тисках. При порівнянні результатів слід враховувати, що 0,6 молей кисню еквівалентні 1,2 молей  $H_2O$ . Якісні закономірності процесу за участю лише водяної пари зберігається і в присутності кисню. Так підвищення температури супроводжується зростанням ступеня конверсії метану ( $\alpha$ ).

Таблиця 3.12

## Рівноважний склад продуктів парової конверсії метану

Температур а, К	Ступінь конверсії $CH_4$ , $\alpha$ %	Склад продуктів конверсії, %				
		$CO_2$	$CO$	$H_2$	$CH_4$	$H_2O$
$CH_4 : H_2O = 1:0,8$						

700	78,85	1,68	19,07	63,93	11,75	3,57
900	89,16	0,03	23,44	70,41	6,02	0,10
1100	89,40	0	23,53	70,58	5,98	0
1300	89,41	0	23,53	70,59	5,88	0
$\text{CH}_4 : \text{H}_2\text{O} = 1:1$						
700	84,06	2,46	18,55	65,51	7,97	5,51
900	98,1	0,19	24,33	73,77	0,95	0,76
1100	99,66	0,02	24,89	74,76	0,17	0,15
1300	99,90	0	24,97	74,93	0,05	0,04
$\text{CH}_4 : \text{H}_2\text{O} = 1:2$						
700	95,02	5,63	13,38	62,64	1,66	16,69
900	99,94	3,36	16,63	63,33	0,02	16,66
1100	100	2,37	17,63	62,37	0	17,63
1300	100	1,81	18,19	61,81	0	18,19
$\text{CH}_4 : \text{H}_2\text{O} = 1:4$						
700	99	7,5	6,64	49,94	0,2	35,72
900	100	5,35	8,94	48,20	0	37,52
1100	100	4,03	10,26	46,89	0	38,83
1300	100	3,22	11,07	46,07	0	39,64

Таблиця 3.13

Рівноважний склад продуктів паровокисневої конверсії метану

Температур а, К	Ступінь конверсії $\text{CH}_4$ , $\alpha$ %	Склад продуктів конверсії, %				
		$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2\text{O}$

CH <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> O : O <sub>2</sub> = 1:1:0,6						
700	97,79	9,66	14,91	52,87	0,85	21,7
900	99,97	6,49	18,50	51,48	0,01	23,52
1100	100	4,83	20,17	49,85	0	25,17
1300	100	3,83	21,17	48,83	0	26,17
CH <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> O : O <sub>2</sub> = 1:2:0,6						
700	99,17	10,65	9,21	46,14	0,23	33,77
900	100	7,77	12,22	43,77	0	36,23
1100	100	6,01	13,99	42,01	0	37,99
1300	100	4,89	15,11	41,39	0	39,11
CH <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> O : O <sub>2</sub> = 1:3:0,6						
700	99,63	10,44	6,18	40,25	0,08	43,06
900	100	7,98	8,69	37,95	0	45,36
1100	100	6,34	10,33	36,34	0	46,99
1300	100	5,26	11,41	35,26	0	48,08

При високих температурах, нормальному тиску та значному надлишку водяної пари залишковий вміст CH<sub>4</sub> у продуктах парової конверсії незначний, що забезпечує значення ( $\alpha$ ), близько 100%. При цьому збільшується вміст відновлювальних компонентів (CO + H<sub>2</sub>). Зміна співвідношення H<sub>2</sub>/CO у продуктах конверсії з температурою визначається особливостями рівноваги реакції водяного газу, яке з підйомом температури зміщується у бік більшого виходу CO. Вище 1000 K значення ( $\alpha$ ) близько до 100%, тому що у рівноважній газовій фазі присутні лише сліди CH<sub>4</sub>. Підвищення об'ємного вмісту водяної

пари в дутті в присутності кисню у всіх випадках призводить до збільшення ступеня перетворення метану. При цьому зростає кількість окисних компонентів  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$  у продуктах конверсії.

Заміна частини водяної пари еквівалентною кількістю кисню супроводжується загальною для всіх вивчених режимів тенденцією кількісних змін складів продуктів конверсії. Це знайшло відображення у помітному зменшенні кількості відновлювальних компонентів  $\text{H}_2$  та  $\text{CO}$  та зростанні виходу двоокису вуглецю та парів води.

Таким чином, виконані термохімічні розрахунки дозволили виявити основні закономірності змін енергетичних характеристик, що мають місце при конверсії  $\text{CH}_4$ , залежно від вихідних умов. Результати показали, що при організації процесу перетворення ПГ у печі за умов надлишку окиснювачів стосовно  $\text{CH}_4$ , навіть часткова заміна водяної пари (або  $\text{CO}_2$ ) киснем дозволить значно поліпшити тепловий баланс роботи печі. Це дозволяє регулювати температурний режим процесу конверсії.

## ВИСНОВКИ

Для оцінки ступіню впливу всіх можливих технологічних факторів проведено кореляційно-регресійний аналіз для прогнозування значення показника виплавки за допомогою отриманого регресійного рівняння. Застосовано одновимірний кореляційний аналіз, який є одним з методів статистичного аналізу взаємозв'язку кількох ознак та застосовується, коли дані спостереження можна вважати випадковими і вибраними з генеральної сукупності, розподіленої по багатовимірному нормальному закону.

Встановлено, що збільшення витрат кисню на паливних пристроях (маніпулятор Палмур і пальник-спис (Stein Lange) незначно знижує вміст вуглецю в металі на випуску. Більш істотно впливає витрата кисню на «не паливних» пристроях, що сприяє зниженню вмісту вуглецю на випуску. На вміст вуглецю на випуску, що визначається хімічним аналізом і на температуру металу

перед випуском має вплив загальна витрата кисню.

Проаналізовано вплив вхідних факторів (вміст вуглецю і окисленості металу на випуску) на зневуглецювання металу на установці піч-ківш, а також угари елементів-розкислювачів і ступінь десульфурації металу при позапічній обробці. Встановлено, що зі збільшенням вмісту вуглецю на випуску угар вуглецю на УКП (з урахуванням вуглецю, який вводиться розкислювачами) збільшується. Істотний внесок в зниження вмісту вуглецю при позапічній обробці надає окисленість вихідного металу.

Істотної залежності між вмістом сірки в напівпродукті і температурою металу на випуску встановлено не було встановлено. Значний вплив має вдування кисню в піч і одержана окисленість металу на видалення сірки в газову фазу. Більш низький вміст сірки в металі на випуску сприяє кращому протіканню процесу десульфурації на УКП, зниженню витрати шлакоутворюючих і десульфуруючих реагентів.

На підставі отриманих результатів регресійного аналізу отримані функціональні залежності факторів, що роблять найбільший вплив на характеристики напівпродукту, виплавленого в ДСП. Встановлено, що факторами, які сприяють зниженню вмісту вуглецю в готовій сталі, є: висока окисленість сталі на випуску плавки; низький вміст вуглецю на випуску плавки; висока температура металу на випуску плавки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1.Sustainable Transition Pathways for Steel Manufacturing: Low-Carbon Steelmaking Technologies in Enterprises. Jinghua Zhang, Haoyu Guo,Gaiyan Yang,

Yan Wang, Wei Chen. *Journals. Sustainability*. 2025. Volume 17. Issue 12. 5329.  
<https://doi.org/10.3390/su17125329>

2. Joule. Volume 5, Issue 4, 2021, Pages 829-862. Review. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. Zhiyuan Fan, S. Julio Friedmann.

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>

3. Луценко В. А., Голубенко Т. М., Луценко О. В. Вплив параметрів обробки на структуру та властивості низьковуглецевої сталі. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2024. Вип. 38. С. 621-631.  
<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-621-631>

4.Стовпченко Г.П., Степаненко Д.В., Медовар Л.Б. Обґрунтування енергетичних та екологічних переваг використання високоміцних сталей за методологією оцінки життєвого циклу. Теорія і практика металургії. №5, 2021. С.5-13. ISSN 1028-2335. 10.34185/tpm.5.2021.01

5. Лопухов Г.А. Плавка стали в дуговой печи Consteel с использованием жидкого чугуна в шихте / Г.А.Лопухов // *Электрометаллургия*. - 2006. -№1. - С.40-42.

6. Аргента П. Технология выплавки стали в электродуговых печах. Новые рекорды производительности / П. Аргента, М.Б. Ферри // *Черные металлы*. – 2005. - июль-август. – С. 44-48

7. Кемпкен Й. Модельные расчеты изменения содержания азота в стали по ходу продувки в конвертере ЛД / Й. Кемпкен, В. Плюшкель // *Черные металлы*. – 1996. – №1. – С. 23-30

8. Min Wang, Yan-ping Bao, Quan Yang, Li-hua Zhao, Lu Lin. Coordinated control of carbon and oxygen for ultra-low-carbon interstitial-free steel in a smelting process. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. December 2015, Volume 22, Issue 12, pp 1252–1259.. DOI: 10.1007/s12613-015-1192-x.

9. B. Deo, A. Overbosch, B. Snoeijer, D. Das, K. Srinivas, Control of slag formation, foaming, slopping, and chaos in BOF, *Trans. Indian Inst. Met.*, 66(2013), No. 5, p. 543.

10. B. Deo, A. Karamchetty, A. Paul, P. Singh, and R.P. Chhabra, Characterization of slag-metal droplet-gas emulsion in oxygen steelmaking converters, *ISIJ Int.*, 36(1996), No. 6, p. 658

11. F.P. Tang, Z. Li, X.F. Wang, B.W. Chen, and P. Fei, Cleaning IF molten steel with dispersed in-situ hetero-phases induces by the composite sphere explosive reaction in RH ladles, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 18(2011), No. 2, p. 144

12. Zhijun HE , Yonglong JIN , Jihui LIU , Zhigang GUAN. Technology study of smelting the super-low-carbon stainless steel with vod refining furnace. *metalurgia international*. Vol. XVII no. 2 (2012).

13. Низьковуглецева сталь для тонкого листового прокату з підвищеними властивостями Камкіна Л.В., Проїдак Ю.С., Камкин В.Ю., Ремез О.А., Безшкurenко О.Г. Теорія і практика металургії. №1-2, 2018.С.

14. Turkdogan E.T.: *Fundamentals of Steelmaking*. The University Press, Cambridge. 1996.

15. Ashok K., Mandal G.K., Bandyopadhyay D. Theoretical Investigation on Deoxidation of Liquid Steel for Fe-Al-Si-O System. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, Volume 68, Supplement 1, p. 9-18.

<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12666-015-0574-0#page-2>

16. Malyutin K.V., Paderi S.N.: Interaction Parameters of carbon in Liquid Iron and Thermodynamics of Carbon and Oxygen in Alloyed Iron Melts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, Volume 2007, Issue 7, p. 545-551.

<http://link.springer.com/article/10.1134%2FS003602950707002#/page-1>.

17. Мчедlishvili В.А.: Термодинамика и кинетика раскисления стали. М., Metallurgy, 1978. – 288 с.

18. J.-P. Birat. Impact of steelmaking and casting technologies on processing and properties of steel // Ironmaking and Steelmaking.- 2001.- Vol. 28.- № 2.-P. 152-158.

19. Гасик М.И. Электрoметаллургическое производство ферросплавов и электростали на пути расширения внедрения инновационных технологий / М.И. Гасик // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. - № 2. – С.78-81

20. Яковлев Ю.Н., Величко А. Г., Камкина Л.В. Математическая модель окисления углерода при вакуумной обработке стали в ковшах. // Вестник приазовского государственного технического университета. - Вып. № 10 - 2000. Мариуполь. - ПГТУ, 2000. - С. 45 - 52.

21. Явойский В. И., Явойский А. В. Научные основы современных процессов производства стали. М.: “Металлургия”, 1987, 184 с.

22. Кньюпель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали, М.: “Металлургия”, 1973, 312 с.

23. Фізико-хімічні основи і математичне моделювання процесів дегазації при позапічній обробці сталі. Камкіна Л.В., Величко О.Г., Камкін В.Ю. Теорія і практика металургії. - №3(128). – 2021. - С. 31-40.

