

Міністерство освіти і науки України  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні  
Запорізького національного університету

**О.В. Харченко, Н.В. Лічконенко**

## **ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ**

Методичні вказівки до практичних занять  
для здобувачів ступеня вищої освіти магістра  
спеціальності 136 “Металургія”  
освітньо-професійної програми “Металургія чорних металів”

Затверджено  
Вченою радою ЗНУ  
Протокол № 8 від 26.04.2020 р.

Запоріжжя  
2020

УДК 669.184

X227

Харченко О.В., Лічконенко Н.В. Перспективні технології легування сталі : методичні вказівки до практичних занять для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія чорних металів». Запоріжжя : П ЗНУ, 2020. 48 с.

Методичні вказівки містять загальні відомості про класифікацію легуючих елементів та їх вплив на властивості сталі, про нові процеси легування сталі, а також практичні роботи з моделювання й оптимізації процесів легування сталі на установках піч-ківш за допомогою навчально-дослідницької програми «Excalibur».

Для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія чорних металів».

Рецензент

*О.Г. Кириченко*, к.т.н., доц. кафедри металургії

Відповідальний за випуск

*Ю.Ф. Терновий*, д.т.н., проф., завідувач кафедри металургії

## ВСТУП

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Перспективні технології легування сталі» призначені для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія чорних металів».

Метою викладання дисципліни «Перспективні технології легування сталі» є надання студентам теоретичних і практичних знань про перспективні технології легування сталі і фізико-хімічні процеси, що лежать в їх основі, сучасний стан розвитку технологій для їх реалізації.

Завданням дисципліни є закріплення знань, на базі яких будуть отримані фундаментальні та прикладні знання для проведення різноманітних досліджень, компетентного і відповідального вирішення виробничо-технічних задач; надання студентам навичок роботи зі спеціалізованим науково-дослідним та навчальним програмним комплексом «Excalibur».

Студент повинен знати фізико-хімічні процеси, що відбуваються при легуванні сталі; технологію прямого легування сталі оксидними матеріалами; технологію вторинного електротермічного легування і рафінування сталі; а також вміти за допомогою програми «Excalibur» розраховувати оптимальні режими легування сталі за умов одно- та двосторонніх обмежень, що накладаються на наявність легуючих матеріалів, температуру, маси і склад металу, шлаку і газу.

«Перспективні технології легування сталі» є фаховою дисципліною, для вивчення якої необхідні знання з наступних дисциплін: «Теорія металургійних процесів», «Хімічна термодинаміка», «Теорія і технологія сталеплавильного виробництва».

Методичні вказівки складаються з вступу, чотирьох розділів, переліку літературних джерел, містять розрахунки і таблиці, що забезпечують якісне сприйняття наведеного матеріалу.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОЦЕСИ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ

Металургійні підприємства України і СНД випускають різноманітні марки сталей і металопродукції, які відрізняються хімічним складом і фізико-механічними властивостями. Частка виробництва легованих сталей в загальному обсязі виплавки становить близько однієї чверті.

Бурхливе зростання металургійної промисловості в світі в останні десятиліття призвело до різкого збільшення цін на легуючі матеріали і виникнення дефіциту ряду важливих складових сталі. Вартість і дефіцитність легуючих в кожній країні різна і визначається природними запасами елемента, масштабами і технологією його промислового виробництва і споживання, кон'юнктурою на світовому ринку. Так, великі запаси марганцю і кремнію в Україні зробили їх найбільш дешевими і широко використовуваними елементами в металургії. А в США, навпаки, марганець в більшій мірі імпортується і є одним з дефіцитних елементів [1].

При таких масштабах виробництва і застосування особливого значення набуває раціональний вибір технологій і типу легуючих елементів, враховуючи їх вартість і дефіцитність. У зв'язку з цим можна виділити кілька тенденцій розвитку технології легування в сталеплавильному виробництві:

- розробка нових марок сталей, так званих, економно легованих, в яких введенням мінімуму легуючих елементів досягається найкраще поєднання експлуатаційних характеристик;
- мікролегування сталей в поєднанні зі спеціальними режимами термообробки, що дозволяє досягати високих значень міцності при збереженні високої в'язкості і хорошою зварюваності;
- ускладнення хімічного складу при подальшому зниженні сумарної питомої витрати легуючих елементів;
- залучення в практику виробництва нових комбінацій легуючих елементів або нетрадиційних легуючих;
- розширення номенклатури легуючих композицій на ринку;
- розробка нових нетрадиційних технологій легування, що забезпечують в кожному конкретному випадку необхідні властивості сталі при мінімальному і економному легуванні.

### 1.1 Історія виникнення легованих сталей

Людина навчилася використовувати легуючі елементи для поліпшення якості сталевих і залізних виробів задовго до того, як дізналась про їх існування - ще до початку залізного віку використовувалося метеоритне залізо, що містить до 8,5% нікелю. Більш-менш осмислене використання властивостей легуючих елементів відноситься до епохи Середньовіччя, і сталося це на Сході. Хімічний аналіз сталі, з якої виготовлено японську зброю XI-XIII ст., показав наявність в її складі молібдену. Сьогодні добре

відомо, що сталь, легована молібденом, володіє одночасно високою твердістю, міцністю і в'язкістю. Залізисті піски розсипних родовищ, з яких японські майстри отримували кричне залізо, містили легуючі елементи. Працюючи з ними, японські майстри відмітили, що, якщо брати руду в якомусь певному місці, то сталь, зроблена з неї, має особливі якості. Піддаючи отриману крицю складній хіміко-термічній обробці в середньовічній Японії отримували природнолеговану сталь, зміцнену пластичною деформацією і термомеханічної обробкою. Крім молібдену використовувалися й інші елементи: підвищений вміст фосфору і міді зустрічається у багатьох зразках стародавніх дамасків.

Першим вдалим досвідом цілеспрямованого легування вважається винахід Девіда Мюшетта, а першим легуючим елементом в промислових масштабах став марганець.

У 1801 р Девід Мюшетт - бухгалтер заводу в Клайде (Шотландія), який займався пробірним мистецтвом (хімічним аналізом), виявив, що добавки марганцю покращують властивості сталі. Д. Мюшетт першим почав додавати в тигельну шихту марганцеву руду з метою отримання легової сталі.

Часто можна прочитати, що ці добавки сприяли видаленню з металу кисню, що погіршує якість сталі (тобто розкисленню металу), проте це малоймовірно. Справа в тому, що тигельна сталь виплавлялася в невеликих обсягах, а крім того - під шаром шлаку і в присутності вуглецю, що мінімізувало насичення розплаву киснем. При виплавці тигельної сталі марганець в першу чергу пов'язував і видаляв з металу сірку, а крім того служив легуючим елементом, що підвищує міцність сталі (якщо його вміст у них перевищував 1%).

Перший патент на використання марганцю при виробництві чавуну і сталі взяв в 1816 р. Юхан Готліб Ганн. У наступному, 1817 р. принципово важливий патент на «комплексне» використання легуючих елементів отримав Девід Мюшетт. У тексті патенту вказувалося, що привілей отриманий на «додавання і плавку з усякою сумішшю, що дає литу (тигельну) сталь, відомої кількості товченого чавуну, очищеного заліза і окису марганцю з хромовою рудою в порошок, з додаванням або без додавання товченої вольфрамової руди або вольфрамової кислоти». Пізніше з'явилися й інші патенти.

Промислове виробництво сталі Мюшетта почалося в 1871 році. Головним чином його легована сталь йшла на виготовлення різців для металообробних верстатів. Крім цього, ця сталь пізніше стала прообразом сучасної лінійки швидкорізальних сталей.

Що стосується першої легової сталі масового виробництва і широкого спектру застосування, то нею стала *сталь Гадфільда*. Вона характеризується високою зносостійкістю при високому тиску або ударних навантаженнях і пластичністю.

Цю сталь відкрив англійський металург Роберт Еббот Гадфільд в далекому 1882 році. Вміст вуглецю в сталі Гадфільда нижче в порівнянні зі сталлю Мюшетта: 1,0-1,5%, тоді як марганцю значно більше - від 12 до 14%,

а вольфраму і зовсім немає. Без особливих змін хімічного складу цю сталь виготовляють і в наші дні.

Сталь Гадфільда, технологію виплавки якої освоїли в СРСР в 1936 році, йшла на виготовлення траків гусениць танків, тракторів, машин, щік дробарок, рейкових хрестовин, стрілочних переводів, що працюють в умовах ударних навантажень і стирання, а також віконних ґрат для місць позбавлення волі [2].

Безперервний розвиток техніки і економіки диктував нові вимоги, спрямовані на поліпшення експлуатаційних властивостей сталі, зниження витрати металу у виробках і конструкціях або ж при збереженні витрати металу на задоволення зростаючих потреб. Тому питання про підвищення використання легованої сталі є актуальним у всіх країнах світу і з цієї причини в світовій металургії виробництво легованої сталі випереджає виробництво сталі в цілому.

Леговані сталі і сплави (ЛС) застосовуються практично у всіх галузях промисловості. *Низьколеговані сплави* найбільше експлуатуються в будівельній сфері. З них також зводять магістральні трубопроводи. *Середньолеговані конструкційні ЛС* підходять для машинобудівної галузі. Крім того, вони годяться для виготовлення нескладних інструментів - протяжок, розгортки, свердел.

*Високолеговані сталі* незамінні для виготовлення хірургічного інструмента і вимірювальних пристроїв, шарикопідшипників, конструкцій, що піддаються впливу пластичних навантажень. Також різні марки легованих сплавів знайшли своє застосування в верстатобудівній, автомобільній та сільськогосподарській промисловості. Велике значення має тип ЛС після їх нормалізації.

*Перлітні сталі* характеризуються відмінною зварюваністю. Тому їх використовують для виробництва деталей машин і всіляких конструкцій. Такі сплави підрозділяють на цементуємі і покращувані. У перших міститься не більше 0,25% вуглецю, а у других його може бути до 0,5%. Вироби з цементуємих ЛС загартовують і піддають відпуску (низькому), за рахунок чого вони набувають дуже стійку до зношування поверхню. При цьому серцевина подібних деталей має маловуглецеву мартенситну структуру, а верхня частина - високовуглецеву.

Вироби з покращуваних сплавів загартовують, а потім вони проходять високий відпуск. У підсумку виходить чітко виражена мартенситна структура. Вона описується високою в'язкістю і одночасно достатньою міцністю. Подібні вироби рекомендовані для експлуатації в середовищах, де на деталі впливають постійні динамічні навантаження. З перлітних ЛС роблять вимірювальний і ріжучий інструмент з підвищеними показниками зносостійкості і твердості. Подібні пристосування добре використовувати при ударних навантаженнях.

*Аустенітні сталі* різного ступеня легування застосовуються в якості сировини для виготовлення елементів криогенного і хімічного устаткування.

Вони також підходять для використання в якості жароміцних і жаростійких матеріалів на промислових підприємствах.

*Феритні сплави* є окаліно- і кислотостійкими. У них міститься багато хрому (до 30%) і мінімум вуглецю (максимум 0,2%). Такі сталі застосовуються найчастіше в відпаленому вигляді. Вони відносно крихкі і маломіцні. З цієї причини вони не застосовуються в будівельних конструкціях.

*Карбідні сплави* називаються інструментальними і характеризуються високою стійкістю до зносу. Їх використовують для виробництва ріжучих пристроїв, що функціонують на великих швидкостях [1,3].

## 1.2 Загальні відомості про леговані сталі

**Леговані сталі** - це сплави на основі заліза, до хімічного складу яких спеціально введені легуючі елементи, що забезпечують при певних способах виробництва і обробки необхідну структуру і властивості.

