

УДК 669.046.512:083.8

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.01>

Куцова В.З., Камкін В.Ю., Кнапинський М.Г., Проїдак С.В., Варіцев А.О.

## Технологія виплавки чистої сталі та особливості позапічної обробки

Kutsova V.Z., Kamkin V.Yu., Knapinskij M.G., Projdak S.V., Varitsev A.O.

### Pure steel milling technology and specific features

**Мета.** Визначити технологічні параметри виплавки та позапічної обробки **низьковуглецевої сталі**. **Методика.** Розглянуто термодинаміку реакцій утворення нітридів та встановлена перевага утворення нітридів титану, найменша вірогідність утворення нітридів бору. На основі аналізу експериментальних даних одержано 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 для забезпечення розмінюючого ефекту, пов'язаного з формуванням нітридів бору. **Результати.** 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 розкисненні сталі з феросплавів і з електродів при нагріванні сталі на установці «ківш-піч, а також з періклазовуглецевої футеровки сталковша (вміст вуглецю в районі шлакового пояса 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 кількості вмісних феросплавів. **Наукова новизна.** 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 розкисненого алюмінієм металу кінцевий вміст вуглецю в металі 0,01% досягається навіть при його початковому вмісті 0,074%. **Практична значущість.** 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.

Ключові слова: чиста сталь, позапічна обробка, нітрид титану, нітрид алюмінію, вакуумування

**Objective.** Determine the technological parameters of smelting and out-of-furnace processing of low-carbon steel.

**Method.** The thermodynamics of nitride formation reactions is considered and the advantage of titanium nitride formation, the lowest probability of boron nitride formation is established. Based on the analysis of experimental data, an analytical expression was obtained, which allows to calculate the required amount of titanium additives to neutralize the harmful effects of nitrogen, which also takes into account the concentration of aluminum in steel and prevents the formation of harmful aluminum nitrides. Necessary and sufficient concentrations of boron in steel are calculated to start the nitride formation reaction and to provide the strengthening effect associated with the formation of boron nitrides.

**Results.** Thermodynamic calculations and based on the analysis of the results of previous experimental melts of low-carbon steel, it is shown that the activity of oxygen in the intermediate to obtain particularly low-carbon steel should be such as to ensure the removal of carbon from it to a given limit, as well as the amounts of carbon deoxidized steels from ferroalloys and electrodes when heating steel on ladle-furnace installations, as well as from periclase-carbon lining of steel ladle (carbon content in the area of the slag belt 10-12%, in the lining of walls and bottoms - 6%). furnaces must be correlated with the degree of metal oxidation, which would be desirable to stabilize and reduce the precipitation of silicomanganese and calcium-containing ferroalloys. **Scientific novelty.** When organizing the evacuation of steel, reducing the pressure in the vacuum chamber to 100 mbar is theoretically sufficient for the predominant oxidation of carbon in comparison with manganese and silicon in the entire temperature range of the process. When evacuating non-deoxidized aluminum metal, the final carbon content in the metal is 0.01% is achieved even at its initial content of 0.074%. **Practical significance.** Due to the use of vacuum oxygen decarburization reaction without additional introduction of oxygen in gaseous form or in the form of oxides, it is possible to obtain low-carbon metal with a guaranteed carbon content of 0.01% in the finished metal and a minimum manganese content of 0.12% and silicon up to 0, 02%, which provides high plastic properties of the metal.

Keywords: pure steel, out-of-furnace processing, titanium nitride, aluminum nitride, vacuuming

#### Вступ

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 структуру галузі [1, 2]. Конкурентність продукції та глобалізація ринку впливають на прискорення темпів розробки та впровадження нових технологій виготовлення чавуну та сталі, що призведе до поступового вдосконалення існуючих технологій та до основних розробок у кількох ключових сферах

Куцова Валентина Зіновіївна – д.т.н., проф. НМетАУ  
Камкін Володимир Юрійович – аспірант НМетАУ  
Кнапинський Марчин – д.т.н., Ченстохов, Польща  
Проїдак Світлана Вікторівна – к.т.н., доц. ДНУЗТ  
Варіцев Антон – студент НМетАУ

Kutsova V. – D. T. S. Professor NMetAU  
Kamkin V. - graduate student of NMetAU  
Knapinsky Marchin – D. T. S., Czestochowa, Poland  
Projdak S. - Ph.D., Assoc. DNUZT  
Varitsev A. - student of NMetAU

виробництва металів та сплавів.