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.05>.

24. Наближення реакцій дегазації сталі до рівноваги при вакуумуванні в ковші. Теорія і практика металургії. - № 3-4 (110-111). – 2017. – С. 54-57. Проїдак Ю.С., Камкін В.Ю., Камкіна Л.В., Безшкурєнко О.Г.

25. Sustainable Transition Pathways for Steel Manufacturing: Low-Carbon Steelmaking Technologies in Enterprises. Jinghua Zhang, Haoyu Guo, Gaiyan Yang,

Yan Wang, Wei Chen. Sustainability. Volume 17. Issue 12. 2025. DOI 10.3390/su17125329

26. Фізико-хімічні закономірності газокисневої конверсії метану. Сухий К.М., Гришин О.М., Величко О.Г., Надточій А.А., Камкін В.Ю. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2025, No. 3, pp. 56-64. ISSN 0321-4095

<http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-160-3-56-64>

27. Ghoneim S., El-Salamony R. and El-Temtamy S. Review on Innovative Catalytic Reforming of Natural Gas to Syngas. *World Journal of Engineering and Technology*. 2016; 4: 116-139. DOI:10.4236/wjet.2016.41011.

28. Ibrahim Ismail, Mohamed Nasser, Simulation of Ammonia Production from Synthesis Gas the International Conference on Chemical and Environmental Engineering 9(6):85-95 April 2018 DOI:10.21608/iccee.2018.34649

## РОЗДІЛ 4

### ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЕЛЕКТРОСТАЛІ, ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПРИ ПРОКАТЦІ

#### 4.1 Обґрунтування та вибір технологічної схеми одержання сталі

##### 4.1.1 Визначенні особливостей вакуумної обробки низьковуглецевої сталі.

Сучасне виробництво сталі в плавильному агрегаті являє собою складний і багатостадійний процес, який завершується випуском, по суті, напівпродуктом. Причому цей напівпродукт не придатний для розливання, а вимагає обов'язкового доведення металу, яке проводиться в агрегатах позапичної (ковшової) металургії – на ковші-печі і вакууматорі [1-8]. Агрегат ківш-піч виконує функції рафінування напівпродукту і доведення його за хімічним складом і температурою, а агрегат вакуумування (в незалежності від його виду) зазвичай виконує завдання видалення газів зі сталі (в тому числі і в ході вакуум-вуглецевого розкислення).

В реальних умовах вакуумної обробки сталі в ковші з продувкою інертними газами видалення водню і кисню в газову фазу може здійснюватися за трьома статтями: в бульбашки CO, що утворюються при розкисненні сталі вуглецем; в бульбашки інертного газу; через поверхню металу, оголену від шлаку. У всіх цих трьох випадках з металу до межі розділу з газовою фазою спрямовані три потоки: водню, вуглецю і кисню. При цьому можна вважати, що потік вуглецю еквівалентний потоку кисню для утворення CO.

Вакуумна обробка дозволяє знизити вміст в сталі газів - водню, азоту і кисню. Водень і азот практично не утворюють стійких з'єднань з елементами, що входять до складу сталі при температурах її розливання і, тому, зниження загального тиску в системі веде до молізації розчинених водню і азоту по відомим реакціям, з видаленням їх в газові бульбашки.

Швидкість реакції видалення водню контролюється процесом доставки водню до межі розділу фаз (швидкістю дифузії водню в розплав заліза або швидкістю проникнення його в бульбашки газу). Швидкість реакції видалення азоту залежить від концентрації поверхнево активних елементів (кисню і сірки): при високому їх вмісті процес лімітується хімічної кінетикою, а при низькому - процесом доставки азоту до межі розділу фаз. Тому, вакуумування зазвичай супроводжують продувкою металу аргоном, який є агентом, який асимілює гази зі сталі і перемішує її, знімаючи дифузійні обмеження.

Дещо складніше йде справа з киснем. На відміну від азоту і водню, кисень не тільки розчиняється в сталі, але і утворює при температурах розливання оксиди з більшістю характерних для складу промислових сталей елементів. Тому, при зниженні тиску поведінка кисню не підкоряється закону Сівертса, а зменшення його вмісту залежить від співвідношення розчинності кисню в залізі при даній температурі і вмісту в сталі елементів, що мають більш високу спорідненість до кисню, ніж залізо і вуглець. Спорідненість останнього з підвищенням температури і зниженням тиску збільшується, а утворені бульбашки CO сприяють видаленню інших газів зі сталі [8]. Ефект вакуум-вуглецевого розкислення завжди сприяє видаленню розчиненого газу, оскільки його парціальний тиск в бульбашках CO прагне досягти рівноваги з вмістом газу в металі. Бульбашки CO по мірі підйому в ковші збільшуються в об'ємі за рахунок укрупнення і розширення зі зниженням ферростатичного тиску, в результаті чого метал спінюється, що в свою чергу покращує перебіг масообмінних процесів.

Отже, в реальних умовах вакуумної обробки сталі в ковші з продувкою інертними газами видалення водню, азоту і кисню в газову фазу може здійснюватися трьома шляхами: в бульбашки інертного газу; в бульбашки CO, що утворюються при розкисленні сталі вуглецем і через поверхню металу, оголену від шлаку.

Вакуумна обробка дозволяє видалити основні гази: водень і азот відповідно до закону Сівертса; кисень відповідно до константи реакції

зневуглецювання і з урахуванням активності інших сильних розкислювачів. Показники вакуумної обробки будуть залежати від місця розташування в технологічному ланцюгу одержання металу та від випуску продукції різного складу і призначення.

Виплавку напівпродукту здійснювали в сучасній ДСП ємністю 120 т і потужність 95 МВА, в якій передбачено подачу в піч на нагрів металу досить великої кількості вуглецьвмісних матеріалів (кокс, природний газ) та вдування кисню для їх спалювання і окислення домішок металошихти за допомогою декількох видів паливно-кисневих пальників і кисневих фурм. Для мінімізації вмісту азоту в металі використовували вихідні матеріали з низьким вмістом азоту і вводили кисень для спінювання шлаку.

#### 4.1.2 Вибір схеми позапічної обробки сталі

Статистична вибірка складалася з 215 плавок низьковуглецевої марки готової сталі. Склад напівпродукту на випуску мав значний розбіг вмісту кисню і вуглецю, високий вміст сірки, що пов'язано з більш низькою якістю брухту, який використовувався для виплавки (табл.4.1).

Таблиця 4.1

Середні і граничні значення технологічних показників процесу виплавки в ДСП напівпродукту для низьковуглецевої сталі

Показник, розмірність	Середнє значення	Мінімум	Максимум
Питома витрата електроенергії, кВт год/т	430	344	639
Температура на випуску, °С	1620	1562	1719
$a_o$ на випуску, ppm	1015	458	1997
Вуглець на випуску, %	0,0658	0,0357	0,0996
Сірка на випуску, %	0,0697	0,042	0,110

Окисленість сталі на випуску досить висока і залежить, перш за все, від витрати кисню, що подається на фурмені пристрої (для прямого нагріву ванни і на зневуглецювання). Витрата кисню на паливно-кисневі горілки впливає в

меншій степіні, оскільки витрачається в основному на спалювання палива, що обумовлює підвищений середній вміст сірки в металі на випуску, який вище верхньої (0,04%) межі для рядових марок сталей, що складають основну масу металобрухту.

Між окисленістю металу і концентрацією сірки в напівпродукту на випуску існує обернено пропорційна залежність, що може бути пов'язано з її видаленням в газову фазу. У той же час, залежність між вмістом сірки і температурою напівпродукту на випуску відсутня, що побічно свідчить на користь видалення сірки в газову фазу при високій окисленості. В цілому, вміст сірки на випуску з печі істотно вище, ніж потрібно стандартами, і, очевидно, що її видалення здійснюється при позапічній обробці сталі.

Таки чином, напівпродукт ДСП, що надходить на позапічну обробку, найчастіше має низький вміст вуглецю, високий вміст кисню і сірки і значно перегрітий.

В ході позапічної обробки сталі випробували пряму схему: ДСП - УКП - VD - МБЛЗ, зворотну схему: ДСП - 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 м<sup>3</sup> хв (при тиску 3 - 5 бар) з мінімальним оголенням дзеркала розплаву (продувочна пляма не більше 0,5 м в діаметрі). Для вимірювання активності кисню і температури використовували датчики "Celox". Вакуумування здійснювали в установці камерного типу (VD) протягом 20-25 хвилин, в тому числі під глибоким вакуумом (менше 1 мбар) – протягом 5 хвилин. Розливання сталі проводили через проміжний ківш з магнезійною футеровкою з повним захистом струменя металу від вторинного окислення і застосуванням системи електромагнітного перемішування в кристалізаторі.

Оцінку ефективності позапічної обробки здійснювали по досягнутій

якості готової сталі, зокрема її складу, структури та механічних властивостей, та з точки зору технологічності ведення процесу в умовах діючого виробництва.

Зниження вмісту сірки (таблиця 4.2) відбувалося на всіх етапах позапічної обробки, але в різному ступені. Основна кількість сірки видаляється, як і слід було очікувати, на установці піч-ківш (УКП) і, в меншій мірі, на вакууматорі (VD).

Таблиця 4.2

Степінь видалення сірки при різних схемах позапічної обробки

Схема обробки	Маса шлакоутворюючих, кг на плавку		Основність шлаку	Степінь знесірчання, % Температура металу, °С			
	СаО	СаF <sub>2</sub>		На випуску	Після УКП	на VD	Загальна
Пряма схема	1630-1860	590-720	1,18-2,16	= 1650	<u>87-88</u> 1615	<u>0-14</u> 1540	<u>87-90</u> -
Зворотна схема	1390-1580	510-660	2,17-2,90	= 1690	<u>77-91</u> 1540	<u>5-48</u> 1530	<u>80-95</u> -
Без вакуумування	1200-1660	640-750	2,02-2,75	= 1670	<u>70-91</u> 1532	= -	<u>70-91</u> -

Утворені білі кінцеві шлаки мали основність, як правило, більше 2 і невисокий вміст оксидів заліза і марганцю. З огляду на те, що склад і кількість шлаку на плавках були близькими, ступінь знесірчання металу для всіх схем позапічної обробки теж була близькою, а вміст сірки в готовій сталі задовольняв вимогам стандартів. Більш низький ступінь знесірчання на плавках без вакуумування обумовлена більш низькою витратою вапна при тій же витраті ферокальцію. Температура металу на випуску при обробці по зворотній схемі вище, оскільки необхідним є перегрів металу.

Кількість і морфологія неметалевих включень при різних схемах позапічної обробки (таблиці 4.3) істотно не відрізнялися і знаходилися в заданих межах.

Таблиця 4.3 - Характеристика забруднення сталі неметалевими включеннями

Схема обробки	Сумарний бал (EN ) по типам неметалевих включень			
	А	В	С	Д
Пряма схема	0.7	1.8	0.3	1.05
Зворотна схема	0.75	1.8	0.3	0.75
Без VD	0.6	2.2	0.35	1.0

У металі плавки без вакуумування відзначений дещо вищий сумарний бал силікатів і алюмінатів. Оскільки розкислення здійснювали однаково, причиною збільшення останніх може бути корозія футерування сталковша. Використання вакуумування і продування металу в ковші аргонном збільшує тривалість обробки, проте сприяє створенню більш розвиненого контакту диспергованих металу і шлаку, і, отже, збільшує степінь завершеності масообмінних процесів, і покращує умови асиміляції утворених неметалевих включень.

Аналіз зміни загального вмісту азоту, кисню і водню, досягнутих при різних схемах обробки (таблиця 4.4) дозволив оцінити ефективність вакуумування в різних варіантах його розташування в виробничому циклі.