**Легуючими елементами** називають хімічні елементи, спеціально введені в сталь для отримання необхідних будови, структури, фізико-хімічних і механічних властивостей.

Сучасне металургійне виробництво використовує велику кількість легуючих елементів: метали, неметали і різні їх комбінації. У світі в даний час в тій чи іншій мірі для поліпшення якості металу використовуються більше 25 елементів [4]. Основними легуючими елементами в сталях є Mn, Si, Cr, Ni, Mo, W, Co, Cu, Ti, V, Zr, Nb, Al, B. В деяких сталях легуючими елементами можуть бути також P, S, N, Se, Te, Pb, Ce, La тощо. Легуючі застосовують або в чистому вигляді (Mn, Cr, Ti, N, V, Si, B, S), або у вигляді хімічних сполук (CaC<sub>2</sub>, FeS<sub>2</sub>, MoO<sub>3</sub> та ін.), але частіше за все легування здійснюється з допомогою різних сплавів, зазвичай на основі заліза (FeSi, FeNb, FeSiCr тощо).

Вміст легуючих елементів в сталях може коливатися від тисячних часток відсотка до десятків відсотків. Деякі легуючі елементи (V, Nb, Ti, Zr, B) можуть істотно впливати на структуру і властивості сталі при вмісті їх в сотих частках відсотка і навіть менше. Такі сталі називають **мікролегованими**.

Легована сталь ділиться на три групи: низьколегована (сумарний вміст легуючих елементів нижче 2,5%), середньолегована (2,5-10%), високолегована (понад 10%).

Леговані сталі характеризуються чималою кількістю експлуатаційних та інших переваг. Такі сплави мають:

- підвищений опір деформаціям (пластичним);
- високу твердість;
- стабільну аустенітну структуру, що забезпечує відмінні показники прокалюваності металу;
- високий рівень опору холодноламкості і в'язкості;

- унікальні технологічні якості;
- мінімальну ймовірність викривлення або появи інших дефектів при проведенні загартування сталі.

Однак мають леговані сталі і неминучі недоліки. Вони:

- схильні до ліквідації дендритного типу. Цього можна уникнути, якщо провести дифузний відпал металу;
- містять залишковий аустеніт (це, зокрема, стосується високолегованих сталей), який істотно зменшує опірність втоми і твердість сплаву;
- мають певну схильність до відпускнуї оборотної крихкості і до появи флокенів - орієнтованих в різні боки тріщин невеликих розмірів. Від подібних дефектів слід позбавлятися за допомогою уповільнення охолодження сталі і зниженням рівня водню в ній в процесі виплавки.

Крім флокенів, найбільш характерними дефектами легованих сталей, які рідко або зовсім не спостерігаються у звичайних (вуглецевих) сталях, є відпускуна крихкість, шаруватий і скловидний злам, карбідна ліквідація тощо [1,5-6].

### 1.3 Класифікація легуючих елементів

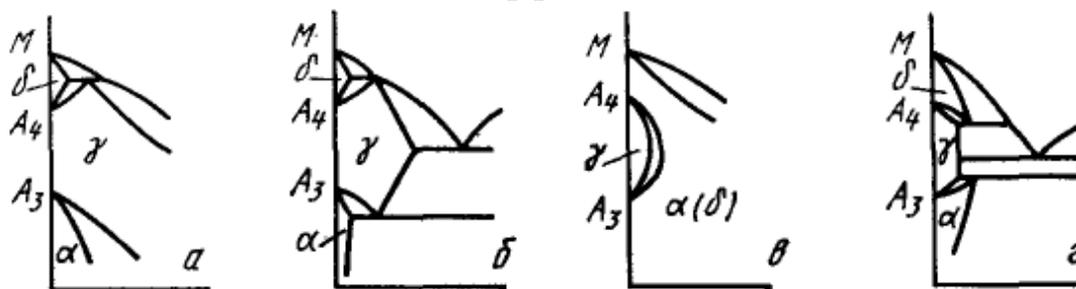
Легуючі елементи-метали можна умовно розділити на наступні групи:

- **метали залізної групи.** До них відносяться кобальт, нікель, а також близький до них за властивостями марганець;
- **тугоплавкі метали.** До них відносяться метали, що мають температуру плавлення вище, ніж у заліза (>1539 °C). З тугоплавких металів, які найбільше використовуються як легуючі елементи в сталі, можна відзначити вольфрам, молібден, ніобій, а також ванадій і хром;
- **легкі метали.** З цієї групи легуючих елементів найбільш часто застосовують титан і алюміній;
- **рідкоземельні метали (РЗМ).** До цієї групи відносять лантан, церій, неодим, а також близькі до них за властивостями ітрій і скандій. Рідкоземельні метали часто використовують у вигляді так званого мішметалу, що містить 40-45% церію і 45-50% всіх інших рідкоземельних металів.

У сплавах «залізо-вуглець» класифікацію легуючих елементів можна проводити за ступенем їх спорідненості до вуглецю в порівнянні зі спорідненістю до нього заліза. За цією ознакою розрізняють карбідоутворюючі і некарбідоутворюючі легуючі елементи. **Карбідоутворюючі** легуючі елементи (Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn), а також залізо можуть утворювати в сталі карбіди. **Некарбідоутворюючі** елементи (Cu, Ni, Co, Al, Si) карбідів в сталі не утворюють. Схильність до карбідоутворення у легуючих елементів тим сильніше, чим менш завершена d-оболонка у металевому атома.

Легуючі елементи змінюють температуру поліморфних перетворень в залізі, тобто точки  $A_3$  і  $A_4$ , тим самим впливаючи на вигляд діаграм «залізо-елемент».

За впливом легуючих елементів на діаграму стану їх можна розділити на дві групи, кожна з яких в свою чергу ділиться на дві підгрупи. На рис. 1.1 приведена схема по Ф. Веферу, що ілюструє класифікацію легуючих елементів за їх впливом на поліморфізм заліза [1].



*a* - відкрита; *б* - розширена; *в* - закрита; *г* - звужена

Рисунок 1.1 – Вплив легуючих елементів на вигляд  $\gamma$ -області діаграми залізо-легуючий елемент

До I групи належать легуючі елементи, які розширюють  $\gamma$ -область (рис. 1, *a*, *б*). Розширення  $\gamma$ -області буде відбуватися в тому випадку, якщо легуючий елемент підвищує точку  $A_4$  і знижує точку  $A_3$ . При цьому можливе існування  $\gamma$ -фази в усьому інтервалі концентрацій (відкрита  $\gamma$ -область) і обмеження області існування  $\gamma$ -фази внаслідок появи нових фаз і утворення гетерогенних областей (розширена  $\gamma$ -область).

Таким чином, легуючі елементи I групи можна ще розділити на елементи, що утворюють з залізом сплави зі структурою необмеженого гомогенного твердого розчину (рис. 1, *a*), до яких відносяться нікель, марганець, кобальт, паладій, платина, і на елементи, що утворюють сплави, в яких гомогенна область обмежується гетерогенною внаслідок утворення нових фаз (рис. 1, *б*). До таких елементів відносяться вуглець, азот, мідь, цинк.

До II групи належать елементи, які звужують  $\gamma$ -область (рис. 1, *в*, *г*). Звуження  $\gamma$ -області буде відбуватися в тому випадку, якщо легуючий елемент знижує точку  $A_4$  і підвищує точку  $A_3$ . При певній концентрації легуючого елемента може відбуватись повне замикання  $\gamma$ -області. У цій групі розрізняють також подвійні системи з замкнутою  $\gamma$ -областю і гомогенною  $\alpha$ -областю (закрита  $\gamma$ -область, рис. 1, *в*) і системи, в яких  $\gamma$ -область обмежена областю гомогенних структур (звужена  $\gamma$ -область, рис. 1, *г*).

Таким чином, легуючі елементи II групи поділяють на елементи, що утворюють з залізом сплави з повністю замкнутою  $\gamma$ -областю і утворенням гомогенної  $\alpha$ -області (берилій, алюміній, кремній, ванадій, хром, молібден, вольфрам, титан, миш'як, олово, сурма), і елементи, що утворюють з залізом сплав зі звуженою  $\gamma$ -областю, обмеженою гетерогенною областю (реній).

Відзначимо, що наведена схема не охоплює всього різноманіття можливих варіантів впливу легуючих елементів на критичні точки заліза  $\alpha$ , отже, на вигляд діаграми «залізо-легуючий елемент». Так, хром, молібден, алюміній ванадій, що відносяться до елементів, що замикають  $\gamma$ -область, спочатку знижують критичні точки  $A_4$  і  $A_3$ , і тільки починаючи з певної концентрації починають підвищувати точку  $A_3$ . Кобальт, що сприяє отриманню відкритої  $\gamma$ -області, спочатку підвищує критичну точку  $A_3$ .

Настільки різний вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза і на вигляд діаграм «залізо-легуючий елемент» обумовлений впливом різних факторів: ізоморфністю легуючого елемента однієї з модифікацій заліза ( $\gamma$  або  $\alpha$ ), розходженням атомних радіусів заліза і легуючого елемента, характером і енергією міжатомної взаємодії, електронною будовою атомів заліза і легуючого елемента.

При легуванні заліза декількома елементами одночасно їхній вплив на отримання  $\gamma$  і  $\alpha$ -фаз не підсумовується. Більш того, в ряді випадків їх вплив може бути навіть протилежним дії цього елемента в подвійному сплаві. Наприклад, хром в потрійному твердому розчині Fe-Cr-Ni сприяє отриманню  $\gamma$ , а не  $\alpha$ -фази, як в двійних сплавах Fe-Cr [1,6].

#### 1.4 Взаємодія легуючих елементів з компонентами сталі

Основними компонентами сталі є залізо і вуглець. Більшість легуючих елементів з залізом утворюють тверді розчини заміщення. Винятком є бор, який утворює з залізом твердий розчин впровадження. Багато легуючих елементів, що розчиняються в залізі, утворюють також хімічні сполуки з вуглецем - спеціальні карбіди. Крім того, легуючі елементи можуть утворювати і інші хімічні сполуки: з киснем - оксиди, з азотом - нітриди. Деякі легуючі елементи не взаємодіють з компонентами сталі і знаходяться у вільному стані, утворюючи самостійну фазу. До таких елементів відносяться срібло і свинець. Мідь приблизно до 1% розчиняється в залізі, а при більшому вмісті знаходиться у вільному стані у вигляді окремої фази. Хімічні сполуки легуючих елементів з вуглецем та іншими елементами сталі також присутні у вигляді окремої фази. Хімічні сполуки легуючих елементів з залізом і між собою називають **інтерметалідами**.

Розчиняючись в  $\alpha$ -залізі, легуючі елементи значно впливають на властивості сталі, оскільки ферит, який є твердим розчином вуглецю в  $\alpha$ -залізі, займає до 90% в структурі сталей.

Впровадження в кристалічну решітку фериту атомів інших елементів, наприклад, бору, спотворює його кристалічну решітку. Утворення твердого розчину заміщення також створює напруження в кристалічних грій решітці фериту, оскільки розміри атомів заліза і легуючого елемента розрізняються. Якщо атомний радіус легуючого елемента менше, ніж у заліза, то параметр кристалічної решітки фериту зменшується, тоді як елементи з великим атомним радіусом збільшують період решітки заліза. Спотворення

кристалічної решітки  $\alpha$ -заліза викликає відповідну зміну властивостей фериту. Більшість хімічних елементів, які використовуються як легуючі, підвищує міцність і знижує пластичність сталі.