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. Крім того, здешевлення електроенергії забезпечило економічну ефективність виробництва в дугових сталеплавильних печах сталей масового сортаменту [3].

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 [4,5].

#### Аналіз наукової інформації.

Актуальною проблемою сьогодення є організація в Україні виробництва ультранизьковуглецевих сталей (УНВС) типу 01ЮТ, 01ЮТА та тонкого листа з них з підвищеним комплексом механічних властивостей, який використовується для виготовлення методом холодної штамповки деталей конструкцій автомобілей, а також можуть використовуватись для виготовлення деталей у ракетотехніці та машинобудуванні. IF-сталь (Interstitial Free Steel) – сталь, вільна від атомів впровадження) має феритну структуру без атомів впровадження в кристалічних ґратах  $\alpha$ -заліза. Допускається невелика кількість елементів, атоми яких можуть заміщати атоми заліза в кристалічних ґратах заліза (кремній, фосфор, нікель, хром, мідь). 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 IF-сталі виплавляють в конвертерах з комбінованою продувкою киснем і аргонем [6,7]. Особливістю технології безперервної розливки УНС в киснево-конвертерному цеху ОАО «ММК» є ковшова обробка IF – сталі на вакууматорах циркуляційного типу та на агрегаті ківш-піч [8,9]. 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°C [8].

Застосування вакууматорів, що дозволяють отримати сталі з наднизьким вмістом вуглецю в конвертерному 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 авто-

листових сталей є регламентований вміст кремнію (на рівні слідів), оскільки кремній підвищує межу текучості та межу міцності, але знижує відносно подовження сталі [10, 11]. Отримання об'ємних заготовок з нано- або ультрадрібнозернистою (НС, УДЗ) структурою сталей методами інтенсивної пластичної деформації (ІПД) – один з перспективних напрямів у галузі наноматеріалів [12, 13]. Закордонними вченими досліджені питання впливу режимів крутіння під гідростатичним тиском (КГТ) на формування структури та властивостей сталей [14, 15]. Також представляють науковий інтерес дослідження механічних властивостей НС та УДЗ структури матеріалів методом наноіндентування [16, 17] та визначення відносної кількості (спектрального складу) границь у феритній складовій конструкційних сталей [18].

Якщо стосовно методам прокатки авто листових сталей приділено значну увагу, то виплавка сталі викликає ряд питань. Найбільш детально описана технологія виробництва IF-сталі фірмою Voest-Alpine Stahl Linz GmbH [19], 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; апобігання вторинного окислення металу, насичення азотом та навуглецювання. Із конвертера випускається нерозкислений рідкий метал. Безпосередньо перед випуском вимірюється активність кисню, що дозволяє додавати у ковш 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. Запобігають попаданню в ківш конвертерного шлаку, який зменшує можливість зниження концентрації сірки.

На підприємстві фірми Thyssen Krupp Stahl в Беккервете IF-сталь виплавляють в 265-тонних конвертерах [20]. 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 цього, щоб забезпечити здатність сталі до розливки. З цієї причини важливо, щоб вміст азоту був низьким. Вміст азоту в пробах готового металу у 75% випадків були 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 особонизьковуглецевої сталі переслідує дві мети: активізація хімічної реакції шляхом підведення газообразного кисню в першій половині процесу, коли лімітуючим фактором реакції зневуглецювання є підведення кисню; допалювання в вакуумкамері газоподібного CO, який утворюється в ході реакції зневуглецювання, 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 зневуглецювання 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°C чинить позитивний вплив на стійкість футеровки конвертеру.

Так у 1994 году на підприємстві «Нешнл стал» прилад циркуляційного вакуумування обладнано фурмою з продувкою киснем зверху. Фурму з соплом Лавалля 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 вакуумкамері 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 кі-

нцевий 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°C.

В киснево-конвертерному виробництві ВАТ БМК (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 [6].