Таблиця 4.4 Загальний вміст газів в металі в промковші

Схема обробки	Загальний вміст газів, ppm		
	Кисень	Водень в промковші	Азот
Пряма схема	30	9,8	70
Зворотна схема	49	13	69
Без вакуумування	45	18	84

Вміст азоту в готовому металі, зробленому без вакуумування трохи вищий, однак, підвищення його вмісту відбулося після МБЛЗ і не пов'язане зі

схемою позапічної обробки. Концентрація водню знижується до однакових значень незалежно від початкового його вмісту і схеми обробки. Більш того, протягом часу вилежування вміст водню в металі, як показано хімічним аналізом, зменшується до необхідних 2 ppm

Таким чином, дослідженнями трьох технологічних схем позапічної обробки напівпродукту ДСП при виробництві низьковуглецевих сталей показало, що ефект вакуум-вуглецевого розкислення (зворотна схема позапічної обробки) при зниженні тиску може бути використаний для економії розкислювачів або з метою отримання низьковуглецевих сталей.

При зворотній схемі позапічної обробки вакуумування проходить з великою площею оголення дзеркала металу (50-90%) у зв'язку з відсутністю товстого шару шлаку. Завдяки цьому може бути збільшений рівень металу в стальковші, бо рідкий метал спінюється менше шлаку і відсутня операція по відливу шлаку, що зменшує завантаження кранів. Однак за відсутності екрануючого шару шлаку і втрати тепла за цим варіантом найбільші (2,7-3,2°C/хв). Температура металу перед випуском повинна бути високою, що веде до збільшення витрати електроенергії і межплавочного періоду. Зворотна схема позапічної обробки сталі ДСП → VD → УКП → МБЛЗ є кращою при організації довгих серій розливання, так як установка вакуумування створює додатковий буфер часу.

#### 4.2 Технологія вакуумування особливо низьковуглецевої сталі з напівпродукту ДСП

Для одержання особливо низьковуглецевої сталі (С - 0,01%, Мп - 0,12%, Si - 0,02%) окисленість напівпродукту повинна забезпечувати видалення вуглецю металу при вакуумній обробці до таких значень, щоб подальше надходження його з феросплавів при розкисленні сталі, з електродів при нагріванні сталі на ковші-печі, а також з періклазовуглецевої футеровки стальковша не привело до перевищення цільових значень вмісту вуглецю в

металі. Розрахунком встановлено мінімально необхідний вміст у металі активного кисню для отримання вмісту вуглецю в сталі 0,005% при різному вихідному вмісті вуглецю в напівпродукту (табл.4.5)

Таблиця 4.5 Необхідний рівень окисленості для зневуглецювання сталі до 0,005% при різному вмісті вуглецю у напівпродукті

Мінімальна окисленість для зневуглецювання до 0,005%С	Вміст вуглецю у напівпродукті,%
80	0,01
100	0,013
300	0,028
500	0,044
700	0,058
900	0,074
1000	0,08

Порівняння значень необхідної окисленості за розрахунком (80-1000 ppm) з фактичним діапазоном її в напівпродукту при випуску з ДСП (458 - 1997 ppm, середня 1015 ppm за даними статистичного аналізу) показує, що реальна окисленість металу на випуску є достатньою для видалення вуглецю вихідного напівпродукту при подальшій вакуумній обробці металу. Кількість активного кисню в напівпродукту на випуску з ДСП цілком достатньо і для того, щоб окислити весь вуглець, що вноситься в метал з феросплавами і футеровкою сталковша.

Позапічну обробку напівпродукту проводили по зворотній схемі - ДСП-VD-УКП-МБЛЗ. Кінцевий вміст вуглецю в результаті склав менше 0,01% навіть при вихідному його вмісті (за даними хімічного аналізу) до 0,06% і окисленості металу на випуску з печі вище 1100 ppm.

Зниження тиску посилює розкислювальну здатність вуглецю, суттєво впливає температура. Підвищення температури зрушує рівновагу реакції

вакуумкисневого зневуглецювання у прямому напрямку, в результаті чого при однакових концентраціях розкислювальна здатність вуглецю стає вище, ніж для марганцю і кремнію вже при температурах вище 1600°C і тиску нижче 100 мбар.

Для сталі цільового хімічного складу (C - 0,01%, Mn - 0,12%, Si -0,02%) на основі розрахунку рівноважних концентрацій кисню в діапазоні характерних температур технологічного процесу встановлено, що зниження тиску у вакуумній камері до 100 мбар досить для переважаючого окислення вуглецю в порівнянні з марганцем і кремнієм у всьому розглянутому діапазоні температур технологічного процесу.

Частково розкислений алюмінієм на випуску з ДСП метал вакуумували після установки ковша в вакуум-камеру, здійснювали усереднювальне продування металу аргоном. Одночасно відбирали проби, вимірювали температуру і окисленість металу. (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 Основні параметри позапічної обробки на установці вакуумування (VD)

№	Параметри металу, до обробки та після обробки						Тривалість вакуумування, хв.
	Вміст вуглецю, %		Окисленість, ppm		Температура, °C		
	до	після, менше	до	після (факт/розрахунок)	до	після	всього
1	0,0293	0,010	884	573/627	1721	1648	23
2	0,0327	0,010	644	472/341	1645	1576	25
3	0,0564	0,010	784	186/165	1676	1592	22
Середнє	0,0395	0,010	771	410/378	1681	1605	23

В ході вакуумування плавок в ківш не вводили будь-яких присадок. Під час набору вакууму і протягом всього періоду обробки спостерігалось інтенсивне «кипіння» розплаву, що пояснюється протіканням реакції вакуум-кисневого зневуглецювання металу. Розрідження в режимі «глибокого вакууму» становило 2-2,5 мбар.

При подальшій витримці металу під вакуумом процес зневуглецювання поступово сповільнюється або припиняється взагалі, що свідчить про відсутність одного з елементів - учасників реакції  $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$ . Оскільки лімітуючим ланкою даної реакції в наших умовах є вміст вуглецю, а точне визначення його при низьких концентраціях (менше 0,01%) утруднено, оцінювали змінення вмісту активного кисню. Отримано досить точну відповідність фактичного і розрахункового змінення окисленості (таблиця 4.9) і вмісту вуглецю в металі в результаті вакуумування на всіх плавках. Розрахункова кількість CO, що виділився при вакуумній обробці склало на дослідних плавках від 36 до 86 м<sup>3</sup>, що істотно перевищує обсяг аргону, що вдувається для перемішування металу. Таким чином, поверхня взаємодії газ-метал значно більше розвинена при вакуумуванні частково розкисленого металу, що є передумовою видалення з нього домішкових газів (азоту і водню).

Дослідно-промисловими експериментами показано, що використання ефекту вакуум-вуглецевого розкислення при зниженому тиску дозволяє вести зневуглецювання до отримання концентрацій, характерних для особливо низьковуглецевих сталей без введення додаткових окислювачів.

#### 4.3 Зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів

##### 4.3.1 Аналіз інформації щодо впливу алюмінію та азоту на структуру сталі

Як встановлено дослідженнями, на якість прокату впливає хімічний склад ІF-сталі [9,10]. Особлива увага звернута на вміст азоту. Більшість азоту,

розчиненого в сталях, що містять Al і В, існує у формі асоційованих AlN та/або BN. Розчинність газу N<sub>2</sub> значно збільшується зі збільшенням концентрації Al і В в сталі за рахунок утворення асоціантів AlN і BN. Змінення вмісту вуглецю в сталі, мікролегованої титаном, не робить помітного впливу на механічні властивості. У випадку, коли разом з титаном в мікролегуванні бере участь Nb, збільшення в сталі вмісту вуглецю помітно збільшує її міцність і зменшує пластичність, що пояснюється меншим розміром зерна фериту. Вміст в IF-сталях сірки і азоту має бути мінімальним.

Для холоднокатаного прокату з автолистової сталі одним з основних напрямків підвищення споживчих властивостей є забезпечення все більш високих показників штампуємості. Основною маркою високоштампуємих сталей, як і раніше, залишається низьковуглецева сталь. Вона знаходить широке застосування для виготовлення лицьових деталей кузовів автомобілей. Завдяки проведенню ряду наукових і технологічних робіт, вдалося істотно підвищити рівень показників штампуємості холоднокатаного прокату. У той же час, в окремі періоди стали виникати проблеми, пов'язані з різким зниженням показників штампуємості окремих партій прокату, зокрема, з отриманням більш високих значень границі плинності і більш низьких значень відносного подовження, ніж необхідні для сталей вищих категорій витяжки.

Спостережувані відхилення властивостей можуть бути пов'язані з корінними змінами металургійних технологій, які привели до зниження вмісту азоту і сірки в сталі. Ці зміни можуть впливати на умови утворення, кількість і морфологію виділень надлишкових фаз - нітриду алюмінію і сульфїду марганцю - основного чинника структуроутворення в розглянутих сталях. Автори пов'язують зниження пластичності з виділенням AlN та звертають увагу на прискорення осадження AlN за рахунок відповідних нуклеантів, таких як MnS [11, 13]. Раніше [13] було звернуто увагу на посилення впливу термічно або механічної обробки на зародження нітриду алюмінію у сталі. Ця важлива характеристика визначає кінетику осадження AlN і містить великі варіанти морфології осадків, досягнуті після різних застосованих видів обробки.

Найбільше суттєвим ефектом AlN є стабільний контроль розміру зерна, який безпосередньо впливає на прокалюваність, пластичність у гарячому стані, текстуру та механічні властивості. Крім того, супутнє видалення азоту з твердого розчину впливає на характеристики старіння при деформації, зварюваність, механічні властивості і характеристики повзучості. Нітрид алюмінію також впливає на осадження нітридів інших сплавів.

Досліджували [14] морфологію, просторовий розподіл, розподіл за розмірами частинок та кінетики розчинення/зростання осаду нітриду алюмінію при повторному нагріванні. Осади мають шестикутну форму після тривалого часу старіння у фериті. Форми змінюються від шестикутної до прямокутної після відпалу в області аустеніту. У фериті більшість осадів розподіляється по межах феритових зерен. Мережі осадів AlN можна знайти після відпалу в аустеніті. Визрівання AlN відбувається при ізотермічних температурах нижче приблизно 1150°C, тоді як повне розчинення осадів відбувається при температурі вище 1150°C. Аналогічні дослідження проведені в роботі [15], в якій осадження AlN та здрібнення зерна вивчали з використанням імітатора гарячої деформації Gleeble. Існування високого енергетичного бар'єру для зародження AlN стримує значне здрібнення зерна під час гарячої прокатки або гарячої деформації. Під час повторного нагрівання здійснюється значне осадження нітриду алюмінію та різке здрібнення зерна. Такий вплив автори пояснюють впливом утворених нестабільних сульфідів марганцю, багатих залізом, як попередників для осадження AlN під час повторного нагріву [11, 16-20].

Таким чином, існуючі відомості однозначно вказують на вплив хімічного складу сталі та технологічних параметрів подальшої обробки на механічні властивості сталі, в першу чергу штампуємості.

4.3.2 Термодинамічна оцінка нітридоутворюючої здатності розкислювачів, що вводяться в сталь

Після гарячої прокатки на безперервному широкополосному стані (НШС 2000) і травленні на безперервно-травильному агрегаті (НТА) відібрані картки сталей 01ЮТА, 01ЮТ товщиною 3,5 мм.