Однак, підвищуючи твердість і міцність фериту, легуючі елементи (за винятком нікелю) знижують його пластичність і ударну в'язкість.

Найбільш широко для легування сталей використовують марганець, кремній, хром, нікель, вольфрам, молібден, ванадій, ніобій, титан і бор.

**Марганець**, в невеликих кількостях міститься у всіх сталях - як вуглецевих, так і легованих, використовується як технологічна добавка для розкислення сталі і усунення шкідливої дії сірки - червоноламкості. У залізі марганець розчиняється в будь-яких співвідношеннях, утворюючи твердий розчин. Легуючим елементом марганець вважається при вмісті в сталі більш 1%. У порівнянні з іншими легуючими елементами він найбільше підвищує прокалюваність сталі. Також марганець значно підвищує твердість сталі, але при вмісті його понад 1,5% сталь різко втрачає пластичність, тому цей вміст марганцю в сталі в більшості випадків є граничним. Однак при його вмісті близько 13%, що є винятком із загального правила, сталь набуває високу зносостійкість.

Введення марганцю призводить до сильного росту зерен аустеніту при перегріванні сталі. Тому зазвичай разом з марганцем в сталь вводять карбідоутворюючі елементи, які сприяють здрібненню зерна.

**Кремній** - один з найпоширеніших у природі елементів. Він легко окислюється, тому зазвичай знаходиться у вигляді оксидів і його відновлення з окисленої форми вимагає значних витрат енергії. У виробництві сталі кремній застосовують як розкислювач. При вмісті в сталі вище 0,5% кремній вважається легуючим елементом. У залізі кремній розчиняється в будь-яких співвідношеннях. Його вплив на міцність і пластичність сталі аналогічно дії марганцю. Вміст його в легованих сталях обмежують 2%, перевищення якого призводить до різкого зниження пластичності сталі.

**Хром** розчиняється в цементиті і утворює з вуглецем карбіди, тому його широко використовують для легування сталей конструкційного призначення. Помітно зміцнюючи сталь, хром мало впливає на її пластичність, істотно збільшує прокалюваність сталі. Завдяки утворенню карбідів підвищує зносостійкість сталі. При вмісті більше 13% надає стали корозійну стійкість.

**Нікель** - один з найбільш цінних, але дефіцитних легуючих елементів. Нікель має найбільш сприятливий вплив на властивості сталі: підвищує міцність, практично не зменшуючи її пластичності. В сталь нікель вводять в кількості до 10%.

**Вольфрам і молібден** - найдорожчі і гостродефіцитні легуючі елементи. Як вольфрам, так і молібден сильно підвищують прокалюваність сталі і, будучи сильними карбідоутворюючими елементами, подрібнюють зерно. Їх введення усуває відпускну крихкість II роду, властиву хромвміщуючим легованим сталям.

**Ванадій, ніобій, титан** - сильні карбідоутворюючі. Їх вводять для подрібнення зерна в кількості не більше 0,3%, оскільки при більшому вмісті вони знижують прокалюваність сталі і призводять до її крихкості.

**Бор** вводять в мікродозах до 0,005% з метою підвищення прокалюваності сталі. Цей елемент є найбільш ефективною добавкою для збільшення прокалюваності. Такий же ефект може бути досягнутий при введенні 0,2% молібдену або 1% нікелю [5,6].

## 2. ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ КОЕФІЦІЄНТИ ЗАСВОЄННЯ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ СТАЛІ

Коефіцієнти засвоєння здавна застосовуються в у металургійному виробництві при визначенні кількості шихтових матеріалів, необхідних для отримання необхідного складу напівпродукту або готового металу. Використовувані величини засновані на середньостатистичних даних, характерних для даного періоду плавки, складу вихідного металу, одержуваної марки сталі і усталеного набору шихтових матеріалів. Будь-яке відхилення зазначених параметрів в ту чи іншу сторону з великою ймовірністю призводить до виникнення нештатних ситуацій і, як наслідок, до виробничого браку. Причина цього полягає в тому, що в дійсності коефіцієнти засвоєння не є константами, а залежать від температури, складу металевої, шлакової і газової фаз, а також від складу застосовуваних шихтових матеріалів. Більш того, засвоєння одних елементів може зменшуватися або збільшуватися при додаванні інших хімічних елементів. Тобто існують перехресні ефекти, вплив яких відомо лише на емпіричному рівні окремих випадків.

Межа можливостей, що надаються знанням середньостатистичних коефіцієнтів засвоєння, була досягнута в інформаційно-технологічній системі «Форвард» [7], в якій оптимальні кількості шихтових матеріалів розраховувалися без урахування складних фізико-хімічних процесів, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті (або ківші). Зокрема, одним з істотних її недоліків була неможливість оптимізації кількостей неметалічних шихтових матеріалів, що не давало можливості проектувати технології десульфурзації, дефосфорації, прямого легування тощо. В іншій системі «Оракул» [8] зазначені обмеження були частково зняті, але залишилися серйозні проблеми з адекватністю і стійкістю отриманих результатів.

Важлива роль постачальника повної інформації про систему «метал-шлак-газ» відводиться детермінованої термодинамічної моделі, здатної врахувати взаємний вплив елементів і адекватно представити рівноважний стан у вигляді системи рівнянь загального вигляду:

$$F_i(m_1, m_2, \dots, m_k; \bar{m}_{[1]}, \bar{m}_{[2]}, \dots, \bar{m}_{[k]}) = 0, \quad (1)$$

де  $m_1, m_2, \dots, m_k$  – маси елементів системи;  
 $\bar{m}_{[1]}, \bar{m}_{[2]}, \dots, \bar{m}_{[k]}$  – рівноважні маси елементів в металі.

Іншими словами, якщо задані маси елементів, то така модель «повинна» розподіляти їх між металом, шлаком і газом. Із системи рівнянь (1) методом неявного диференціювання знаходяться величини  $U_{ij} = \partial m_{[i]} / \partial m_j$ :

$$U_{ij} = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = - \left[ \frac{\partial F_i}{\partial m_{[j]}} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial F_i}{\partial m_j} \right] \Bigg|_{m_{[i]} = \bar{m}_{[i]}}, \quad (2)$$

які складають квадратну матрицю і є шуканими **диференціальними коефіцієнтами засвоєння (ДКЗ)**. Фізичний сенс величин ДКЗ досить простий: «на скільки зміниться маса елемента  $i$  в металі при додаванні одиниці маси елемента  $j$  в систему». Таким чином, з'являється можливість врахувати всі перехресні ефекти впливу одних елементів на утримання інших.

Разом з тим, формула загального вигляду (2) не дає уявлення про структуру ДКЗ і є досить проблематичною з точки зору обсягу та стійкості обчислень при великій кількості врахованих елементів. Видається за доцільне, використовуючи формалізм термодинамічної моделі, привести ДКЗ до компактного вигляду, зручного як для проведення обчислень, так і для аналізу їх структури.

## 2.1 Виведення диференціальних коефіцієнтів засвоєння в явному вигляді

В якості базової термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» (1) використовується детермінована фізико-хімічна модель [9], яка найбільш точно описує процеси, що відбуваються в сталеплавильному агрегаті. Суттєвою характерною особливістю даної моделі є облік електронного вкладу в хімічний потенціал елементів в шлаку. Далі буде показано, що перевірка адекватності цієї моделі може бути проведена з використанням отриманих виразів для ДКЗ незалежно від прийнятих моделей металевих і шлакових розчинів.

Виведемо спочатку ДКЗ для системи «метал-шлак». Вихідна система  $k+1$  нелінійних рівнянь, заснована на рівності хімічних потенціалів елементів в металі і шлаку, в цьому випадку має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \frac{K_{[i]}\gamma_i}{\psi_i} \exp\left(-\frac{\mu\nu_i}{RT}\right), & i = 1..k \\ \sum_{i=1}^k x_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

де  $x_{(i)}$  – мольні концентрації елементів в шлаку;  
 $x_{[i]}$  – мольні концентрації елементів в металі;  
 $K_{[i]}$  – константи рівноваги «метал-шлак»;  
 $\gamma_i$  – коефіцієнти активності елементів в металі;  
 $\psi_i$  – коефіцієнти активності елементів в шлаку;  
 $\nu_i$  – валентності елементів в шлаку;  
 $\mu$  – рівень Фермі електронів в шлаку, або окислювально-відновлювальний потенціал системи;  
 $T$  – температура в системі;  
 $R$  – універсальна газова стала.

Проведемо наступні перетворення системи рівнянь (3):

1. Перейдемо від мольних концентрацій до чисел молей елементів відповідно в металі  $n_{[i]} = N_m x_{[i]}$  і шлаку  $n_{(i)} = N_s x_{(i)}$ , де  $N_m$  і  $N_s$  – загальне число молей в металі і шлаку. В цьому випадку сума молей кожного елементу в металі і шлаку дорівнює числу молей цього елементу в системі  $n_i = n_{[i]} + n_{(i)}$ ;

2. Введемо позначення  $A_i = \ln\left(\frac{K_{[i]}\gamma_i}{\psi_i}\right)$  і назвемо величини  $A_i$  логарифмами консолідованих (або ефективних) констант рівноваги «метал-шлак»;

3. Окислювально-відновлювальний потенціал системи  $\mu$  будемо далі вимірювати в одиницях  $RT$ . Таким чином, знаменник  $RT$  виникне.

4. Введемо змінну  $Y = \ln(N_m/N_s)$ , що дорівнює натуральному логарифму зворотної величини мольної кратності шлаку.

Перетворена система рівнянь після підстановки  $n_{[i]} = n_i - n_{(i)}$  набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} n_{(i)} = \frac{n_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)}, & i = 1..k \\ \sum_{i=1}^k n_{(i)}\nu_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

В отриманих рівняннях число молей елемента в шлаку  $n_{(i)}$  виражається через число молей даного елемента в системі і змінні  $\mu$  і  $Y$ . Наступний крок – виключити змінні  $n_{(i)}$ , скориставшись тим фактом, що суму молей в шлаку можна представити двома способами:

1. Як суму величин  $n_{(i)}$  ;
2. Як частку загального числа молей в системі  $N$ , виражену через змінну  $Y$ .

Прирівнюючи отримані вирази для суми молей в шлаку, приходимо до компактної системі двох нелінійних рівнянь щодо невідомих  $\mu$  і  $Y$ , яка повністю еквівалентна вихідній системі (3):

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu v_i)} = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu v_i)} - \frac{N}{1 + \exp(Y)} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Переваги системи (5) полягають у тому, що рішення її чисельними методами є стійким, а необхідна точність досягається приблизно в  $k$  разів швидше, ніж під час вирішення вихідної системи  $k+1$  нелінійних рівнянь. Крім того, компактні матриці Якобі системи (5) дозволяють отримати ДКУ в явному вигляді.

Рішенням системи (5) є величини  $\mu$  і  $Y$ , за допомогою яких після підстановки (4) отримуємо рівноважний молярний склад шлаку  $\bar{n}_{(1)}, \bar{n}_{(2)}, \dots, \bar{n}_{(k)}$  і рівноважний молярний склад металу  $\bar{n}_{[1]}, \bar{n}_{[2]}, \dots, \bar{n}_{[k]}$ . Важливо відзначити, що після вирішення даної системи кількості молей елементів в металі  $n_{[i]}$  і шлаку  $n_{(i)}$ , а також їх суми  $N_m$  і  $N_s$  у всіх наступних виразах є рівноважним величинами.