При використанні лінії безперервного відпалу холоднокатаного листа на киснево-конвертерному сталеплавильному заводі (ККСЗ) освоєно технологію виробництва IF-сталей із вмістом вуглецю не більше 0,0025%, що за-безпечує гаряче- та холоднокатаному виробництвом комбінату заготовки для прокатки тонкого автолиста. В дійсний час на ККСЗ 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:

BOF → LF → RH → CC; BOF → LF → RH → FTSC

Шихтові матеріали при виплавці сталі в кисневих конвертерах повинні бути чистими за вмістом шкідливих домішок. Рідкий чавун десульфують шляхом продувки сумішшю гранульованого магнію та порошкоподібного вапна до вмісту сірки 0,003%.

Технологічна схема BOF → CC на стадії конвертерної 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 розливку із захистом того струменю, який дозволяє виробляти IF-сталь із вмістом вуглецю менше 0,0022 % та азоту менше 0,0030%. Технологічна схема BOF → FTSC включає випуск конвертерної плавки з повним розкисленням, утворення відновного шлаку на приладі ківш-піч, примусове кисневе зневуглецювання з наступним додатковим легуванням на стадії вакуумування та безперервну розливку із захистом струменю [6].

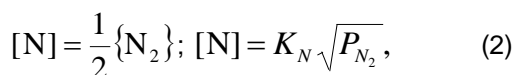
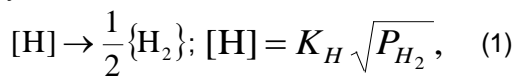
**Мета роботи** полягає у визначенні особливостей позапічної обробки низьковуглецевої сталі при застосуванні різних схем обробки зокрема розташування агрегату вакуумної обробки. Аналіз наукових публікацій свідчить про складний і багатостадійний процес виробництва сталі. У сучасному виробництві сталі 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).

Найбільш ефективним способом дегазації сталі є її вакуумування. При цьому широко використовується метод вакуумування в ковші з одночасним продуванням інертним газом. Для дослідження процесу дегазації була використана раніше описана двухмасштабна модель вакуумування [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.]. 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.

Відомо, що повнота протікання реакцій, залежить, в основному, від температури і часу протікання реакції, швидкості дифузії реагуючих компонентів, а в разі наявності розділу фаз, ще й величини поверхні їх взаємодії. У сталеплавильних процесах, для яких характерна участь газів і рідких фаз, максимальний ступінь розвитку масообмінних процесів спостерігається при вспінненні.

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 [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.]. 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 розкисненні 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.

#### Дослідження характеристик напівпродукту з ДСП та обговорення результатів

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 спінування шлаку.

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, використовуваного для виплавки.

Таблиця 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, °C	1620	1562	1719
a <sub>o</sub> 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 ступені, 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 нижче, 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 видален-

ня газів, а зворотна може дозволити максимально видалити кисень з рідкої сталі вуглець-вакуумним розкисненням 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 2) відбувалося на всіх етапах позапічної обробки, але в різному ступені. Основна кількість сірки видалається, як і слід було очікувати, на установці піч-ківш (УКП) і, в меншій мірі, на вакууматорі (VD).

Таблиця 2 – Ступінь видалення сірки при різних схемах позапічної обробки

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

Утворені білі кінцеві шлаки (таблиця 1) 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 3) істотно не відрізнялися і знаходилися в заданих межах.

Таблиця 3 - Характеристика забруднення сталі неметалевими включеннями

Схема обробки	Сумарний бал (EN) по типам неметалевих включень			
	A	B	C	D
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 алюмінітів. Оскільки розкислення здійснювали однаково, причиною збільшення останніх може бути корозія футерування стальковша. 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) дозволив оцінити ефективність вакуумування в різних варіантах його розташування в виробничому циклі.

Таблиця 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 вакуумвуглецевого 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 спінується 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.

**Технологія отримання особливо низьковуглецевої сталі з напівпродукту ДСП**

Для одержання особливо низьковуглецевої сталі (C - 0,01%, Mn - 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 перілазовуглецевої 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.5.)

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.

Таблиця 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

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 (С - 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 аргонем. Одночасно відбирали проби, вимірювали температуру і окисленість металу. (таблиця 6).

Таблиця 6. Основні параметри позапічної обробки на установці вакуумування (VD)

№	Параметри металу, до обробки та після обробки						Тривалість вакуумування, хв., всього
	Вміст вуглецю, %		Окисленість, ppm		Температура, °C		
	до	після, менше	до	після (факт/розрахунок)	до	після	
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 плавки 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 2) 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, по-

верхня 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 вакуумуглецевого розкислення при зниженому тиску дозволяє вести зневуглецювання до отримання концентрацій, характерних для особонизьковуглецевих сталей без введення додаткових окислювачів.