Таблиця 4.7. Хімічний склад досліджених марок сталей

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % мас.											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N <sub>2</sub>	Ca
01ЮТА	0,002	0,12	0,01	0,006	0,011	0,01	0,01	0,02	0,05	0,062	0,005	0,0002
01ЮТ	0,003	0,13	0,02	0,008	0,012	0,01	0,01	0,02	0,041	0,056	0,004	-
01ЮТ(Ca)	0,003	0,12	0,01	0,005	0,011	0,01	0,01	0,02	0,041	0,07	0,004	0,0003

Особливістю електропічного напівпродукту є підвищений вміст азоту, який призводить до утворення дисперсних частинок нітридів заліза, що гальмують рух дислокацій і знижують пластичність сталі. Тому одним із завдань позапічної обробки є забезпечення нейтралізації шкідливого впливу азоту шляхом підбору раціонального складу нітридоутворюючих елементів [17]. В розглянутій марці сталі використовують для попереднього розкислення алюміній, що підвищує ймовірність утворення нітридів алюмінію, які, осідають на поверхні первинних зерен у вигляді надлишкової неметалевої фази, викликають схильність сталі до крихкого руйнування [18]. В цій роботі розглянуто вплив параметрів структури (типу, форми, розміру, розподілу часток другої фази, неметалевих включень і величини зерна) на зародження і поширення тріщин. Визначення сутності процесів і умов формування того чи іншого структурного елементу поверхні зламу відкриває перспективу надійної інспекції зламів зруйнованих елементів металевих будівельних конструкцій.

Для визначення першочергового утворення нітридів металів, проведено термодинамічний аналіз можливості утворення нітридів Al, Ti і V в металевому розплаві. Визначали величину зміни енергії Гіббса наступних реакцій нітридоутворення:



$$\lg K_{AlN} = (14501.3055/T - 6.289)$$

$$[B] + [N] = BN, \Delta G_{BN} = (-185300 + 78 \cdot T) \quad 4.2$$

$$\lg K_{BN} = (9676.240/T - 4.073)$$

$$[Ti] + [N] = TiN, \Delta G_{TiN} = (-275500 + 99.91 \cdot T) \quad 4.3$$

$$\lg K_{TiN} = (14386.42/T - 5.217)$$

При розрахунках скористались даними, наведеними в [19-21]. Визначено термодинамічні умови утворення нітридів титану та алюмінію за рахунок встановлення характеристик рівноваги системи метал-нітрид-газ під різними парціальними тисками азоту в діапазоні температур 1873–1973К.

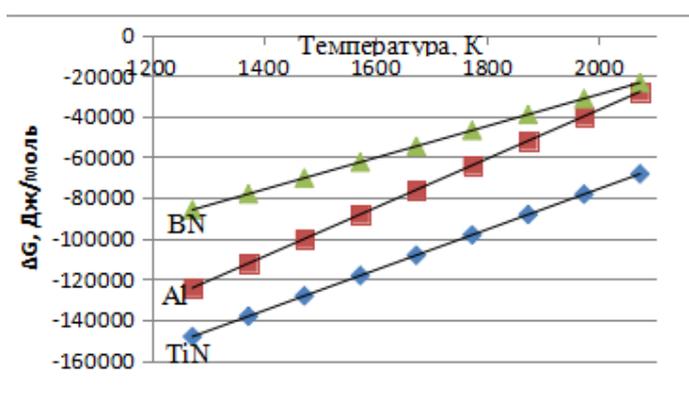


Рисунок 4.1 Змінення величини енергії Гіббса від температури для реакцій нітридоутворення Al, Ti і B.

Результати розрахунків [22] свідчать про перевагу утворення нітридів титану, найменша вірогідність утворення нітридів бору. Для температури 1873К розраховані рівноважні концентрації нітридоутворюючих елементів для різних концентрацій азоту (табл.4.8).

Таблиця 4.8

Рівноважні концентрації нітридоутворюючих елементів (Ti, Al, B) при різних концентраціях азоту.

N, %	[Ti]*100, [Al]*10, [B], %		
	TiN	AlN	BN
0,01	$9,98 \cdot 10^{-5}$	$8,08 \cdot 10^{-4}$	0,0015

0,009	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$8,98 \cdot 10^{-4}$	0,0017
0,008	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$	0,0019
0,007	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	0,0022
0,006	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,0026
0,005	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	0,0031
0,004	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	0,0038
0,003	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$	0,0051
0,002	$4,94 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-3}$	0,0077
0,001	$9,98 \cdot 10^{-4}$	$8,08 \cdot 10^{-3}$	0,0154
0,005	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$	0,031

За результатами проведених розрахунків визначена можливість використання титану в якості стабілізатора азоту, при цьому введення присадок титану дозволяє знизити рівноважну концентрацію азоту для реакції нітридоутворення алюмінію, і, тим самим, попереджає формування нітрідів алюмінію. На основі аналізу одержаних даних хімічного складу дослідних сталей одержано аналітичні вирази для розрахунку величини присадок титану після вакуумування для нейтралізації дії азоту в сталях:

$$[\text{Ti}] = 1,687 \cdot [\text{Al}]^a \cdot [\text{N}]^b \quad (4.4)$$

де  $[\text{Al}]$ ,  $[\text{N}]$  вміст елементів в розплаві після вакуумування,  $a$  і  $b$  - емпіричні коефіцієнти, значення яких змінюється в межах  $a = (-0,186 \div 0,467)$ ,  $b = (0,918 \div 1,736)$ .

#### 4.4 Дослідна виплавка низьковуглецевої сталі

Присадка титану після вакуумування, який має значно більшу спорідненість до азоту, ніж алюміній, відповідно до наведеної вище залежності, дозволяє нейтралізувати дію азоту в сталях і сприяє усуненню дефектів металу, пов'язаних з виділенням нітрідів алюмінію по межах первинних зерен. При цьому, при вмісті в сталі титану вище запропонованої залежності,

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.

Аналіз результатів дослідних плавок показав вплив бору на рівень міцності і пластичних властивостей. Так, зі збільшенням концентрації бору з 0,003% до 0,009% падіння межі міцності становить близько 15 МПа, і межі текучості до 27 МПа. Властивості міцності залежать від співвідношення бору і азоту. Бор, як нітридоутворюючий елемент, пов'язує частина азоту, і виводить його з міжвузлів, і, тим самим, сприяє зниженню міцності сталі. Тимчасовий опір розриву  $\sigma_B$  зі збільшенням відношення B/N зменшується. На цих відомостях визначено співвідношення рівноважних концентрацій бору і азоту для різних рівноважних концентрацій азоту:

[N] p, %	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01
[B]p/[N]p	15.38	3.85	1.71	0.96	0.62	0.43	0.31	0.24	0.19	0.15

Для утворення нітридів бору, необхідно щоб фактичне співвідношення компонентів перевищувало наведене вище рівноважне значення. Залежно від фактичного вмісту азоту в сталі розраховані фактично необхідні концентрації бору для зв'язування азоту, що міститься в сталі в нітрид бору:

[N], %	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.011	0.012
[B], %	0.0039	0.0046	0.0054	0.0062	0.0069	0.0077	0.0085	0.0093

При виплавці напівпродукту в електродуговій печі, вміст азоту перебуває у межах 40-110ppm, а при конвертерній плавці -  $10^{-40}$  ppm. Підвищений вміст азоту приводить до старіння сталі і сприяє утворенню специфічних макродефектів, які негативно впливають на пластичну деформацію металу і погіршують механічні властивості сталі. Відомий спосіб позапічної обробки не дозволяє знизити вміст азоту до необхідного (не більше 40ppm), при цьому в якості основного розкислювача використовується алюміній. У сталі алюміній взаємодіє з азотом, утворюючи нітриди алюмінію, які, накопичуючись на

поверхні первинних зерен аустеніту у вигляді надлишкової неметалевої фази, надають стійкість грануляційній структурі твердої сталі і, тим самим, викликають схильність сталі до крихкого руйнування.

Для виключення появи дефектів, які пов'язані з нітридами алюмінію [23], необхідно виконання встановлених технологічних прийомів. Зазначений технічний результат виробництва низьковуглецевої сталі включає виплавку у сталеплавильному агрегаті напівпродукту, розкислення алюмінієм, легування, регулювання співвідношення концентрацій вуглецю і кисню, безперервне вакуумування при залишковому тиску в камері не більш 6,7кПа.

Для запобігання скипанню у ковші під час випуску, через високий рівень окисленості металу, здійснювали його попереднє розкислення алюмінієм. Витрати алюмінію повинні бути такими, щоб забезпечити зняття переокисленості (різниця між реальним виміром окисленості і мінімально необхідним вмістом кисню при зневуглецьовуванні напівпродукту і, у той же час, не перешкоджати протіканню реакції вакуум-кисневого зневуглецьовування металу при вакуумуванні. Позапічну обробку напівпродукту виконували по схемі: електродугова піч – ківш – піч – вакууматор – машина безперервного лиття заготовок. На установці ківш-піч здійснювали корегування металу по складу і температурі. Для десульфурзації сталі і модифікування неметалевих включень застосовували порошок дріт, що містить 30мас.% SiCa або 40мас.% FeCa. Швидкість введення дротів трайб апаратами становила 1-3м на хвилину.

#### 4.5 Режими обробки сталі з особливо низьким вмістом вуглецю на установці ківш-піч

Дослідний метал після вакуумування передавали на установку позапічної обробки «ківш-піч», де проводили доведення сталі за хімічним складом і температурою. Основні параметри позапічної обробки дослідних плавок наведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Основні параметри и показники процесу позапічної обробки сталі на УКП

№ плавки	Вміст вуглецю, %		Вміст кремнію, %		Вміст сірки, %		Ступінь десульфурзації, %
	перед УКП	після УКП	перед УКП	після УКП	перед УКП	після УКП	
1	0.01	0.0211	0.0218	0.0127	0.0748	0.0244	67.4
2	0.01	0.0127	0.0155	0.0159	0.0553	0.0121	78.1
3	0.01	0.01	0.0288	0.0219	0.0532	0.0113	78.7
4	0.01	0.0127	0.01	0.0191	0.0748	0.0346	53.7
5	0.021	0.0477	0.1381	0.0554	0.0328	0.008	75.6
6	0.01	0.0237	0.01	0.0144	0.0306	0.0153	50

Одержані дані свідчать, що вміст сірки в металі перед УКП є нестабільним (0,0306-0,0748 %) і в більшості випадків істотно вище необхідного марочного вмісту. Знесірчання металу можливо здійснювати як за рахунок наведення високоосновного шлаку (присадками вапна і плавикового шпату), так і за рахунок десульфуючої здатності кальційвмісних матеріалів (силікокальцію і ферокальцію). Згідно з літературними даними [24], середній ступінь десульфурзації за рахунок такого шлаку становить 20,5%. Отже, велика частина сірки на УКП видаляється за рахунок взаємодії з кальційвмісними матеріалами, тому збільшення на дослідних плавках витрати вапна і плавикового шпату в порівнянні з рекомендованими технологічною карткою, є не раціональним. У той же час слід враховувати, що кальцій з кальційвмісних феросплавів реагує не тільки з сіркою, а й з киснем. Тому, зробили розрахунок необхідної витрати алюмінію, силікокальцію і ферокальцію (приймали 100% засвоєння) за умови розкислення тільки одним із зазначених розкислювачів для забезпечення окисленості спокійної сталі перед розливанням, яке дорівнює 10 ppm (таблиця 4.10). Реальна витрата кальційвмісних матеріалів повинна бути

більшою, ніж зазначена в таблиці 4.10, оскільки ступінь засвоєння кальцію завжди нижче 100%.

Таблиця 4.10 Витрата кальцієвмісних матеріалів

№	Витрата матеріалів, кг/плавку					
	CaO	CaF <sub>2</sub>	SiCa	FeCa	Al	SiMn73
1	2088	604	40	156	0	52
2	2122	655	120	117	0	0
3	1416	282	40	117	0	0
4	2053	741	0	281	170	FeSi65-159
5	2061	523	64	78	45	315
6	2482	521	0	240	205	204

Аналогічно, невідповідність розрахункового збільшення вмісту кремнію за рахунок присадки SiCa з реальними величинами також пов'язано з цим припущенням і прийнятим в розрахунках утворенням в якості продуктів розкислення однокальцієвого силікату. Крім того, порівняння неможливо зробити і з тієї причини, що на більшості плавок вводять кілька різних матеріалів-розкислювачів.

Ступінь відповідності розрахункових величин реальним витратам буде залежати від температури металу і виду застосовуваного матеріалу, оскільки відомо, що ефективність використання кальцію збільшується при зниженні тиску його парів: при застосуванні феросплавів бідніших кальцієм і більш низькій температурі оброблюваної сталі (табл.4.11).