Використовуючи рівняння (4), представимо число молей елементу  $i$  в металі у вигляді:

$$n_{[i]} = n_i - n_{(i)} = \frac{n_i}{1 + \exp(A_i - Y - \mu v_i)} \quad (6)$$

Знайдемо спочатку загальний вигляд матриці мольних ДКУ. Для цього скористаємось правилом диференціювання складної функції (6)

$n_{[i]} = f_i(n_i, \mu, Y)$ :

$$V_{ij} = \frac{\partial n_{[i]}}{\partial n_j} = \frac{\partial f_i}{\partial n_i} \frac{\partial n_i}{\partial n_j} + \frac{\partial f_i}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial n_j} + \frac{\partial f_i}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial n_j} \quad (7)$$

Приватні похідні  $\frac{\partial f_i}{\partial n_i}$ ,  $\frac{\partial f_i}{\partial \mu}$ ,  $\frac{\partial f_i}{\partial Y}$  знаходяться безпосередньо із (6)

диференціюванням за відповідними змінними. Похідна  $\frac{\partial n_i}{\partial n_j}$  дорівнює символу Кронекера  $\delta_{ij}$ . Отож, після підстановок із (4) і (6), отримаємо структурну формулу для мольних ДКУ:

$$V_{ij} = \frac{n_{[i]}}{n_i} \left( \delta_{ij} + v_i n_{(i)} \frac{\partial \mu}{\partial n_j} + n_{(i)} \frac{\partial Y}{\partial n_j} \right) \quad (8)$$

Похідні, що залишились, знайдемо шляхом неявного диференціювання системи рівнянь (5):

$$\left[ \frac{\partial \mu}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j} \right] = -\mathbf{J}_1^{-1} \mathbf{J}_2 = - \left[ \frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial(\mu, Y)} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial n_j} \right] \quad (9)$$

Функціональні матриці  $\mathbf{J}_1$  і  $\mathbf{J}_2$  після підстановки із (4) і (6) набувають вигляду:

$$\mathbf{J}_1 = \left[ \frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial(\mu, Y)} \right] = \begin{bmatrix} -\sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h^2}{n_h} & -\sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h}{n_h} \\ -\sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h}{n_h} & \frac{N_s N_m}{N} - \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]}}{n_h} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{J}_2 = \left[ \frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial n_j} \right] = \begin{bmatrix} \frac{V_j n_{(j)}}{n_j} \\ \frac{n_{(j)}}{n_j} - \frac{N_s}{N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Відзначимо, що матриця Якобі  $\mathbf{J}_1$  є симетричною і неперитивно визначеною. Її визначник (якобіан) дорівнює нулю, коли в системі немає або металу, або шлаку. Знання матриці  $\mathbf{J}_1$  корисно не тільки для розрахунку ДКУ, але і при численному вирішенні системи рівнянь (5) методом Ньютона.

Підстановка (10) і (11) в вираз (9), дає наступні формули для відсутніх похідних:

$$\frac{\partial \mu}{\partial n_j} = -\frac{1}{D} \left[ \frac{n_{(j)} V_j}{n_j} \left( \frac{N_s N_m}{N} - \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]}}{n_h} \right) + \left( \frac{n_{(j)}}{n_j} - \frac{N_s}{N} \right) \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h}{n_h} \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial n_j} = -\frac{1}{D} \left[ \frac{n_{(j)} V_j}{n_j} \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h}{n_h} - \left( \frac{n_{(j)}}{n_j} - \frac{N_s}{N} \right) \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h^2}{n_h} \right], \quad (13)$$

де  $D$  – якобіан системи (5):

$$D = - \left( \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h}{n_h} \right)^2 - \left( \frac{N_s N_m}{N} - \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]}}{n_h} \right) \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{[h]} V_h^2}{n_h}. \quad (14)$$

Найважливішою особливістю отриманих формул для ДКЗ є та обставина, що вони не містять в явному вигляді констант рівноваги і коефіцієнтів активності в металі і шлаку. Останні вже враховані в рівноважних величинах  $n_{[1]}, n_{[2]}, \dots, n_{[k]}$ ;  $n_{(1)}, n_{(2)}, \dots, n_{(k)}$ . Це означає, що ДКЗ можуть бути оперативно обчислені безпосередньо з експериментальних даних про рівноважний склад металу і шлаку незалежно від прийнятих моделей розчинів у відповідних фазах, наприклад, за даними експрес-аналізу відібраних проб.

З іншого боку, ці ж формули дозволяють провести ефективну експериментальну перевірку адекватності вихідної термодинамічної моделі шляхом порівняння фактичного  $\Delta n_{\square}$  і розрахункового  $\mathbf{V}\Delta n$  зміни змісту елементів в металі в рівноважних системах «метал-шлак» з близькими елементними складами.

Слід зазначити, що  $\mathbf{V}$  – матриця ДКУ – не може бути будь-якою. Вона повинна задовольняти наступним умовам:

1. Рівноважний метал, що додається в систему повинен повністю переходити в метал:

$$\mathbf{V}\mathbf{n}_{\square} = \mathbf{n}_{\square} \quad (15)$$

2. Аналогічно, рівноважний шлак, що додається в систему, повинен повністю переходити в шлак, тобто в метал від попадати не повинен:

$$\mathbf{V}\mathbf{n}_0 = \mathbf{0} \quad (16)$$

3. При додаванні в систему малої кількості будь-якого матеріалу частина його, що переходить в шлак, повинна бути електронейтральною. В системі «метал-шлак» ця вимога призводить до наступного виразу:

$$\mathbf{V}^T \mathbf{n} = \mathbf{n} \quad (17)$$

Отримані вище формули для ДКЗ повністю задовольняють всім трьом умовам.

Відзначимо також, що елементи матриці ДКЗ при переході від елементного складу до фазового складу системи перетворюються як тензор 2-го ранга.

## 2.2 Диференціальні коефіцієнти засвоєння в системі «метал-шлак-газ»

Для системи «метал-шлак-газ» вихідну систему рівнянь (3) доповнимо рівняннями, що виражають тотожність хімічних потенціалів елементів в металі і газі:

$$\begin{cases} \frac{x_{(i)}}{x_{[i]}} = \frac{K_{[i]}\gamma_i}{\psi_i} \exp\left(-\frac{\mu V_i}{RT}\right), i = 1..k \\ \frac{x_{[i]}}{x_{(i)}} = \frac{K_{[i]}\gamma_i}{\lambda_i}, i = 1..k \\ \sum_{i=1}^k x_{(i)} V_i = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Підхід з використанням елементного складу газу  $x_{\{i\}}$ , відповідних констант рівноваги «метал-газ»  $K_{\{i\}}$  і коефіцієнтів активності елементів в газі  $\lambda_i$  розвинений в роботі [10]. Перевагою такого підходу є уніфікація уявлення хімічних потенціалів і активностей елементів в газі і можливість одночасного обчислення парціальних тисків багатьох молекулярних і атомарних газів, складових газу фази.

Методика виведення ДКЗ для трифазної системи принципово не відрізняється від описаної вище процедури виведення ДКЗ для системи «метал-шлак». Тому нижче будуть наведені основні результати, необхідні для практичних розрахунків.

Використовуючи аналогічні перетворення, наведемо систему  $2k+1$  рівнянь (18) до системи трьох рівнянь:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu v_i) [1 + \exp(B_i - Z)]} = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu v_i) [1 + \exp(B_i - Z)]} - \frac{N}{1 + \exp(Y) [1 + \exp(-Z)]} = 0 \\ F_3 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{1 + [1 + \exp(A_i - Y - \mu v_i)] \exp(Z - B_i)} - \frac{N}{1 + \exp(Z) [1 + \exp(-Y)]} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

де  $B_i = \ln\left(\frac{K_{\{i\}} \gamma_i}{\lambda_i}\right)$  – натуральний логарифм консолідованої (ефективної)

константи рівноваги «метал-газ»;

$Z = \ln(N_m / N_g)$  – натуральний логарифм величини, зворотної мольної кратності газу.

Результатом рішення системи (19) є набір величин  $\mu$ ,  $Y$ ,  $Z$ , за якими визначаються рівноважні вмісти елементів во всіх фазах.

Структурна формула для ДКУ в системі «метал-шлак-газ» має наступний вигляд:

$$V_{ij} = \frac{n_{\{i\}}}{n_i} \left( \delta_{ij} + v_i n_{(i)} \frac{\partial \mu}{\partial n_j} + n_{(i)} \frac{\partial Y}{\partial n_j} + n_{(i)} \frac{\partial Z}{\partial n_j} \right) \quad (20)$$

Приватні похідні в (20) розраховуються неявним диференціюванням системи рівнянь (19):

$$\left[ \frac{\partial \mu}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j}, \frac{\partial Z}{\partial n_j} \right] = -\mathbf{J}_1^{-1} \mathbf{J}_2 = - \left[ \frac{\partial(F_1, F_2, F_3)}{\partial(\mu, Y, Z)} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial(F_1, F_2, F_3)}{\partial n_j} \right], \quad (21)$$

де  $\mathbf{J}_1 =$

$$\begin{bmatrix} \sum_{h=1}^k n_{(h)} v_h^2 \left( \frac{n_{(h)}}{n_h} - 1 \right) & \sum_{h=1}^k n_{(h)} v_h \left( \frac{n_{(h)}}{n_h} - 1 \right) & \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{\{h\}} v_h}{n_h} \\ \sum_{h=1}^k n_{(h)} v_h \left( \frac{n_{(h)}}{n_h} - 1 \right) & \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)}^2}{n_h} - \frac{N_s^2}{N} & \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{\{h\}}}{n_h} - \frac{N_s N_g}{N} \\ \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{\{h\}} v_h}{n_h} & \sum_{h=1}^k \frac{n_{(h)} n_{\{h\}}}{n_h} - \frac{N_s N_g}{N} & \sum_{h=1}^k \frac{n_{\{h\}}^2}{n_h} - \frac{N_g^2}{N} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} \frac{n_{(j)} v_j}{n_j} \\ \frac{n_{(j)}}{n_j} - \frac{N_s}{N} \\ \frac{n_{\{j\}}}{n_j} - \frac{N_g}{N} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Через громіздкість виразів не треба приводити приватні похідні  $\frac{\partial \mu}{\partial n_j}, \frac{\partial Y}{\partial n_j}, \frac{\partial Z}{\partial n_j}$  до явного вигляду. Для практичної мети достатньо розрахувати

$\mathbf{J}_1$  і  $\mathbf{J}_2$ , а далі використовувати численні методи матричної алгебри.

Порівнюючи рівняння (8), (20) і (5), (19) попарно, не можна не відмітити суворе виконання *принципу відповідності*. Тобто при відсутності газової фази формули (19) і (20) для системи «метал-шлак-газ» переходять в формули (5) і (8), дійсні для двофазної рівноваги «метал-шлак».

В наступних розрахунках буде фігурувати матриця масових ДКУ  $\mathbf{U}$ , елементи якої розраховуються із мольної матриці  $\mathbf{V}$  з формулою:

$$U_{ij} = V_{ij} \frac{M_i}{M_j}, \quad (24)$$

де  $M_i, M_j$  – атомні маси елементів  $i$  і  $j$  відповідно.

### 2.3 Диференціальна концентраційна матриця

Матрицю  $\mathbf{W}$  з елементами  $W_{ij} = \partial x_{[i]} / \partial m_j$ , де  $x_{[i]}$  – масова частка елементу  $i$  в металі, визначимо як диференціальну концентраційну матрицю (ДКМ).