#### ВИСНОВКИ

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 вакуумвуглецевого розкислення при зниженому тиску дозволяє скоротити витрату розкислювачів, а також отримувати особливонизьковуглецеві сталі без введення додаткових окиснювачів. Зниження тиску посилює розкислювальну здатність вуглецю, суттєво впливає температура. Підвищення температури зрушує рівновагу реакції вакуумкисневого зневуглецювання у прямому напрямку, в результаті чого при однако-

вих 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.

#### Бібліографічний опис:

1. Manning, C.P., Fruehan, R.J. Emerging technologies for iron and steelmaking. JOM. Volume 53, Issue 10, October 2001, Pages 36-43. ISSN: 10474838. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0054-3>.
2. Jean-Pierre Birat. Steel cleanliness and environmental metallurgy. Metall. Res. Technol. Volume 113, Number 2, 2016. <https://doi.org/10.1051/metal/2015053-6>
3. Behind the Development of Advanced High Strength Steel (AHSS) Including Stainless Steel for Automotive and Structural Applications - An Overview Debasish Chatterjee<sup>1</sup>, Materials Science and Metallurgy Engineering. 2017, Vol. 4 No. 1, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.12691/msme-4-1-1>
4. Тихонов А.К. Современные стали для легковых автомобилей /А. К. Тихонов // Металловедение и термическая обработка. - 1994. - № 10. - С.22-23.
5. Блек В. Разработка новой холоднокатаной стали для особо глубокой вытяжки / В. Блек, Р. Броде, А. Фельд // Черные металлы. - 1994. - август. - С. 19-27.
6. Ху Минь, Ма Фань, Сонг Мантань. Практика производства автолистовых IF-сталей / Металлургическая и горнорудная промышленность. - №5 (290). - 2014. - С. 5-7.
7. 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>
8. Особенности технологии непрерывной разливки IF – стали в ККЦ ОАО «ММК» / Пугач Д.Д., Столяров А.М. // Литейные процессы: межрегион. сб. научн. тр. под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск гос. тех. ун-та им. В.И. Носова. – 2014. Вып. 13. – С. 186-191.
9. Изучение условий декарбонизации в процессе вакуумно-кислородного рафинирования IF – стали // Наука и производство Урала. – 2014. – №10. – С. 61-63.9-10
10. Кузнецов Д.Ю. Эволюция физико-химических свойств и качества автомобильного листа из малокремнистых сталей / Сб. научн. трудов ДонГ-ТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – Вып. 41. – С.129-134.
11. 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>
12. Nanomaterials by severe plastic deformation / Wang J.T., Figueiredo R.B., Langdon T.G., editors. -Zurich: TransTech; 2011. - P.169-291.
13. 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>
14. 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. -2014. -V.63. -P.16-29.
15. Deformation mechanisms of a modified 316L austenitic steel subjected to high pressure torsion / S. Scheriau, Z. Zhang, S. Kleber, R. Pippan // Mat. Sci. Eng. A. -2011. -V. 528. -P. 2776-2786.
16. Теоретическая прочность и теоретическая твердость / Фирстов С.А., Рогуль Т.Г. // Деформация и разрушение материалов, 2011. - № 5. С. 1-7.
17. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования/ Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова. - Вопросы атомной науки и техники, 2011. - №4 - 182-187.
18. 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.
19. 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.
20. Bode, R., Meurer, M., Schaumann, T.W., Warnecke, W. Selection and use of coated advanced high-strength steels for automotive applications(Article). Stahl und Eisen. Volume 124, Issue 8, 16 August 2004, Pages 19-24. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-4444246484&origin=resultslist&sort=plf->



[f&src=s&sid=5576200e8f7426f51d7261aa91d96e91&sot=autdocs&sdt=autdocs&sl=17&s=AU-ID%287005048451%29&relpos=1&citeCnt=9&searchTerm=](https://doi.org/10.1007/s11837-001-0054-3)