Таблиця 4.11

Розрахункові величини витрати розкислювачів для зняття окисленості металу на УКП

Вихідна окисленість, ppm	Витрата алюмінію, кг/плавку	Витрата СК-30 з урахуванням 30%Ca, кг/плавку	Збільшення вмісту кремнію (100% засвоєння надлишку Si из SiCa), %	Витрата FeCa 40, кг/плавку
800	89	219	0.064	493.75
700	78	192	0.056	431.25
600	66	164	0.048	368.75
500	55	136	0.039	306.25
400	44	108	0.031	243.75
300	33	80	0.023	181.25
250	27	67	0.019	150
200	22	53	0.015	118.75
150	16	39	0.011	87.5
100	10	25	0.007	56.25
50	4,5	11	0.003	25
20	1	3	0.001	6.25

На дослідних плавках спостерігалось незначне збільшення вмісту вуглецю в металі за рахунок контакту його з графітованими електродами, що може бути виключено веденням нагріву в шлаковому режимі. Слід враховувати, що вогнетривка футеровка ковша містить вуглець (5-12%) і в ході розливання може відбуватися збільшення вмісту останнього (до 0,01%).

На підставі аналізу результатів дослідних плавок для отримання низьковуглецевих сталей можливо застосування зворотної схеми позапічної обробки (ДСП-2-VD-УКП-МБЛЗ), як найбільш гнучкою в технологічному

відношенні. Одержання особливо низького вмісту вуглецю в металі здійснили за рахунок використання реакції вакуумного знеуглецювання металу без додаткового введення кисню в газоподібному вигляді або у вигляді оксидів. Для зменшення науглецювання металу на УКП після вакуумування нагрівання вели в шлаковому режимі, тривалість перебування плавки під струмом на УКП була мінімально можливою.

Після ківша-печі проводили вакуумуванню сталі у ковші з продувкою аргоном і при залишковому тиску в камері не більше 6,7кПа. Після одержання хімічного складу металу додавали феротитан у кількості відповідно до запропонованого рівняння  $[Ti] = 1,687 \cdot [Al]^a \cdot [N]^b$ , де  $[Al]$ ,  $[N]$  вміст елементів в розплаві після вакуумування,  $a$  і  $b$  - емпіричні коефіцієнти, значення яких змінюється в межах  $a = (-0,186 \div 0,467)$ ,  $b = (0,918 \div 1,736)$ . Результати експериментів наведені у таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 Хімічний склад металу дослідних плавок та якість розлитого металу

Характер дослідних плавок	[C]	[N]	[Al]	[Ti]	Якість слябу
звичайна	0,004	-	-	-	дрібна рідка підкоркова бульбашка
з довільним вмістом титану	0,004	0,0156	0,0032	0,0010	дрібна рідка підкоркова бульбашка
з розрахунковим вмістом титану	0,004	0,0156	0,0032	0,0024	Без дефектів

Додавання після вакуумування титану, який має значно більшу спорідненість до азоту, ніж алюміній, відповідно до наведеної залежності, дозволяє нейтралізувати дію азоту у сталях і сприяє усуненню дефектів металу, пов'язаних з виділенням нітридів алюмінію по границях первинних зерен [24]. 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.

#### 4.6 Фізико-хімічне моделювання для прогнозування та управління властивостями сталі.

##### 4.6.1 Загальний опис методології фізико-хімічного моделювання

Залучення методології фізико-хімічного моделювання дозволило досить ефективно вирішити завдання прогнозування властивостей сталі. Теорія фізико-хімічного моделювання базується на єдиному металохімічному трактуванні елементарного акту міжатомної взаємодії. Фізико-хімічна модель структури сплавів Е.В.Приходько [25] базується на використанні рівнянь системи неполяризованих іонних радіусів (СНІР) для обчислення параметрів, поєднанням яких можна охарактеризувати властивості розплаву як хімічно єдиного цілого при будь-якому числі компонентів в системі і різних співвідношень між їх концентраціями.

До основних параметрів СНІР відносяться:  $Z_u$  - число електронів, що беруть участь в утворенні середньостатистичного акцепторного зв'язку; ця величина є інтегральною характеристикою міжатомної взаємодії в багатокомпонентній системі і може трактуватися як хімічний еквівалент заданого складу;  $\rho_l$  - спрямована зарядова щільність на поверхні іонів;  $d$  - відповідна  $Z_u$  між'ядерна відстань;  $\text{tg}\alpha$  - тангенс кута нахилу прямих в координатах  $R_u$ - $n$ , де  $R_u$  - неполяризований іонний радіус,  $a$  - число електронів на орбіталях атома.

Необхідно також відзначити, що в залежності від хімічних особливостей компонентів металевих розплавів, в першу чергу, їх положення в Періодичній системі і відповідної цим положенням електронної конфігурації, роль основного параметра, який контролює зміни тієї чи іншої властивості, можуть виконувати або  $Z_u$ , або  $d$ , або  $\text{tg}\alpha$ . Згадані параметри визначаються на підставі

прийнятого допущення про те, що ймовірність утворення парних зв'язків в розплаві АХВУСЗ ...а саме А-А, А-В, А-С,..., В- В, В-С. ..., С-С ... пропорційні добутку відповідних мольних концентрацій. При цьому будь-яке відхилення від статистичного визначення можна врахувати, варіюючи можливостями виникнення зв'язків різного типу. Отже, провідну роль в утворенні парних зв'язків, з енергетичної точки зору, грають характер і ступінь деформації валентних хмар іонів партнерів, що призводить до перерозподілу електронної щільності з енергетичних поверхонь і зміни зарядового стану як кожного партнера, гак і всієї системи в цілому.

#### 4.6.2 Методика проведення розрахунків та визначені концентраційні дівпвзони елементів

Для дослідження впливу елементів модифікаторів, а також основних легуючих компонентів розрахований ряд параметрів, що характеризують стан сплаву в цілому ( $Z_y$ ,  $tg\alpha$ ,  $d$ ,  $\rho$ ). Дані параметри розраховані для п'ятнадцяти сплавів при варіюванні окремого елемента з метою оцінки впливу концентрації легуючих і модифікуючи елементів на властивості сталі.

Виходячи з відомостей про значний вплив хімічного складу сталі на її властивості підготовлена база, що містить 150 складів для визначення оптимального складу ультранизьковуглецевих сталей типу 01ЮТ, 01ЮТА методом фізико-хімічного моделювання. Легування сталі кількома елементами ускладнює одержання сталі з заданими значеннями властивостей через коливання складу сплаву в межах стандарту. Типовий склад досліджених сталей 01ЮТА та 01ЮТ має наступний вміст компонентів, %мас.:

Марка сталі	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N <sub>2</sub>	Ca
01ЮТ	0.003	0.13	0.02	0.008	0.012	0.01	0.01	0.02	0.041	0.056	0.004	-
01ЮТА	0,002	0,12	0,01	0,006	0,011	0,01	0,01	0,02	0,05	0,062	0,005	0,0002

Концентраційний діапазон елементів задавали на основі літературних даних (табл.4.13). Проаналізовано 150 складів дослідних сталей типу 01ЮТА та 01ЮТ. Методом фізико-хімічного моделювання розраховано параметри  $Z_y$  та  $d$ .

Таблиця 4.13 Розрахунковий склад сплаву типу 01ЮТ, 01ЮТА для моделювання міжатомної взаємодії і інтегральних параметрів.% мас.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N <sub>2</sub>	Ca
0,002	0,091	0,01	0,0064	0,008	0,08	0,008	0,01	0,031	0,044	0,003	0,0001
0,0048	0,029	0,038	0,0094	0,0018	0,02	0,02	0,038	0,059	0,072	0,0058	0,0004

Таблиця 4.14 Порівняння хімічних складів дослідних сталей та IF сталі

Марка сталі	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N <sub>2</sub>	Ca
01ЮТА	0,002	0,12	0,01	0,006	0,011	0,01	0,01	0,02	0,05	0,062	0,005	0,0002
01ЮТ	0,003	0,13	0,02	0,008	0,012	0,01	0,01	0,02	0,041	0,056	0,004	
01ЮТ*	0,003	0,12	0,01	0,005	0,011	0,01	0,01	0,02	0,041	0,07	0,004	0,0003
IF	0,002	0,17	0,01	0,012	0,08	0,04	0,02		0,041	0,072	0,0027	

Таблиця 4.15. Результати розрахунку параметрів міжатомної взаємодії

Марка сталі	$Z_y$	$\alpha$	$\text{tg } \alpha$	$d_{Zy}$	$d_{\alpha}$	Rol
01ЮТА	1,144184	2,8269	0,088081	0,008739	-0,00077	3,487499
01ЮТ	1,144581	2,8264	0,088068	0,009049	-0,00097	3,488385
01ЮТ*	1,144127	2,8269	0,088067	0,008585	-0,00071	3,4878
IF	1.148777	2.8267	0.088065	0.013178	-0.00079	3.488219

Нижче наведені результати розрахунку значень параметру  $Z_y$  в залежності від вмісту вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору та сірки для розрахункового сплаву 01ЮТ

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
C	0,0020	0,0023	0,0026	0,0029	0,0032	0,0036	0,0039	0,0042	0,0045	0,0048
Mn	0,0290	0,0359	0,0428	0,0497	0,0566	0,0634	0,0703	0,0772	0,0841	0,0910
Si	0,0100	0,0131	0,0163	0,0193	0,0234	0,0256	0,0287	0,0318	0,0349	0,0380
P	0,0064	0,0067	0,0071	0,0074	0,0077	0,0081	0,0084	0,0087	0,0091	0,0094
S	0,0018	0,0025	0,0032	0,0039	0,0046	0,0052	0,0059	0,0066	0,0073	0,0080

Для розрахункового сплаву 01ЮТ визначили змінення параметра  $Z_u$  в залежності від вмісту заліза, марганцю, магнію, бору і олова

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Cr	0.0200	0.0267	0.0333	0.0400	0.0467	0.0533	0.0600	0.0667	0.0733	0.0800
Ni	0,0080	0,0093	0,0107	0,0120	0,0133	0,0147	0,0160	0,0173	0,0187	0,0200
Cu	0,0100	0,0131	0,0162	0,0193	0,0224	0,0256	0,0287	0,0318	0,349	0,0380
Al	0,031	0,0341	0,0372	0,0403	0,0434	0,0466	0,0497	0,0528	0,0559	0,0590
Ti	0,0440	0,0471	0,0502	0,0533	0,0564	0,0596	0,0627	0,0658	0,0689	0,0720
N <sub>2</sub>	0,0030	0,0033	0,0036	0,0039	0,0042	0,0046	0,0049	0,0054	0,0055	0,0058

Розраховано також змінення параметра  $d$  в залежності від вмісту вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, сірки в розрахунковому сплаві 01ЮТ

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Cr	0.0200	0.0267	0.0333	0.0400	0.0467	0.0533	0.0600	0.0667	0.0733	0.0800
Ni	0,0080	0,0093	0,0107	0,0120	0,0133	0,0147	0,0160	0,0173	0,0187	0,0200
Cu	0,0100	0,0131	0,0162	0,0193	0,0224	0,0256	0,0287	0,0318	0,349	0,0380
Al	0,031	0,0341	0,0372	0,0403	0,0434	0,0466	0,0497	0,0528	0,0559	0,0590
Ti	0,0440	0,0471	0,0502	0,0533	0,0564	0,0596	0,0627	0,0658	0,0689	0,0720
N <sub>2</sub>	0,0030	0,0033	0,0036	0,0039	0,0042	0,0046	0,0049	0,0054	0,0055	0,58

Одержані дані змінення параметра  $d$  від складу сплаву показують, що хімічні елементи по-різному впливають на відстань між атомами в розплаві. Для сталі 01ЮТА параметр  $d$  не змінюється при вмісті марганцю 0,009...0,024% і хрому 0,008...0,036% та при вмісті нікелю 0,009...0,023%, міді 0,008...0,036%, кальцію 0,0001...0,0004%. Зі збільшенням вмісту кремнію параметр  $d$  знижується, не змінюється при вмісті хрому 0,02...0,08%, нікелю 0,008...0,02%, міді 0,01...0,038%. Для сталі 01ЮТ параметр  $Z_u$  зростає зі збільшенням вмісту кремнію, марганцю та хрому. На рис.4.2 та 4.3 приведено результати розрахунку значень параметра  $d$  залежно від вмісту вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору та сірки для розрахованого сплаву 01YUT.