Використовуючи правило диференціювання складної функції  $x_{[i]} = \frac{m_{[i]}}{\sum_{j=1}^k m_{[j]}}$ ,

виразимо  $W_{ij}$  через елементи матриці  $\mathbf{U}$ :

$$W_{ij} = \frac{1}{M_m} \left( U_{ij} - x_{[i]} \sum_{h=1}^k U_{hj} \right), \quad (25)$$

де  $M_m$  – маса металу.

Фізичний сенс елементів ДКМ: «на скільки зміниться масова частка елементу  $i$  в металі при додаванні одиниці маси елементу  $j$  в систему».

Множення матриці  $\mathbf{W}$  на вектори рівноважних складів фаз і будь-яких їх лінійних комбінацій має результатом нульовий вектор. Це відображає той факт, що додавання в систему або відбір з системи рівноважних металу, шлаку і газу в будь-якому співвідношенні не впливає на концентрації елементів в металі.

Додавання в систему малої кількості деякого матеріалу  $\mathbf{b}$  вектором елементного складу  $\Delta\mathbf{b}$  призведе до зміни масових часток елементів в металі на величину  $\Delta\mathbf{x}_\Pi = \mathbf{W}\Delta\mathbf{b}$ . Таким чином, за допомогою ДКМ можна класифікувати будь-який матеріал по його впливу на концентрацію елементів в металі в точці поточного стану системи. Наприклад, якщо  $\Delta x_{[S]} < 0$ , то матеріал є десульфуратором, якщо  $\Delta x_{[O]} < 0$ , то розкислювачем тощо.

Знання матриць ДКЗ і ДКМ дозволяє розробляти та/або оперативно підбирати найбільш ефективні склади і оптимальні кількості всіх матеріалів, необхідних для проведення плавки стали.

## 2.4 Застосування ДКЗ і ДКМ для оптимізації шихтових матеріалів

Матриці ДКЗ і ДКМ безпосередньо використовуються для вирішення задачі оптимізації кількості шихтових матеріалів з гарантованим попаданням в заданий склад напівпродукту або готового металу. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум сумарної вартості обраних шихтових матеріалів. Далі під шихтових матеріалів (ШМ) ми будемо мати на увазі широкий клас власне шихтових матеріалів, включаючи феросплави, шлакоутворюючі матеріали, розкислювачі, лігатури, вуглецеві матеріали, а також синтетичні шлаки і флюси, кисень, інертні гази та всі види енергоносіїв, в тому числі природний газ і електроенергію.

Для того, щоб напівпродукт або готовий метал задовольняв заданим обмеженням за хімічним складом, необхідно, щоб виконувалася система  $2k-2$  нерівностей ( $k$  - кількість елементів). У матричному запису вона може бути компактно представлена наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\mathbf{U}^H(\mathbf{P}^H + \mathbf{V}^H\mathbf{X})}{\mathbf{I}^T\mathbf{U}^H(\mathbf{P}^H + \mathbf{V}^H\mathbf{X})} \geq \mathbf{F}^H \\ \frac{\mathbf{U}^B(\mathbf{P}^B + \mathbf{V}^B\mathbf{X})}{\mathbf{I}^T\mathbf{U}^B(\mathbf{P}^B + \mathbf{V}^B\mathbf{X})} \leq \mathbf{F}^B \end{cases} \quad (26)$$

де  $\mathbf{U}^H, \mathbf{U}^B$  – матриці масових диференціальних коефіцієнтів засвоєння (нижня і верхня межа);  
 $\mathbf{P}^H, \mathbf{P}^B$  – вектори фактичного початкового елементного складу відповідних систем до завдання ШМ (нижня і верхня межа), т;  
 $\mathbf{V}^H, \mathbf{V}^B$  – матриці елементного складу всіх доступних ШМ (нижня і верхня межа), масові частки;  
 $\mathbf{X}$  – шуканий вектор оптимальних мас ШМ, т;  
 $\mathbf{F}^H, \mathbf{F}^B$  – вектори складу металу, що регламентується стандартом

(готовий метал) або технологічною інструкцією (напівпродукт), (нижня і верхня межа), масові частки;  
 $\mathbf{I}^T$  – одиничний вектор.

Матриці  $\mathbf{U}^H$ ,  $\mathbf{U}^B$  отримують із (18-24) шляхом термодинамічного розрахунку рівноваги в системах «метал-шлак-газ», які мають поточні склади  $\mathbf{P}^H + \mathbf{V}^H\mathbf{X}$  и  $\mathbf{P}^B + \mathbf{V}^B\mathbf{X}$  відповідно.

Вектори  $\mathbf{V}^H\mathbf{X}$  и  $\mathbf{V}^B\mathbf{X}$  мають сенс надходження в систему хімічних елементів з шихтовими матеріалами  $\mathbf{X}$ .

Елементарними перетвореннями систему нерівностей (26) приведемо до вигляду  $\mathbf{HX} \leq \mathbf{H}_0$ , придатному для її рішення симплекс-методом:

$$\begin{cases} (\mathbf{F}^H\mathbf{I}^T - \mathbf{E})\mathbf{U}^H\mathbf{V}^H\mathbf{X} \leq (\mathbf{E} - \mathbf{F}^H\mathbf{I}^T)\mathbf{U}^H\mathbf{P}^H \\ (\mathbf{E} - \mathbf{F}^B\mathbf{I}^T)\mathbf{U}^B\mathbf{V}^B\mathbf{X} \leq (\mathbf{F}^B\mathbf{I}^T - \mathbf{E})\mathbf{U}^B\mathbf{P}^B \end{cases} \quad (27)$$

В матрицях  $\mathbf{V}^H$  і  $\mathbf{V}^B$  береться відповідно нижній і верхній склад матеріалів за всіма елементами, виключаючи розчинник (як правило, залізо), масова частка якого обчислюється як доповнення до одиниці. Дві нерівності, які відповідні залізу, з системи (27) виключаються.

У деяких випадках (наприклад, при легуванні на злив) замість ДКЗ можна використовувати матрицю ДКМ. При цьому вихідна система нерівностей (26), що забезпечує гарантоване потрапляння в заданий склад, значно спрощується:

$$\begin{cases} \mathbf{S}^H + \mathbf{W}^H\mathbf{V}^H\Delta\mathbf{X} \geq \mathbf{F}^H \\ \mathbf{S}^B + \mathbf{W}^B\mathbf{V}^B\Delta\mathbf{X} \leq \mathbf{F}^B \end{cases} \quad (28)$$

де  $\mathbf{S}^H$ ,  $\mathbf{S}^B$  – вектори поточного елементного складу металу (нижня і верхня межа), масові частки;

$\mathbf{W}^H$ ,  $\mathbf{W}^B$  – диференціальні концентраційні матриці (нижня і верхня межа);

Перетворимо систему нерівностей (28) до вигляду  $\mathbf{HX} \leq \mathbf{H}_0$ :

$$\begin{cases} \mathbf{W}^H\mathbf{V}^H\mathbf{X} \geq \mathbf{F}^H - \mathbf{S}^H - \mathbf{W}^H\mathbf{V}^H\mathbf{X}_0 \\ \mathbf{W}^B\mathbf{V}^B\mathbf{X} \leq \mathbf{F}^B - \mathbf{S}^B - \mathbf{W}^B\mathbf{V}^B\mathbf{X}_0 \end{cases} \quad (29)$$

Отримані нерівності (27, 29) доповнимо системою нерівностей типу  $\mathbf{RX} \leq \mathbf{R}_0$ , що враховують різноманітні технологічні і організаційні обмеження, такі як:

- необхідна і допустима маса напівпродукту або готового металу;
- фактичні кількості наявних в цеху (на складі) ШМ;
- обмеження на склад групи і частку окремих ШМ, наявність обов'язкових ШМ;

- гранично допустиме зниження (підвищення) температури металу при завданні ШМ;
- граничні параметри використовуваних дозаторів (фурм, пальників, електрорегуляторів);
- граничні параметри металургійного агрегату, включаючи його мінімальну і максимальну продуктивність, завантаження, допустиму температуру робочого об'єму;
- тимчасові обмеження;

Повна система нерівностей щодо шуканого вектора шихтових матеріалів  $\mathbf{X}$  матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{X} \leq \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{R}_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Система нерівностей (30) вирішується ітераційно двоїтим симплекс-методом з використанням швидкого алгоритму відкладених обчислень. При цьому мінімізується функціонал загальної вартості ШМ, рівний  $\mathbf{Q}^T \mathbf{X}$ , де  $\mathbf{Q}$  - вектор цін. Ітерації припиняються, коли модуль вектора  $\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0$  виявляється менше деякої малої величини.

Таким чином, викладені теоретичний підхід і розрахункова схема дозволяють ефективно вирішувати завдання оптимального управління і проектування виробництва сталі в практично необмеженому діапазоні вхідних і вихідних параметрів. Відповідні алгоритми для ДСП, установок «піч-ківш» і легування при зливанні реалізовані в комп'ютерній системі контролю і управління плавкою сталі, що працює в реальному масштабі часу.

### **3. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИРОДНИХ І ТЕХНОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ**

У зв'язку із завданням зниження собівартості сталі актуальними є дослідження з легування і модифікування металу природними і техногенними матеріалами.

На сьогодні активно вивчаються і використовуються можливості процесів легування і модифікування сталі природними і техногенними матеріалами - марганцевими рудами різного складу, конвертерним ванадієвим шлаком, барій-стронцієвими модифікаторами, отриманими з комплексних руд, що містять барій і стронцій. Крім того, активно вивчаються і практично випробовується нові процеси легування, зокрема, вторинне електротермічне легування тощо. Доведено, що використання зазначених вище матеріалів і процесів дозволяє поліпшити техніко-економічні показники процесу виробництва сталей і значно підвищити якість кінцевої металопродукції.

#### **3.1 Процеси прямого легування сталі**

Одним із шляхів підвищення ефективності виробництва в чорній металургії є зниження витрати дорогих і дефіцитних феросплавів. Великі можливості в цьому напрямку містяться в технології прямого легування сталі оксидними матеріалами.

З моменту появи технології прямого легування (ПЛ) сталі з оксидних матеріалів пройшло не менше 30 років. За цей час уявлення про технології ПЛ постійно змінювалися і до сих пір залишаються суперечливі. Застосування технології ПЛ на думку авторів [11] призводить до ускладнення сталеплавильного процесу і збільшення його енерго- і трудомісткості, збільшення обсягів сталеплавильних шлаків, збільшення вмісту небажаних домішок і неметалевих включень в сталі, використанню дорогого алюмотермічного відновлення. З іншого боку збільшення обсягу сталеплавильного шлаку нівелюється зменшенням кількості відвальних шлаків феросплавного виробництва [12], дослідні плавки, проведені з

використанням технології ПЛ, ні за макроструктурою, ні за неметалевими включеннями не відрізняються від металу, виплавленого за звичайною технологією з використанням феросплавів [13], відсутня необхідність в додатковому обладнанні цеху, яке могло б ускладнити технологічний процес, а використання вторинного алюмінію замість первинного значно знижує витрати. Для зниження енерговитрат при ПЛ пропонується використання легкоплавких сумішей на основі оксидних матеріалів [14].

До теперішнього часу накопичений великий досвід реалізації технології прямого легування сталі марганцем на металургійних підприємствах Росії, України і Казахстану. В результаті застосування цих технологій скорочені наскрізні втрати марганцю в металургійному виробництві, а також практично усунуті втрати розкислювачів (Al, Si тощо), заощаджені енергетичні ресурси і знижена собівартість сталі, а її якість покращено.

Технологія ПЛ розроблена і реалізована в промислових агрегатах: кисневих конвертерах місткістю 10, 160, 250 і 350 т, дугових печах місткістю 12, 100, 125 і 200 т і сталерозливних ківшах місткістю 10, 100, 160 і 350 т.