#### REFERENCE

- Manning, C.P., Fruehan, R.J. Emerging technologies for iron and steelmaking. JOM. Volume 53, Issue 10, October 2001, Pages 36-43. ISSN: 10474838. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0054-3>.
- Jean-Pierre Birat. Steel cleanliness and environmental metallurgy. Metall. Res. Technol. Volume 113, Number 2, 2016. <https://doi.org/10.1051/metal/20150503-6>
- Behind the Development of Advanced High Strength Steel (AHSS) Including Stainless Steel for Automotive and Structural Applications - An Overview Debasish Chatterjee1, Materials Science and Metallurgy Engineering. 2017, Vol. 4 No. 1, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.12691/msme-4-1-1>
- Tihonov A.K. Sovremennye stali dlya legkovykh avtomobilej /A. K. Tihonov // Metalovedenie i termicheskaya obrabotka. - 1994. - № 10. - S.22-23.
- Blek V. Razrabotka novoj holodnokatanoj stali dlya osobo glubokoj vytyazhki / V. Blek, R. Brode, A. Feld // Chernye metally. - 1994. - avgust. - S. 19 -27.
- Hu Min, Ma Fan, Song Mantan. Praktika proizvodstva avtoli-stovykh IF-stalej / Metallur-gicheskaya i gornorud - aya promyshlennost. - №5 (290). - 2014. - S. 5-7.
- David K. Matlock, John G. Speer. Processing Opportunities for New Advanced High-Strength Sheet Steels. Volume 25, 2010 - Issue 1-3: 2nd Inter-national Conference on Thermo-Mechanical Simulation and Processing of Steels. Materials and Manufacturing Processes. Original Articles. Pages 7-13. <https://doi.org/10.1080/10426910903158272>
- Osobennosti tehnologii nepreryvnoj razlivki IF – stali v KKC OAO «MMK» / Pugach D.D., Stolyarov A.M. // Litejnye processy: mezhregion. sb. nauchn. tr. pod red. V.M. Kolokolceva. – Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk gos. teh. un-ta im. V.I. Nosova. – 2014. Vyp. 13. – S. 186-191.
- Izuchenie uslovij dekarbonizacii v processe vakuumno-kislorodnogo rafinirovaniya IF – stali // Nauka i proizvod - tvo Urala. – 2014. – №10. – S. 61-63.9-10
- Kuznecov D.Yu. Evolyuciya fiziko-himicheskikh svoystv i kachestva avtomobilnogo lista iz ma-lokremnistykh stalej / Sb. nauchn. trudov DonG-TU. – Alchevsk: DonGTU, 2013. – Vyp. 41. – S.129-134.
- 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>
- Nanomaterials by severe plastic deformation / Wang J.T., Figueiredo R.B., Langdon T.G., editors. -Zurich: TransTech; 2011. - P.169–291.
- 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>
- 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. -2014. -V.63. -P.16–29.
- Deformation mechanisms of a modified 316L austenitic steel subjected to high pressure torsion / S. Scheriau, Z. Zhang, S. Kleber, R. Pippan // Mat. Sci. Eng. A. -2011. -V. 528. -P. 2776-2786.
- Teoreticheskaya prochnost i teoreticheskaya tverdost / Firstov S.A., Rogul T.G. // Deformaciya i razrushenie materialov, 2011. – № 5. S. 1-7.
- Harakteristika plastichnosti, opredelyaemaya metodom indentirovaniya/ Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova. - Voprosy atomnoj nauki i tehniki, 2011. – №4 - 182-187.
- Udoskonalennyya metodiki viznachennyya spektralnogo skladu granic zeren u nizkovuglecevykh stalyah / Suhomlin G.D., Shudro R.E., Shudro A.E. // Metaloznavstvo ta termichna obrabotka meta-liv, 2015. – № 2. – S. 30-35.
- Flessholcer H. Ispolzovanie ustanovki cirkulyacionnogo vakuumirovaniya v proizvodstve stalej dlya tonkogo lista firmoj Voest-Alpine Stahl Linz GmbH / X. Flessholcer, K. Yandl, A. Yungrajtmajer // Chernye metally, 1999. - №1.
- Bode, R., Meurer, M., Schaumann, T.W., Warnecke, W. Selection and use of coated advanced high-strength steels for automotive applications(Article). Stahl und Eisen. Volume 124, Issue 8, 16 August 2004, Pages 19-24. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-4444246484&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=5576200e8f7426f51d7261aa91d96e91&sot=autdocs&sdt=autdocs&sl=17&s=AU-ID%287005048451%29&relpos=1&citeCnt=9&searchTerm=>

Стаття поступила: 12.03.2019