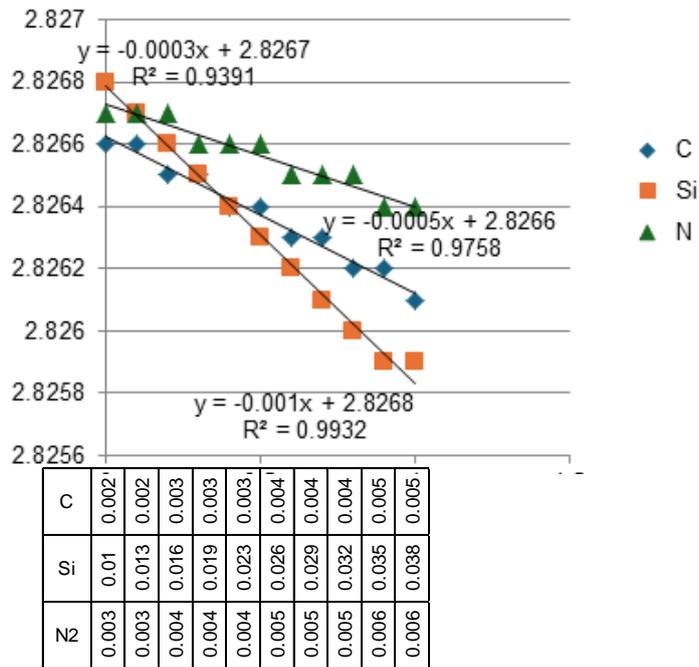


Рисунок 4.2 . Зміна параметра d залежно від вмісту вуглецю, кремнію та азоту в сталі 01YUTA

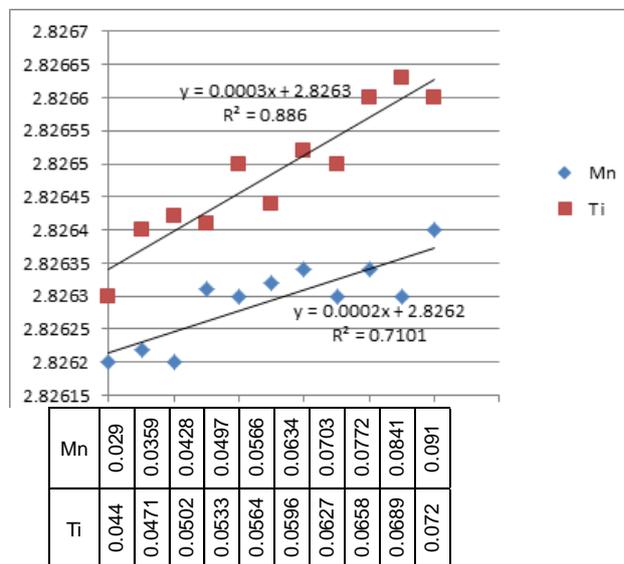


Рисунок 4.3 Зміна параметра d залежно від вмісту марганцю та титану в сталі 01YUTA

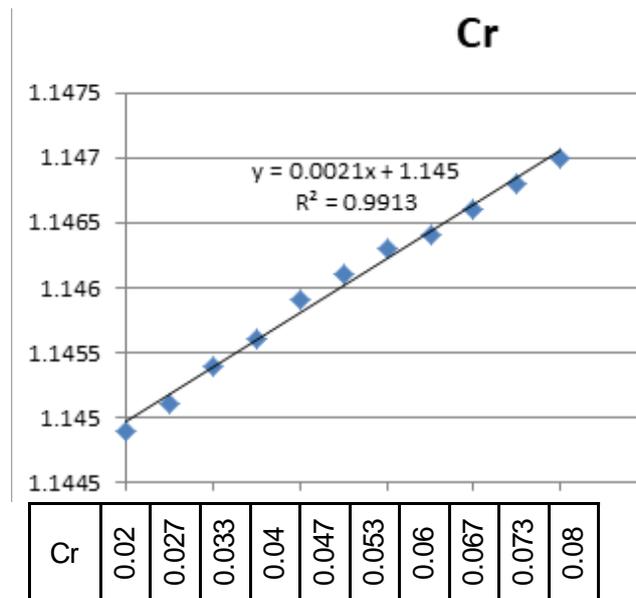


Рисунок 4.4 Зміна параметра  $Z_u$  залежно від вмісту хрому в сталі 01YUTA

Також було розраховано зміну параметра  $d$  залежно від вмісту вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, сірки в розрахованому сплаві 01ЮТ. Отримані дані про зміну параметра  $d$  залежно від складу сплаву показують, що хімічні елементи відрізняються і впливають на відстань між атомами в розплаві.

Для сталі 01YUTA параметр  $d$  не змінюється при вмісті марганцю 0,009...0,024% та хрому 0,008...0,036%, при вмісті нікелю 0,009...0,023%, міді 0,008...0,036%, кальцію 0,0001...0,0004%. При збільшенні вмісту кремнію параметр  $d$  зменшується, але не змінюється: вміст хрому 0,02...0,08%, нікель 0,008...0,02%, мідь 0,01...0,038%. Для сталі 01YUT параметр  $Z_u$  збільшується зі збільшенням вмісту кремнію, марганцю та хрому. Розглядаються інтегральні параметри, що характеризують стан системи та визначають властивості зміни сталі.

На основі розрахунків вибрано концентрації елементів для типів сталей 01ЮТ і 01ЮТА, які знаходяться в діапазоні: вуглець 0,002...0,003%, марганець 0,12...0,13%, кремній 0,01...0,02%, фосфор 0,006...0,008%, сірка 0,011...0,012%, алюміній 0,04...0,05%, титан 0,05...0,06%, азот 0,004...0,005%, кальцій

0,0002...0,0003%. Такі елементи з інтервалом концентрації забезпечують оптимальний комплекс властивостей сталі.

Такий концентраційний інтервал елементів забезпечуватиме оптимальний комплекс властивостей сталей.

#### 4.7 Опрацювання деформаційних режимів прокату зразків дослідної сталі

Досліджені марки сталей опрацьовані в прокатній лабораторії кафедри ОМТ НМетАУ [26]. Дослідження проводилися на лабораторному стані «кварто» з діаметром робочих валків 150 мм.. Швидкість обертання валів становила 32 об/хв.



Рисунок 4.5 Загальний вигляд лабораторного стану «кварто»

Щоб показати енергосилову картину процесу, на стані встановлювали месدوزи, які, у свою чергу, калібрувалися за допомогою ручного гідравлічного десятичного преса.

Вимірювання сили прокатки на частоті 200 Гц виконувалося за допомогою месдоз, встановлених під гвинтами тиску. Значення сили прокатки, зафіксованої месдозами, записувалися на персональному комп'ютері за допомогою пристрою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), що дозволяло адекватно оцінювати параметри сили під час деформації зразків. Дослідження проводилися на наднизьковуглецевій сталі. Розміри вихідних зразків низьковуглецевої сталі (рис. 4.6), а також середнє значення твердості вздовж зразка наведені в табл. 4.15.



Рисунок 4.6 Вихідні зразки сталі для прокатки

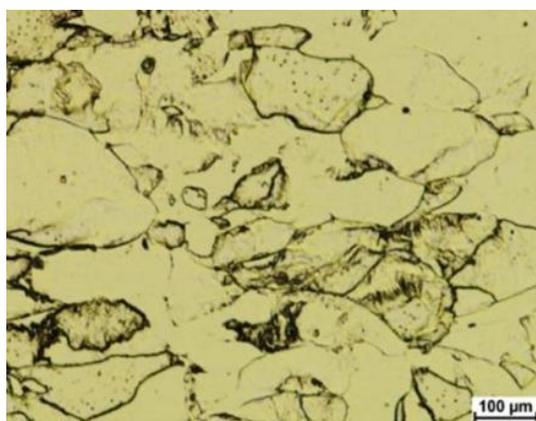
Таблиця 4.15 Вихідні дані зразка

№ образца	h <sub>0</sub> , мм	b <sub>0</sub> , мм	l <sub>0</sub> , мм	НВ
1	10,4	48	153	91
2	10,5	48	152	87
3	10,6	48	153	96
4	10,65	48	152	93

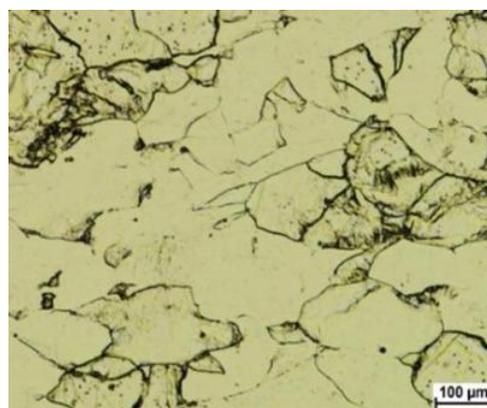
5	10,4	47	152	94
6	9,8	47	152	90
7	11,3	47	151	102

Нагрівання металу перед прокаткою проводили в електричній печі зі швидкістю  $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , прокатку здійснювали на лабораторному одно клітьовому стані за один і за два проходи, швидкість прокатки становила  $1,4 \text{ м}/\text{м}$ , тривалість паузи між проходами  $13\text{-}15 \text{ сек}$ . Зразки після прокатки охолоджували на повітрі від температури кінця прокатки до температури навколишнього середовища, швидкість охолодження  $5\text{-}8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , 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 зі швидкістю охолодження  $0,05^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

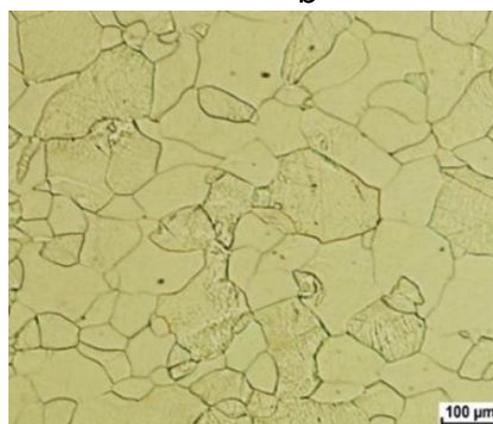
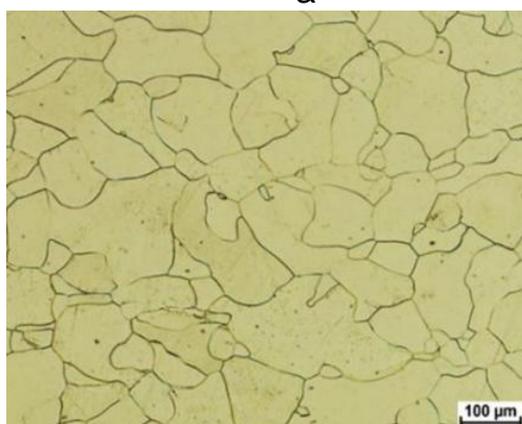
Мікроструктуру зразків вивчали за допомогою оптичних мікроскопів «Neophot-21» [27] (рис.4.7).