У промислових умовах в технології ПЛ були випробувані стандартні марганцеві агломерати АМН-1, АМН-2, АМН-3 виробництва Богданівської аглофабрики Орджонікідзевського ГЗК (Україна), малофосфористий марганцевий шлак (МФШ) виробництва Нікопольського феросплавного заводу (Україна), шлак виробництва низьковуглецевого феромарганцю, марганцева руда родовища Ушкатин III (Казахстан). Крім того, спільно з Механобрчерметом (м. Кривий Ріг) спеціально для технології ПЛ були розроблені, вироблені і промислово освоєні марганцевий агломерат з високофосфористої карбонатної руди (ТУ 14-9-372-90), а також марганцевий агломерат з неї з відновником, в якості якого був використаний стандартний феросиліцій.

Проведені дослідження показують, що при використанні стандартних технологій виробництва марганцевих сплавів, розкислення і легування ними, наскрізне вилучення марганцю не перевищує 50%. Результати термодинамічних розрахунків, підтверджених лабораторними і промисловими експериментами, показали, що при різних варіантах реалізації процесу ПЛ ступінь вилучення марганцю досягає 75-97%.

Результати досліджень свідчать про те, що розроблені варіанти технології ПЛ сталі марганцем забезпечують економію і феромарганцю, і розкислювачів (алюмінію, кремнію) при одночасному поліпшенні умов десульфурації сталі (див. Патенти РФ № 2212452, 2212453, 2222607, 2279484, 2231559, 2228367, 2228366, 2304623, 2278169, а також пат. України № 81680, пат. Індії № 226221, пат. Кореї № 802639, пат. Казахстану № 49061) [13,15].

Одним з нових напрямків в методах прямого легування сталі марганцем стала розробка технології виробництва марок сталі, в яких через обмеження по кремнію і вуглецю, в якості легуючої марганцевмісної добавки використовують металевий марганець. Для заміни дорогого металевого марганцю був запропонований більш дешевий матеріал - агломерат з

карбонатної марганцевої руди [16]. Легування сталі здійснювали в процесі випуску металу в сталерозливний ківш. Після наповнення ківшу частиною металу подавали марганцевий агломерат і алюміній. Весь процес відновлення марганцю закінчувався до закінчення випуску металу. При цьому отримували вилучення марганцю 90-95%, при такому ж засвоєнні алюмінію. Вміст марганцю в готовому металі знаходився в межах від 0,5 до 1,5%. У сталеплавильних агрегатах здійснювали легування описаним способом з вмістом марганцю до 5%.

Широке використання карбонатних марганцевих руд стримується підвищеним вмістом фосфору. Але, як було встановлено, використання представлених руд не погіршує якості сталі, оскільки наскрізний витяг марганцю від концентрату до готової сталі на 35-50% перевищує наскрізний витяг марганцю при легуванні стандартними марганцевими феросплавами. Відповідно, на 35-50% знижується перехід фосфору на одиницю введеного марганцю в готову сталь.

При прямому легуванні металу в сталеплавильному агрегаті можливо отримання легованої марганцем сталі із вмістом марганцю до 13-15% і більше. Концентрація фосфору в сталі буде на 10-30% менше ніж при легуванні стандартними марганцевими феросплавами.

При практично будь-якому співвідношенні цін на шихтові матеріали, які використовуються при виплавці та обробці сталі в металургії, ефективність прямого легування сталі марганцем з використанням агломерату з карбонатної марганцевої руди завжди буде вище будь-якого іншого способу легування.

За даними роботи [17] розрахунки економічної ефективності технології обробки сталі в ківші сумішами на основі природного і техногенного марганцевмісної сировини показують, що витрата електроенергії скорочується на 5,2%. Надається можливість значно скоротити витрату дефіцитної сировини: концентрату - на 61,3%, залізної стружки - на 60%, кварциту - на 52%, коксика - на 74,3%.

Одним з перспективних способів отримання легуючих елементів з оксидних матеріалів є рідкофазне відновлення металів. Воно досить ефективно реалізується при дуговій плавці.

Одним з напрямків рідкофазного відновлення металів є пряме легування чавуну і сталі з оксидних розплавів.

Автори деяких досліджень [18] вважають, що легування оксидними матеріалами необхідно здійснювати не з оксидів руд або концентратів, а з легкоплавких сумішей евтектичного типу з температурою ліквідусу нижче температури рідкої сталі на випуску з печі, які містять оксиди. Склад легуючих сумішей повинен бути таким, щоб шлак, який утворюється, відповідав складу рафінувальному шлаку при виплавці сталі.

В роботі [19] проведені дослідження прямого легування сталі і чавуну з розплавів різних оксидних матеріалів. У табл. 3.1 наведено шихтові матеріали і хімічний склад виплавлених сплавів.

З даних таблиці видно, що при виплавці чавуну і сталі для їх легування використовували гальваношлами різних гальванічних ванн, відпрацьовані каталізатори, металургійний шлак і шлам, а також руду.

В якості сумішей для прямого легування сталі і чавуну з оксидних розплавів застосовували огрудковану суміш, що включає оксидні матеріали, відновник і вапно в певних співвідношеннях. Це дозволило отримати сплави з різним вмістом легуючих елементів хрому, нікелю, ванадію та ін.

Встановлено, що при прямому легуванні чавуну і сталі з оксидних розплавів ступінь відновлення нікелю, хрому і ванадію знаходиться в межах 100, 96 і 61-65% відповідно.

Таблиця 3.1 – Вид шихти і хімічний склад виплавлених сплавів

Сплав / Вид шихти	Вміст елементів, % ваг.								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Cu	S	P
Сталь, гальваношлам	1,5	1,6	0,5	5,0	4,7	-	0,8	-	1,2
Чавун, гальваношлам	2,16	0,87	0,2	-	7,8	-	0,3	2,0	1,6
Сталь, відпрацьовані нікелеві каталізатори	3,91	4,2	0,30	-	4,01	-	-	-	-
Чавун, металургійний шлак, гальваношлам	3,81	0,50	0,38	1,42	2,01	-	-	0,19	0,30
Чавун, відвальний електросталеплавильний шлак	4,48	0,61	1,11	7,06	-	-	-	0,01	0,036
Чавун, шлам феросплавних печей	3,79	1,71	0,41	0,36	0,56	-	-	0,17	0,08
Чавун, хромиста руда	2,85	0,83	0,08	4,38	-	-	-	0,19	0,08
Чавун, нікелева руда	2,89	1,54	0,04	0,88	0,59	-	-	0,12	0,08
Чавун, відпрацьовані ванадієві каталізатори	2,93	0,61	0,33	-	-	3,0	-	0,02	-

Таким чином, ефективність технології прямого легування ливарних сплавів з оксидних розплавів не викликає ніяких сумнівів. Для її реалізації необхідно розробити ряд організаційних заходів, які забезпечать широке впровадження розробленої технології на підприємствах машинобудівного комплексу України.

## Практична робота №1 «Оптимізація технології прямого легування конструкційної низьколегованої сталі 12ГС марганецьвмісними оксидними матеріалами»

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89):

C 0,09–0,15%; Mn 0,8–1,2%; Si 0,5–0,8%; S до 0,040%; P до 0,035%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; C 0,06%; Mn 0,05%; S 0,035%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати технологію прямого легування конструкційної низьколегованої сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89) оксидними марганецьвмісними матеріалами за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
  - дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, концентрат марганцевий Кон 1 Mn (50,85% MnO), концентрат марганцевий Кон 2 Mn (47,79% MnO), АВ-87, коксик, карбід Si, вапно, ел/енергія;
  - температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
  - початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.
- а) + мінімальна кінцева температура 1600 + номер варіанта, °С;  
б) + відсутність електроенергії;  
в) + відсутність карбіду Si;  
г) + відсутність FeMn;  
д) + відсутність SiMn;  
е) + основність шлаку не менше 2;  
ж) + максимальна маса шлаку не більше 5т;

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;  
б) кінцева температура, °С;  
в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;  
г) основність шлаку;  
д) склад металу в мас. %;  
е) склад шлаку в мас. % оксидів;  
ж) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект ПТЛС.fwp та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

Елементний склад шлаку – вкл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

**Звіт з практичної роботи №1 за курсом ПТЛС, варіант \_\_\_\_\_**

студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn				–	–	–	–
SiMn					–	–	–
FeSi65							
Конц 1 Mn							
Конц 2 Mn							
AB-87							
Коксик							
Карбід Si			–	–	–	–	–
Вапно							
Е/е МВт*год		–	–	–	–	–	–
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, мас. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, мас. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
<b>Температура, °С</b>							

## Практична робота №2 «Оптимізація технології прямого легування напівспокійної сталі 3пс марганецьвмісними оксидними матеріалами»

### 1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 3пс (ГОСТ 380-2005):

С 0,14–0,22%; Mn 0,45–0,65%; Si 0,04–0,14%; S до 0,050%; P до 0,040%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; С 0,05%; Mn 0,05%; S 0,040%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати технологію прямого легування напівспокійної сталі 3пс (ГОСТ 380-2005) оксидними марганецьвмісними матеріалами за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, концентрат марганцевий Кон 1 Mn (50,85% MnO), концентрат марганцевий Кон 2 Mn (47,79% MnO), АВ-87, коксик, карбід Si, вапно, ел/енергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.

а) + мінімальна кінцева температура 1600 + номер варіанта, °С;

б) + відсутність електроенергії;

в) + відсутність карбіду Si;

г) + відсутність FeMn;

д) + відсутність SiMn;

е) + основність шлаку не менше 2;

ж) + максимальна маса шлаку не більше 3,7т, максимальна кінцева температура 1610 + номер варіанта, °С; дозволити електроенергію.

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;

б) кінцева температура, °С;

в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;

г) основність шлаку;

д) склад металу в мас. %;

е) склад шлаку в мас. % оксидів;

ж) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект ПТЛС.fwr та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

Елементний склад шлаку – викл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

**Звіт з практичної роботи №2 за курсом ПТЛС, варіант \_\_\_\_\_**

студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn				–	–	–	–
SiMn					–	–	–
FeSi65							
Конц 1 Mn							
Конц 2 Mn							
АВ-87							
Коксик							
Карбід Si			–	–	–	–	–
Вапно							
Е/е МВт*год		–	–	–	–	–	–
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, мас. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, мас. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Температура, °С							

### Практична робота №3 «Оптимізація технології прямого легування киплячої конструкційної сталі 08кп марганецьвмісними оксидними матеріалами»

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 08кп (ГОСТ 1050-88):

C 0,05–0,11%; Mn 0,3–0,5%; Si до 0,03%; S до 0,040%; P до 0,035%;

Вихідний метал: маса 230–255 т; C 0,05%; Si 0,01%; Mn 0,05%; S 0,035%; P 0,005%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 3,5–4,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати технологію прямого легування киплячої конструкційної сталі 08кп (ГОСТ 1050-88) оксидними марганецьвмісними матеріалами за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- кінцевий вміст кисню в ковшовій пробі 0,04-0,065%;
- маса газу, що утворюється до 0,4 т;
- дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, концентрат марганцевий Кон 1 Mn (50,85% MnO), концентрат марганцевий Кон 2 Mn (47,79% MnO), АВ-87, коксик, карбід Si, вапно, ел/енергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.

а) + мінімальна кінцева температура 1600 + номер варіанта, °С;

б) + відсутність електроенергії;

в) + відсутність FeMn;

г) + відсутність карбіду Si;

д) + основність шлаку не менше 2;

е) + відсутність SiMn;

ж) + максимальна маса шлаку не більше 6 т, максимальна кінцева температура 1610 + номер варіанта, °С; дозволити електроенергію.