a



b



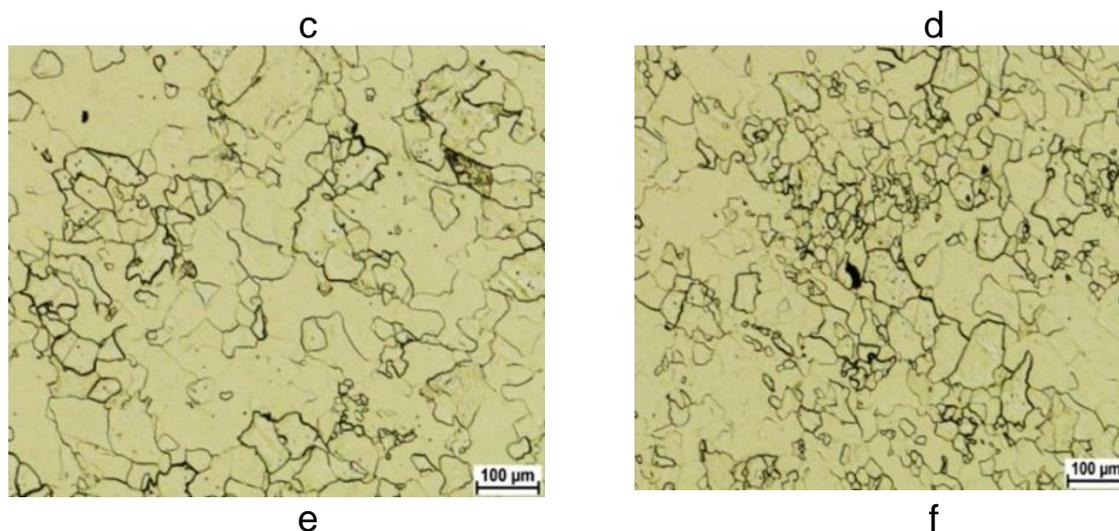


Рисунок 4.7 - Мікроструктура гарячокатаних ультранизьковуглецевих сталей: a, b – 01YUT; c, d – 01YUT; d, e – 01YUT(Ca)

Шліфи готували в перетині поперечному напрямку прокатки, використовуючи шліфувальний папір з послідовно зменшуючою зернистістю, для полірування застосовували полірування на алмазній пасті. Травлення здійснювали в концентрованій азотній кислоті або проводили хімічне травлення в насиченому розчині хлорного заліза в соляній кислоті з додаванням деякої кількості азотної кислоти.

Мікроструктура сталі 01YUT (рис. 4.7, c, d), прокатана у два проходи: перший — в аустенітній області, другий — у феритній температурній області з ступенем деформації 60,0% і охолоджений повітрям (рис. 4.7, c, d), характеризується наявністю дрібнозернистого шару товщиною 150-200 мікрон у деяких частинах штабу. Розмір феритового зерна в поверхневому шарі становить 10-20 мкм, у центральному шарі — 15-130 мкм.

Мікроструктура сталі 01YUT(Ca) (рис. 4.7, e, f), прокручена у два проходи: перший — в аустенітній області, другий — у феритовому регіоні при температурах з деформацією 60,0% і охолоджений у повітрі (рис. 4.7, d, e), характеризується наявністю дрібнозернистого шару товщиною 100-200 мкм у деяких районах штабу. Розмір феритового зерна в поверхневому шарі становить 5-20 мікрон, у центральному шарі сердечники — 15-130 мікрон.

Експериментальна перевірка показала співпадання властивостей з вибраними складами сталей. За результатами механічних випробувань встановлено, межа міцності знаходиться в межах 354...362 МПа, відносне звуження складо 84-85%, а відносне подовження, %:  $\sigma_5$  в межах 42-44,  $\sigma_{10}$  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.

Мікроструктура сталі 01ЮТ, які деформовані в аустенітній та феритній областях температур та охолоджених з піччю характеризується дрібних і великих зерен фериту. Розмір зерен сталі 01ЮТ становить 30-50 мкм. У деформованих зразках спостерігаються структурні зміни, які свідчать про реалізацію процесів рекристалізації і полігонізації. У поверхневій зоні деформованого листа процеси вторинної рекристалізації розвиваються більш інтенсивно, що і призводить до утворення різнозернистої структури. Причиною формування різної величини зерна є нерівномірна деформація металу, що призводить до утворення тріщин при штампуванні.

## ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ

Низький вміст залишкового вільного кисню перед остаточним розкисленням сприятливо позначився на поліпшенні чистоти низьковуглецевої сталі.

Для виробництва низьковуглецевої сталі необхідним є скоординований контроль вмісту вуглецю і кисню, який забезпечує необхідний вміст кисню в металі після вакуумування. При виплавці особливо низьковуглецевої сталі (С - 0,01%, Mn - 0,12%, Si - 0,02%) окисленість напівпродукту, що надходить з плавильного агрегату, при вакуумній обробці повинна здійснити зневуглецювання розплаву до цільових значень вмісту вуглецю в металі з урахуванням надходження його з феросплавів при розкисленні сталі, з

електродів при нагріванні сталі на ковші-печі, а також з періклазовуглецевої футеровки сталь ковша.

Використання ефекту вакуум-вуглецевого розкислення при зниженому тиску дозволяє скоротити витрату розкислювачів, а також отримувати особливо низьковуглецеві сталі без введення додаткових окиснювачів. Зниження тиску посилює розкислювальну здатність вуглецю, суттєво впливає температура. Підвищення температури зрушує рівновагу реакції вакуум-кисневого зневуглецювання у прямому напрямку, в результаті чого при однакових концентраціях розкислювальна здатність вуглецю стає вище, ніж для марганцю і кремнію вже при температурах вище 1600°C і тиску нижче 100 мбар.

Для сталі цільового хімічного складу (C - 0,01%, Mn - 0,12%, Si - 0,02%) на основі розрахунку рівноважних концентрацій кисню в діапазоні характерних температур технологічного процесу встановлено, що зниження тиску у вакуумній камері до 100 мбар досить для переважаючого окислення вуглецю в порівнянні з марганцем і кремнієм у всьому розглянутому діапазоні температур технологічного процесу.

На підставі виконаного аналізу показників існуючої технології виплавки і позапічної обробки низьковуглецевої сталі встановлені фактори, що сприяють зниженню вмісту вуглецю в готовій сталі: висока окисленість сталі на випуску плавки; відносно низький вміст вуглецю на випуску плавки; висока температура металу на випуску плавки.

Показана можливість отримання на випуску з ДСП напівпродукту з вмістом вуглецю менш 0,03% і високою окисленістю, що створює передумови для отримання особливо низьковуглецевої сталі при його подальшій позапічній обробці.

Термодинамічними розрахунками і на основі аналізу результатів попередніх дослідних плавок низьковуглецевої сталі, показано, що активність кисню в напівпродукту для отримання особливо низьковуглецевої сталі повинна бути такою, щоб забезпечити видалення вуглецю з нього до заданої межі, а також тих кількостей вуглецю, які надходять при розкисленні сталі з

феросплавів і з електродів при нагріванні сталі в ковші-печі, а також з періклазовуглецевої футерівки стальковша (вміст вуглецю в районі шлакового поясу 10-12%, в футеровці стін і днища - 6%); метал на випуску з ДСП переокислен. Витрата алюмінію на випуску не співвідноситься зі ступенем переокислення металу, що було б бажано для стабілізації і зменшення чаду силікомарганцю і, далі, що містять кальцій, феросплавів; зниження тиску у вакуумній камері до 100 мбар теоретично досить для переважаючого окислення вуглецю в порівнянні з марганцем і кремнієм у всьому діапазоні температур технологічного процесу.

На підставі термодинамічного аналізу реакцій утворення нітридів встановлена перевага утворення нітридів титану, найменша вірогідність утворення нітридів бору. На основі аналізу експериментальних даних встановлено аналітичний вираз, що дозволяє розрахувати необхідну кількість присадок титану для нейтралізації шкідливого впливу азоту, яке враховує ще й концентрацію алюмінію в сталі і дозволяє попередити формування шкідливих нітридів алюмінію. Розраховані необхідні і достатні концентрації бору в сталі, для початку перебігу реакції нітридоутворення і для забезпечення розміцнюючого ефекту, пов'язаного з формуванням нітридів бору.

Термодинамічними розрахунками і на основі аналізу результатів попередніх дослідних плавок низьковуглецевої сталі, показано, що активність кисню в напівпродукту для отримання особливо низько-вуглецевої сталі повинна бути такою, щоб забезпечити видалення вуглецю з нього до заданої межі, а також тих кількостей вуглецю, які надходять при розкисленні сталі з феросплавів і з електродів при нагріванні сталі на установці «ківш-піч, а також з періклазовуглецевої футерівки стальковша (вміст вуглецю в районі шлакового поясу 10-12%, в футеровці стін і днища - 6%).

Витрату алюмінію на випуску з печі необхідно співвідносити зі ступенем переокислення металу, що було б бажаним для стабілізації і зменшення угару силікомарганцю та кільцвімісних феросплавів.

При організації вакуумування сталі зниження тиску у вакуумній камері до 100 мбар теоретично досить для переважаючого окислення вуглецю в порівнянні з марганцем і кремнієм у всьому діапазоні температур технологічного процесу. При вакуумуванні не розкисленого алюмінієм металу кінцевий вміст вуглецю в металі 0,01% досягається навіть при його початковому вмісті 0,074%. За рахунок використання реакції вакуум кисневого зневуглецювання без додаткового введення кисню в газоподібному вигляді або у вигляді оксидів можливо одержати низьковуглецевий метал з гарантованим вмістом вуглецю на рівні 0,01% в готовому металі і мінімальним вмістом марганцю до 0,12% і кремнію до 0,02%, що забезпечує високі пластичні властивості металу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. J.-P. Birat. Impact of steelmaking and casting technologies on processing and properties of steel // *Ironmaking and Steelmaking*.- 2001.- Vol. 28.- № 2.-P. 152-158.
2. Гасик М.И. ЭлектрOMETаллургическое производство ферросплавов и электростали на пути расширения внедрения инновационных технологий / М.И. Гасик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 2. С.78-81.
3. Min Wang, Yan-ping Bao, Quan Yang, Li-hua Zhao, Lu Lin. Coordinated control of carbon and oxygen for ultra-low-carbon interstitial-free steel in a smelting process. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. December 2015, Volume 22, Issue 12, pp 1252–1259.. DOI: 10.1007/s12613-015-1192-x.
4. F.P. Tang, Z. Li, X.F. Wang, B.W. Chen, and P. Fei, Cleaning IF molten steel with dispersed in-situ hetero-phases induces by the composite sphere explosive reaction in RH ladles, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 18(2011), No. 2, p. 144
5. Zhijun HE , Yonglong JIN , Jihui LIU , Zhigang GUAN. Technology study of smelting the super-low-carbon stainless steel with vod refining furnace. *metalurgia international*. Vol. XVII no. 2 (2012).
6. Ashok K., Mandal G.K., Bandyopadhyay D. Theoretical Investigation on Deoxidation of Liquid Steel for Fe-Al-Si-O System. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, Volume 68, Supplement 1, p. 9-18.  
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12666-015-0574-0#page-2>
7. Malyutin K.V., Paderi S.N.: Interaction Parameters of carbon in Liquid Iron and Thermodynamics of Carbon and Oxygen in Alloyed Iron Melts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, Volume 2007, Issue 7, p. 545-551.  
<http://link.springer.com/article/10.1134%2FS003602950707002#/page-1>
8. Kamkina L. V., Stovpchenko G.P., Yakovlev Yu.N., Velichko O. G. Physic-chemical model of degassing and simulation of metal foam formation during vacuum treatment, *Liquid Metal Processing Conference (LMPC 2009)*, Santa Fe, New Mexico, USA, September 20-23, 2009.TMS-p.183-190.