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;

б) кінцева температура, °С;

в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;

г) склад металу в мас. %; основність і склад шлаку в мас. % оксидів;

д) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект ПТЛС.fwp та перевірити Опції: Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.; Елементний склад шлаку – вкл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

**Звіт з практичної роботи №3 за курсом ПТЛС, варіант \_\_\_\_\_**  
**студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)**

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn			–	–	–	–	–
SiMn						–	–
FeSi65							
Конц 1 Mn							
Конц 2 Mn							
AB-87							
Коксик							
Карбід Si				–	–	–	–
Вапно							
Е/е МВт*год		–	–	–	–	–	
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, мас. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, мас. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
<b>Температура, °С</b>							

## Практична робота №4 «Оптимізація технології прямого легування низьколегованої сталі 30ГСЛ для відливок марганецьвмісними оксидними матеріалами»

### 1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 30ГСЛ (ГОСТ 977-88):

C 0,25–0,35%; Mn 1,1–1,4%; Si 0,6–0,8%; S до 0,040%; P до 0,040%;

Вихідний метал: маса 147–151 т; C 0,1%; Mn 0,05%; S 0,038%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 20%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 50%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати технологію прямого легування низьколегованої сталі 30ГСЛ для відливок (ГОСТ 977-88) оксидними марганецьвмісними матеріалами за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, концентрат марганцевий Кон 1 Mn (50,85% MnO), концентрат марганцевий Кон 2 Mn (47,79% MnO), АВ-87, коксик, карбід Si, вапно, ел/енергія (до 3 МВт\*год);
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.

а) + мінімальна кінцева температура 1600 + номер варіанта, °С;

б) + відсутність FeMn;

в) + відсутність FeSi65;

г) + відсутність SiMn;

д) + основність шлаку не менше 2;

е) + відсутність електроенергії;

ж) + максимальна маса шлаку не більше 5,7 т; дозволити електроенергію.

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;

б) кінцева температура, °С;

в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;

г) склад металу в мас. %; основність і склад шлаку в ваг. % оксидів;

д) наскрізний витяг марганцю з концентрату, мас. %:  $([\text{Mn}] * M_{\text{м}} - [\text{Mn}]_0 * M_{\text{м0}}) / ([\text{Mn}]_{\text{кон}} * M_{\text{кон}}) * 100\%$ ;  $[\text{Mn}]_0$ ,  $M_{\text{м0}}$  – із завдання на плавку;  $[\text{Mn}]_{\text{кон}}$  – із властивостей матеріалів;  $M_{\text{кон}}$  – оптимальна маса концентрату, т;  $M_{\text{м}}$  – середня маса металу, т;

е) загальна вартість розкислення-легування в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект ПТЛС.fwr та перевірити Опції: Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.; Елементний склад шлаку – викл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

**Звіт з практичної роботи №4, варіант \_\_\_\_\_**

студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)

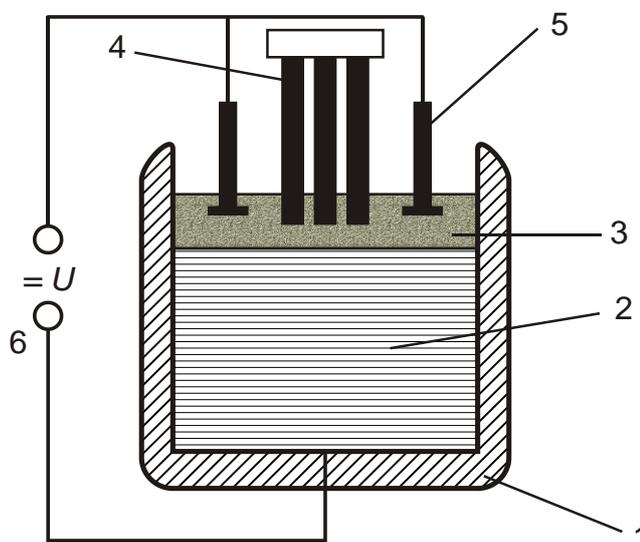
Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn		–	–	–	–	–	–
SiMn				–	–	–	–
FeSi65			–	–	–	–	–
Конц 1 Mn							
Конц 2 Mn							
АВ-87							
Коксик							
Карбід Si							
Вапно							
Е/е МВт*год						–	
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, мас. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Витяг Mn, %	–		–				
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, мас. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
<b>Температура, °С</b>							

#### 4. ВТОРИННЕ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНЕ ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Вторинне електротермічне легування і рафінування (ВЕЛР) - порівняно новий метод, що знаходиться в стадії досліджень і розробки.

Аналіз теоретичних принципів і технологічної схеми ВЕЛР в установках ківш-піч, виконаний в роботі [20], показав перспективність даного нового методу позапічної обробки, спрямованого на економію феросплавів і додаткове рафінування розплаву від сірки і кисню.

Схема найпростішої установки ВЕЛР приведена на рис. 4.1 [21]. Спосіб ВЕЛР включає нагрів рідкої сталі в установці піч-ківш 1. Розплав, що піддається обробці 2, знаходиться під шаром рівноважного шлаку 3. Температура розплаву підтримується електродами змінного струму для підігріву 4. На графітовані електроди 5, що розташовані в шлаку, подається постійна напруга заданої величини від джерела живлення 6. При цьому система «метал-шлак» починає працювати як електролітичний конденсатор. Компоненти системи «метал-шлак-газ» перерозподіляються між двома рідкими та газовою фазами залежно від полярності напруги, що подається на електроди. Метал в печі-ківші постійно перемішується шляхом продувки інертним газом.



1 – кожух установки піч-ківш; 2 – розплав металу; 3 – рідкий шлак;  
4 – електроди підігріву; 5 – електроди ВЕЛР; 6 – джерело постійної напруги

Рисунок 4.1 – Принципова схема ВЕЛР

Підвищення вмісту в металі елементів з позитивною валентністю (*Si*, *Mn*, *Al*, *Cr*) відбувається за рахунок їх переходу зі шлаку.

Надання шлаку негативного заряду дозволяє провести окислювальне рафінування, яке супроводжується переходом катіонів кисню в метал і зустрічним переходом аніонів, в тому числі фосфору, в шлак. При такому негативному процесі спостерігається збільшення маси шлаку за рахунок окислення заліза та інших домішок.

Встановлено, що в процесі ВЕЛР збільшення як позитивного, так і негативного питомого заряду шлаку за абсолютною величиною призводить до утворення газової фази, обсяг виділення якої залежить від зовнішнього тиску. При атмосферному тиску в позитивному процесі значна частина кальцію йде в газову фазу, що не дозволяє отримати його вміст в сталі понад 0,04%. Підвищенням тиску газової фази до 200 кПа в процесі позапічної обробки при питомому заряді шлаку  $\geq 1,0$  F/моль можна довести вміст в металі кальцію до 0,30-0,35%. Таким чином, на відміну від традиційних способів введення в сталь лужноземельних металів у виде порошкового дроту, технологія дозволяє використовувати кальцій и магній, що містяться в шлаку.

Як в позитивному, так і в негативному процесі можна досягти суттєвого зниження вмісту сірки. У позитивному процесі спостерігається перехід катіонів кисню і сірки в шлак в результаті зсуву рівноваги в підсистемі метал-шлак. У негативному процесі зниження вмісту сірки можливо за рахунок збільшення маси шлаку і його сульфідної ємності. Однак після негативного процесу слід видаляти насичений домішками шлак і далі проводити позитивний процес з новим шлаком для видалення з металу надлишкового кисню.

При проведенні практичного випробування способу ВЕЛР як об'єкт дослідження була обрана розкислення рідка сталь марок 09Г2С, 12ГС і 30ГС при температурі 1600 °С, покрита шаром рівноважного шлаку. У складі пічного шлаку містилося 20% FeO, 20% SiO<sub>2</sub>, 10% MnO, 45% CaO, 3% MgO, 1,5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,3% S і 0,2% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Такий склад шлаку є типовим для шлаку закінчення конвертерної плавки. Крім того, додатково до низьколегованих сталей, досліджували вуглецевий напівпродукт складу: 0,05% С, 0,001% Si, 0,12% Mn, 0,035% S, 0,015% P. Такий же напівпродукт використовували для отримання низьколегованих сталей [22].

У табл. 4.1 наведені основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях, в тому числі питомий заряд шлаку, оптимальні параметри шлаку і металу і отриманий результат.

Таблиця 4.1 - Основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях

Технологічна операція	Питомий заряд шлаку, F/моль	Оптимальні параметри <sup>*)</sup> шлаку і металу	Результат, що досягається
Розкислення	0,4...0,5	$\leq 20\%$ (FeO)	$\leq 0,003\%$ [O]
Окислювальне рафінування, зневуглицювання	-4,5...-2,0	$\geq 0,1\%$ [C]	$\leq 0,03\%$ [C] $\leq 0,005\%$ [Si]
Десульфуратія	0,6...0,8	$\leq 20\%$ (FeO), $\leq 0,3\%$ (S)	$\leq 0,003\%$ [S]
Дефосфортація	-2,0...-1,5	$\leq 0,2\%$ (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), $\leq 0,1\%$ [Si]	$\leq 0,005\%$ [P]
Легування Mn, Si, Cr, Al	0,5...0,8	$\leq 20\%$ (FeO), $\geq 10\%$ (MnO), (SiO <sub>2</sub> ), (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), $\geq 5\%$ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$\Delta[\text{Mn}] = 0,15...0,30\%$ $\Delta[\text{Si}] = 0,10...0,50\%$ $\Delta[\text{Cr}] = 0,15...0,30\%$ $\Delta[\text{Al}] = 0,01...0,10\%$
Мікролегування Ca, Mg	0,8...1,2	$\leq 20\%$ (FeO), $\geq 20\%$ (CaO), $\geq 5\%$ (MgO),	0,035...0,35% [Ca] 0,020...0,030% [Mg]

\*) Оптимальні параметри шлаку і металу потребують коригування стосовно інших марок сталі.

Використання методу ВЕЛР при обробці низьколегованої сталі в модернізованих установках піч-ківш дозволяє отримати наступні основні переваги:

- економія феросплавів, синтетичних шлаків и порошкоподібних модифікаторів;
- підвищення ступеню засвоєння високоактивних легуючих добавок;
- можливість утилізації рядових шлаків мартенівського, конвертерного и доменного виробництва;
- можливість проведення зневуглицювання, десульфуратії и дефосфортації з досягненням залишкового вмісту в металі  $\leq 0,003\%$  [S],  $\leq 0,005\%$  [P],  $\leq 0,03\%$  [C] та розкислення з остаточним вмістом  $\leq 0,003\%$  [O] без введення реагентів, що підвищують в металі кількість неметалевих включень;
- зменшення газовиділення и пилоутворення в порівнянні з існуючими методами легування і розкислення сталі [23].

**Практична робота №5 за курсом ПТЛС**  
**«Оптимізація технології вторинного електротермічного легування і рафінування конструкційної низьколегованої сталі 12ГС»**

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89):

C 0,09–0,15%; Mn 0,8–1,2%; Si 0,5–0,8%; S до 0,040%; P до 0,035%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; C 0,06%; Mn 0,05%; S 0,035%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати технологію вторинного електротермічного легування і рафінування конструкційної низьколегованої сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89) за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- маса кінцевого шлаку не менше 1 т;
- дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, карбід Si, вапно, ел/енергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С;
- мінімальна кінцева температура 1600 + номер варіанта, °С.