9. Haruo Mitsuji, Takayoshi Shimomura, Kenji Araki, Kaoru Watanabe. Production and Quality of Hot-Rolled Steel Sheets with Excellent Formability. SAE Transactions. Vol. 94, Section 1 (1985), pp. 700-708. JSTOR. <https://www.jstor.org/stable/44467707>

10. Texture, microstructure and anisotropic properties of IF-steels with different additions of titanium, niobium and phosphorus. Andrea Pedroza, da Rocha Santosa, Thaís Conde da Motaa, Heber Vieira Gomes Segundob, Luiz Henrique de Almeidaa, Leonardo Sales Araújoa, Adriana da Cunha Rochaa. J.Mater. Res. Technol. Vol. 7. Issue 3. 2018;7(3):331–336.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.009>

11. Leon M. Cheng, E. Bruce Hawbolt, Ray Meadowcroft. Dissolution and Coarsening of Aluminum Nitride Precipitates in Low Carbon Steel — Distribution, Size and Morphology. The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science. Volume 39, 2000 - Issue 1. Pages 73-86. 2013.

<https://doi.org/10.1179/cmj.2000.39.1.73>

12. A. Tuling, B. Mintz. Crystallographic and morphological aspects of AlN precipitation in high Al, TRIP steels. Journal Materials Science and Technology. Volume 32, 2016 - Issue 6. Pages 568-575. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000126>

13. Wilson F. G., Gladman T.: Aluminium nitride in steel', Int. Mater. Rev., 1988, 33, (5), 221–286. doi: <https://doi.org/10.1179/imr.1988.33.1.221>

14. Furubayashi E., Endo H. and Yoshida H.: Effects of prior plastic deformation on the distribution and morphology of AlN precipitates in alpha-iron, Mater. Sci. Eng., 1974, 14, 123–130. doi: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(74\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0025-5416(74)90005-6)

15. Radis R., Schwarz S., Zamberger S. and Kozeschnik E.: 'AlN precipitation during isothermal annealing of ultra low carbon steel', Steel Res. Int., 2011, 82, (8), 905–910. doi: <https://doi.org/10.1002/srin.201000289>

16. Kang S. E., Banerjee J. R. and Mintz B.: 'Influence of S and AlN on hot ductility of high Al, TWIP steels', Mater. Sci. Technol., 2012, 28, 589–596. doi:

<https://doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000109>

17. J. M. Kim, J. K. Park. On the AlN precipitation and grain refinement in the Al(N)-added medium C–Mn steels. *Philosophical Magazine Letters*. Volume 97, 2017 - Issue 8. Pages 320-327. 2017.

<https://doi.org/10.1080/09500839.2017.1356479>

18. Погрібна Н.Е., Куцова В.З., Ковзель М.А., Стеценко А.П. Механізми руйнування конструкційних будівельних сталей. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2 (77), 2017. С.41-47.

19. Thermodynamics of Titanium, Nitrogen and TiN Formation in Liquid Iron. Wan-Yi Kim, Jong-Oh Jo, Tae-In Chung, Dong-Sik Kim, Jong-Jin Pak. *ISIJ International*, Vol. 47 (2007), No. 8, pp. 1082–1089. DOI:10.2355/isijinternational.47.1082

20. Thermodynamics of Titanium, Nitrogen and TiN Formation in Liquid Iron. Wan-Yi Kim, Jong-Oh Jo, Tae-In Chung, Dong-Sik Kim, Jong-Jin Pak. *ISIJ International*, Vol. 47 (2007), No. 8, pp. 1082–1089.

21. Maziar Sahba Yaghmaee, George Kaptay. The Solubility of Nitrogen and Nitrides in Ternary Liquid Iron Alloys. *Materials Science Forum* Vols. 414-415 (2003) pp. 491-496. Trans Tech Publications, Switzerland. <http://www.scientific.net>

22. Зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі 08Ю шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів. Камкіна Л.В., Мішалкін А.П., Камкін В.Ю., Грищенко Ю.М., Ісаєва Л.Є. *Теорія і практика металургії*. - №6. – 2019. – С. 16-24. ISSN 1028-2335. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.03>.

23. Pradhan R. Cold-rolled interstitial-free steels: A discussion of some metallurgical topics. / R. Pradhan // *Invited Lecture, Bethlehem Steel Research Labs*, 1994 – P. 165 – 178.

24. R.Mendoza, J.Huante, M.Alanis, C.Gonzalez-Rivera, J.A.Juarez-Islas. Processing of ultra low carbon steels with mechanical properties adequate for automotive applications in the as-annealed condition. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 276, Issues 1–2, 15 January 2000, Pages 203-209.

[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00267-1)

25. Приходько Э.В. Металлохимия комплексного легирования М.:  
Металлургия, 1983. — 184 с.: ил.

26. Низьковуглецева сталь для тонкого листового прокату з підвищеними властивостями. Теорія і практика металургії. - № 1-2 (112-113). – 2018. С. 35-44.  
Камкіна Л.В., Пройдак Ю.С., Камкін В.Ю., Ремез О.А., Безшкуренко О.Г.

[https://nmetau.edu.ua/file/zh2018\\_1-2\\_w10.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh2018_1-2_w10.pdf)

27. Velychko O.G., Kamkin V.Yu., Projdak Yu.S. Coordinated control of the composition of 01yut steel and deformation processing modes to achieve specified mechanical properties. Теорія і практика металургії. №2(143), 2024. С 36-44.

ISSN 1028-2335. <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2024.06>

[https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_02\\_2024\\_ok.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_02_2024_ok.pdf)

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі виконаного аналізу показників існуючої технології виплавки і позапічної обробки низьковуглецевої сталі встановлені фактори, що сприяють зниженню вмісту вуглецю в готовій сталі: висока окисленість сталі на випуску плавки; відносно низький вміст вуглецю на випуску плавки; висока температура металу на випуску плавки.

Показана можливість отримання на випуску з ДСП напівпродукту з вмістом вуглецю менш 0,03% і високою окисленістю, що створює передумови для отримання особливо низьковуглецевої сталі при його подальшій позапічній обробці.

Термодинамічними розрахунками і на основі аналізу результатів попередніх досвідчених плавок низьковуглецевої сталі, показано, що активність кисню в напівпродукту для отримання особливо низьковуглецевої сталі повинна бути такою, щоб забезпечити видалення вуглецю з нього до заданої межі, а також тих кількостей вуглецю, які надходять при розкисненні сталі з феросплавів і з електродів при нагріванні сталі в ковші-печі, а також з періклазовуглецевої футерівки стального ковша (вміст вуглецю в районі шлакового поясу 10-12%, в футеровці стін і днища - 6%); метал на випуску з ДСП переокислен. Витрата алюмінію на випуску не співвідноситься зі ступенем переокислення металу, що було б бажано для стабілізації і зменшення чаду силікомарганцю і, далі, що містять кальцій, феросплавів; зниження тиску у вакуумній камері до 100 мбар теоретично досить для переважаючого окислення вуглецю в порівнянні з марганцем і кремнієм у всьому діапазоні температур технологічного процесу.

Показники процесів позапічної обробки - зневуглецювання, розкислення, формування неметалевих включень, десульфурація і ін. залежать від характеристик напівпродукту и як наслідок формують механічні властивості металу. Для підвищення ефективностіз плавильного агрегату позапічної обробки напівпродукт, який виплавляють в ДСП, повинен мати високу

окисленість, низький вміст вуглецю і високу температуру металу на випуску плавки.

Проведені термодинамічні розрахунки необхідного рівня окисленості для забезпечення достатнього ступеню зневуглецювання та термодинамічні дослідження механізму видалення кисню із сталі при вакуумуванні. дозволили визначити умови протікання реакції розкислення вуглецем, що забезпечує досягнення заданих низьких концентрацій вуглецю за рахунок кисню, що міститься в металі і дозволяє знизити витрату алюмінію на попереднє розкислення, що попередить формування глиноземних неметалічних включень, які негативно впливають на перебіг розливання і експлуатаційні властивості металу.

Термодинамічними розрахунками підтверджена можливість використання титану в якості стабілізатора азоту і виведено регресійне рівняння, яке дозволяє розрахувати величину присадок титану після вакуумування. Це дає можливість нейтралізувати дію азоту в сталях і сприяє усуненню дефектів металу, пов'язаних з виділенням нітридів алюмінію по межах первинних зерен. При цьому при утриманні в сталі титану вище, запропонованого залежністю, спостерігається поява дефектів, пов'язаних з нітридами титану, а менша кількість є недостатнім для досягнення зазначеного технічного результату, тому що спостерігається утворення нітридів алюмінію.

Результати попереднього випробування можливості вакуумування напівпродукту з високою окисленістю та обґрунтованих режимів позапічної обробки підтвердили можливість отримання низьковуглецевої сталі з необхідним рівнем фізико-хімічних і механічних властивостей. Проведені металографічні дослідження показали що структура отриманої сталі представлена чистим ферритом з нерівномірними вкрапленнями по межах зерен цементиту, що свідчить про високі пластичні властивості отриманої сталі

Здійснено виплавку нової ультранизьковуглецевої (вміст 0,002– 0,005% вуглецю), мікролегованої алюмінієм сталі, яка відрізняється від відомих марок

сталі вмістом алюмінію та відсутністю в її складі титану, з мінімальним вмістом шкідливих домішок ( $P \sim 0,010\%$ ;  $S \sim 0,005\%$ ;  $N \sim 50\text{ppm}$ ;  $O \sim 30\text{ppm}$ ;  $H \sim 2\text{ppm}$ ).

Досліджений вплив комбінованої пластичної деформації на формування структури, розмір зерен, щільність дислокацій, мікронапруження гарячекатаних ультранизьковуглецевих сталей 08пс, 01ЮТА, 01ЮТ, 01ЮТ(Са). Встановлено, що: кальцій сприяє посиленню різнозернистості після прокатки, після відпалу розмір зерна в сталі 01ЮТ(Са) збільшуються, різнозернистість зберігається. Відпал досліджених сталей зменшує значення мікронапружень у 1,11,2 рази, утворюючи структуру, максимально наближену до рівноважної, у результаті формування близьких за розмірами кристалітів та щільності дислокацій.

### РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Для зниження вмісту вуглецю за рахунок вакуум-кисневого зневуглецювання слід подовжити період «глибокого вакууму» на 4-6 хвилин. Для збільшення ступеня десульфурзації за рахунок кальційвмісних феросплавів на УКП перед їх введенням слід розкислювати метал алюмінієм з метою отримання вмісту сірки менше 0,005% і збільшення ефективності використання кальцію силікокальцію. Витрата алюмінію (без урахування втрат за рахунок інших джерел кисню) встановити рівним добутку коефіцієнта 1.125 на величину окисленості виміру перед УКП за вирахуванням 30 ppm (величина, яка виключає утворення силікатних неметалевих включень при подальшому введенні силікокальцію).

3. Оптимізувати шлаковий режим на УКП: забезпечити основністьшлаку на рівні 2,8-3,5 (оптимально 3,2); забезпечити витрату плавикового шпату до 20% від маси вапна, яке присаджується. Для запобігання утворенню підкіркових бульбашок розкислення має забезпечувати концентрацію активного кисню не більше 5 ppm. Для зменшення ступеня тріщиноутворення НЛЗ встановити перегрів металу над температурою ліквідус на рівні 30-40 град. Для зменшення ступеня транскристалізації структури заготовки скорегувати в бік зменшення витрату води на вторинне охолодження МБЛЗ.

4. З метою покращення комплексу механічних властивостей тонколистового прокату з ультранизьковуглецевих сталей для виготовлення деталей в автомобіле-, машино- та ракетобудуванні методом холодної тамповки, рекомендується застосувати раціональні режими обробки, які передбачають гарячу прокатку в феритному інтервалі температур з наступною деформацією методом КГТ.

5. Для зменшення ваги деталей і конструкцій автомобільного транспорту, а також для розширення сфер використання ультранизьковуглецевих сталей в машино- та ракетобудуванні рекомендується застосовувати інтенсивну пластичну деформацію методом КГТ при 5 обертах та тиску  $310 \text{ кг/см}^2$ .

6. Для оптимізації технології виплавки та інтенсивної пластичної деформації ультранизьковуглецевих сталей для отримання тонколистового прокату для підприємств автомобіле- та машинобудування і організації в Україні виробництва сталей типу 01ЮТА, 01ЮТ та тонкого листа з них рекомендується використовувати визначені раціональні технологічні режими.