а) – ж) + заряд шлаку (в кілофарадах), 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60.

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;

б) кінцева температура, °С;

в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;

г) склад металу в мас. %; основність і склад шлаку в мас. % оксидів;

д) питомий заряд шлаку  $q$ , F/моль;

е) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Побудувати графіки залежності наступних величин від питомого заряду шлаку  $q$ :

- оптимальної кількості вживаних феросплавів;
- оптимальної кількості електроенергії;
- загальної вартості легування ;
- вмісту сірки в сталі.

5. На початку виконання роботи завантажити проект ПТЛС.fwp та перевірити Опції: Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл. Елементний склад шлаку – вкл.

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

**Звіт з практичної роботи №5 за курсом ПТЛС, варіант \_\_\_\_\_**

студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)

Матеріали	Заряд шлаку, кF						
	0	10	20	30	40	50	60
FeMn							
SiMn							
FeSi65							
Карбід Si							
Вапно							
Е/е МВт*год							
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, мас. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
[Ca]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, мас. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Питомий заряд шлаку $q$ , F/моль							
Основність шлаку							
<b>Температура, °C</b>							

**Практична робота №6 за курсом ПТЛС**  
**«Оптимізація технології вторинного електротермічного легування і рафінування конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С»**

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 09Г2С (ГОСТ 19281-89):

С до 0,12%; Mn 1,3–1,7%; Si 0,5–0,8%; S до 0,040%; P до 0,035%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; С 0,05%; Mn 0,12%; S 0,035%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати технологію вторинного електротермічного легування і рафінування конструкційної низьколегованої сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89) за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- маса кінцевого шлаку не менше 1 т;
- дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, карбід Si, вапно, ел/енергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С;
- мінімальна кінцева температура 1600 + номер варіанта, °С.

а) – ж) + заряд шлаку (в кілофарадах), 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60.

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;
- б) кінцева температура, °С;
- в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- г) склад металу в мас. %; основність і склад шлаку в мас. % оксидів;
- д) питомий заряд шлаку  $q$ , F/моль;
- е) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Побудувати графіки залежності наступних величин від питомого заряду шлаку  $q$ :

- оптимальної кількості вживаних феросплавів;
- оптимальної кількості електроенергії;
- загальної вартості легування ;
- вмісту сірки в сталі.

5. На початку виконання роботи завантажити проект ПТЛС.fwp та перевірити Опції: Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл. Елементний склад шлаку – вкл.

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

**Звіт з практичної роботи №6 за курсом ПТЛС, варіант \_\_\_\_\_**

студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)

Матеріали	Заряд шлаку, кF						
	0	10	20	30	40	50	60
FeMn							
SiMn							
FeSi65							
Карбід Si							
Вапно							
E/e MВт*год							
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, мас. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
[Ca]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, мас. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Питомий заряд шлаку <i>q</i> , F/моль							
Основність шлаку							
<b>Температура, °C</b>							

**Практична робота №7 за курсом ПТЛС**  
**«Оптимізація технології вторинного електротермічного легування і рафінування високоміцної низьколегованої сталі 35ХГСА»**

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 35ХГСА (ГОСТ 4543-71):

C 0,32-0,39%; Mn 0,8–1,1%; Si 1,1–1,4%; Cr 1,1-1,4%; S до 0,025%; P до 0,025%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; C 0,15%; Mn 0,12%; S 0,025%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 2 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати технологію вторинного електротермічного легування і рафінування високоміцної низьколегованої сталі 35ХГСА (ГОСТ 4543-71) за наступних умов:

- середній тиск 200 кПа (2 атм);
- маса кінцевого шлаку не менше 1 т;
- дозволені: FeMn, FeSi65, ФХ800Б, карбід Si, вапно, ел/енергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С;
- мінімальна кінцева температура 1600 + номер варіанта, °С.

а) – ж) + заряд шлаку (в кілофарадах) 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90.

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;
- б) кінцева температура, °С;
- в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- г) склад металу в мас. %; основність і склад шлаку в мас. % оксидів;
- д) питомий заряд шлаку  $q$ , F/моль;
- е) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Побудувати графіки залежності наступних величин від питомого заряду шлаку  $q$ :

- оптимальної кількості вживаних феросплавів;
- оптимальної кількості електроенергії;
- загальної вартості легування ;
- вмісту сірки, кальцію і магнію в сталі.

5. На початку виконання роботи завантажити проект ПТЛС.fwr та перевірити Опції: Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл. Елементний склад шлаку – викл.

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

**Звіт з практичної роботи №7 за курсом ПТЛС, варіант \_\_\_\_\_**  
**студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)**

Матеріали	Заряд шлаку, кF						
	30	40	50	60	70	80	90
FeMn							
FeSi65							
ФХ800Б							
Карбід Si							
Вапно							
Е/е МВт*год							
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, мас. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
[Ca]							
[Mg]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, мас. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Питомий заряд шлаку <i>q</i> , F/моль							
Основність шлаку							
<b>Температура, °C</b>							

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали : учебник для вузов. Москва, 1999. 408 с.
2. Краткая история легирования стали и ферросплавного производства [Электронный ресурс] / ООО НПТК «Объединенная сырьевая компания». URL: <https://www.urm-company.ru/> <https://www.urm-company.ru/upload/iblock/55d/55d37dd1eba407afd28de86efd312fd6.pdf> (дата звернення: 04.03.2020).
3. Металознавство : підручник для вузів / Бялік О. М. та ін. Київ : Політехніка, 2018. 384 с.
4. Шатохин И. М., Зиатдинов М. Х., Кутищев А. В., Бессмертных А. В. Перспективы получения легирующих материалов нового поколения методом СВС. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2005. № 3(11). С. 16-23.
5. Гуляев А. П. Металловедение : учебник для вузов. Москва : Металлургия, 1986. 544 с.
6. Мальцева Л. А., Гервасьев М. А., Кутьин А. Б. Материаловедение: учебное пособие. Екатеринбург, 2007. 339 с.
7. Разработка информационно–технологической системы «Форвард» для управления металлургическими процессами в реальном масштабе времени / А. В. Харченко и др. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991. № 12. С. 89-91.
8. Храпко С. А., Иноземцева Е. Н., Харченко А. В. Термодинамическая модель системы «металл-шлак-газ» и интегрированная система «Оракул»: использование для прогнозных расчетов и управления в составе АСУТП и разработки сталеплавильных процессов. *Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии* : зб. материалов Всесоюзной конф. Новокузнецк. 1991. С. 222-223.
9. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 10. С. 131-137.
10. Пономаренко А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему. *Журнал физической химии*. 1974. Т.48, № 7. С. 1668-1674; № 8. С. 1950-1958.
11. Гасик М. И., Лякишев Н. П., Величко Б. Ф. и др. Прямое легирование стали в условиях минерально-сырьевой и энергетической базы чёрной металлургии СНГ. *Сталь*. 1995. № 12. С. 18–24.
12. Наконечный А. Я., Урцев В. Н., Синяков Р. В. Хабибулин Д. М., Кудрин В. А., Шмаков А. В. Прямое легирование стали марганцем – один из эффективных элементов организации комплексных ресурсосберегающих технологий. *Сталь*. 2009. № 11. С. 17-22.

13. Легирование и модифицирование стали с использованием природных и техногенных материалов / Нохрина О. И. и др. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 320 с.
14. Бобкова О. С., Барсегян В. В. Перспективы развития технологий прямого легирования стали из оксидных расплавов. *Металлург.* 2006. № 9. С. 43-46
15. Толымбеков М. Ж., Ахметов А. Б., Такенов Т.Д. Опробование технологии прямого легирования стали марганцеворудными материалами. *Сталь.* 2004. №1. С. 22-24.
16. Наконечный А. Я., Урцев В. Н., Афонин С. З. и др. Замена металлического марганца агломератом из карбонатной руды. Труды X конгресса сталеплавильщиков. – Москва : ОАО Черметинформация. 2009. С. 97-99.
17. Нохрина О. И. Ресурсосберегающая технология легирования стали марганцем в ковше. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2003. № 12. С. 23-25.
18. Мазуров Е. Ф., Бобкова О. С., Барсегян В. В. Использование рудных и шлаковых материалов для легирования электростали марганцем и хромом в 100-т ковшах с основной футеровкой. *Сталь.* 1994. № 1. С. 23-25.
19. Найдек В. Л., Костяков В. Н., Шинский О. И. и др. Особенности технологии прямого легирования сплавов из оксидных расплавов. *Процессы литья.* 2009. №4. С. 3-6.
20. Харченко А. В., Личконенко Н. В., Горайнова Н. В. Вторичное легирование и рафинирование стали в установках печь–ковш. *Сб. научных праць ЗДІА. Металургія.* 2012. Вип 1(26). С. 17-21.
21. Спосіб позапічної обробки сталі : пат. 132087 Україна : МПК С21С7/06 u201809172; заявл. 06.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.
22. Харченко А. В., Лаптев Д. А., Лупол Д. А., Башлий С. В. Экспериментальные исследования технологии ВЭЛР. Сб. научных праць. *Металургія.*
23. Харченко А. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Вторичное электротермическое легирование и рафинирование низколегированной стали. *Металл и литье Украины.* 2019. № 10-12. С. 56-63.

## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Величко О. Г., Бойченко Б. М., Стоянов О. М. Технології підвищення якості сталі : навч. посіб. Дніпропетровськ, 2009. 212 с.
2. Зборщик О. М. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу : навч. посіб. Донецьк : ДонНТУ, 2001. 154 с.
3. Ковальов Г. М. Позапічна обробка чорних металів : навч. посіб. Донецьк : ДонГТУ, 1997. 213 с.
4. Казачков И. П. Легирование стали. Київ : Техніка, 1982. 120 с.
5. Раскисление и легирование стали экзотермическими ферросплавами / Баптизманский В. И. и др. Київ: Техніка, 1970. 180 с.
6. Нохрина О. И., Козырев Н. А., Рожихина И. Д. Высокие технологии в металлургии : монография. Новокузнецк, 2011. 344 с.
7. Голубцов В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи : монография. Челябинск, 2006. 423 с.
8. Рашев Ц. В. Производство легированной стали. Москва : Металлургия, 1981. 248 с.
9. Ицкович Г. М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. Москва : Металлургия, 1981. 296 с.
10. Внепечные способы улучшения качества стали / Чуйко Н. М. и др. Киев : Техніка, 1978. 128 с.
11. Поволоцкий Д. Я. Физико-химические основы процессов производства стали : компьютерная версия учебного пособия для вузов. Челябинск : ЮУрГУ, 2007. 183 с.
12. Вихлевщук В. А., Харахулах В. С., Бродский С. С. Ковшевая доводка стали : монография. Днепропетровск, 2000. 190 с.
13. Гольдштейн Я. Е., Мизин В. Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. Москва, 1986. 272 с.
14. Возможности и перспективы использования программы «Excalibur» в учебном процессе / А. В. Харченко и др. *Сб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2013. Вип 1(29). С. 169-175.
15. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. Москва : Металлургия, 1992. 336 с.

Навчально-методичне видання  
(українською мовою)

Харченко Олександр Вікторович  
Лічконенко Наталія Володимирівна

## **ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ**

Методичні вказівки до практичних занять  
для здобувачів ступеня вищої освіти магістра  
спеціальності 136 «Металургія»  
освітньо-професійної програми «Металургія чорних металів»

Рецензент *О.Г. Кириченко*  
Відповідальний за випуск *Ю.Ф. Терновий*  
Коректор *Н.В. Лічконенко*