

середньому тривалість процесу повного розморожування руди становила від 4 до 6 годин залежно від товщини, температури змерзлого конгломерату та інших його характеристик.

Відмічено, що після припинення подачі палива на теплогенератор і вимикання всієї системи розморожування продовжувався потік тепла всередину вагонів від відтанутих пристінних шарів вищої температури теплопровідністю до внутрішніх замерзлих більш холодних шарів вантажів, що дає можливість подальшого вдосконалення режиму нагрівання за рахунок періодичного включення теплопостачання.

Температура на зовнішній поверхні бічних стін вагонів і на колісних парах за весь процес обігріву вагонів у гаражі-розморожувачі не досягала граничних значень: 90 °С для стін вагонів і 65 °С для підшипників ковзання, що забезпечувало цілісність рухомого складу.

Система опалення на основі загального контуру випромінюючих труб конструкції Інституту газу НАНУ може бути використана для обігріву різних поверхонь, окремих ділянок, робочих місць і може бути адаптована до відповідних технологічних умов виробництва. Вона економічна, оскільки передбачає мінімальні капітальні та експлуатаційні витрати, має ресурс економії палива за рахунок рециркуляції теплоносія та періодичного включення теплогенератора, може використовувати різні види пального.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-36>

## TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF DEEP OXIDATION OF ALUMINUM STEEL

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ГЛИБОКОГО РОЗКИСЛЕННЯ СТАЛІ АЛЮМІНІЄМ

**Fedorov R.F.,**

*Student (group 136-22-1a),  
LLC "Technical university  
"Metinvest polytechnic",  
Zaporizhzhia, Ukraine*

**Федоров Р.Ф.,**

*студент гр. 136-22-1а,  
ТОВ «Технічний університет  
«Метінвест політехніка»,  
м. Запоріжжя, Україна*

**Stoianov O.M.,**

*PhD (Engineering),  
Associate Professor, LLC "Technical  
university "Metinvest polytechnic",  
Zaporizhzhia, Ukraine*

**Стоянов О.М.,**

*к.т.н., доцент,  
ТОВ «Технічний університет  
«Метінвест політехніка»,  
м. Запоріжжя, Україна*

Процес розкислення сталі є одним із ключових етапів у виробництві металів, що значно впливає на чистоту та якість кінцевого продукту. Серед найефективніших розкислювачів виступає алюміній, проте його

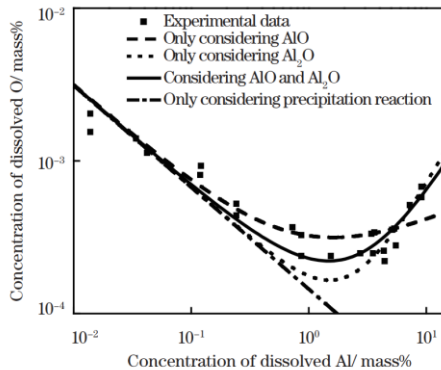
застосування вимагає глибокого вивчення термодинамічних і технологічних параметрів процесу. Дане дослідження аналізує три підходи до розкислення сталі алюмінієм: модель розкислення на основі асоціацій метал-кисень, технологію введення алюмінію в розплав сталі шляхом занурення, та використання алюмінієвого дроту в умовах перемішування газом у ковші. У результаті проведеного аналізу було виявлено, що кожен із підходів має свої переваги та недоліки, що дає можливість застосовувати їх для різних типів металопродукції та умов виробництва.

Актуальність питання розкислення сталі алюмінієм зумовлена необхідністю зменшення вмісту шкідливих включень у кінцевому продукті, що забезпечує покращення механічних властивостей та тривалість служби металу. Алюміній є ефективним розкислювачем, який утворює стабільні оксиди ( $Al_2O_3$ ), проте процес його взаємодії зі сталлю є складним та залежить від численних факторів, зокрема від технології введення та параметрів розкислення. У даній роботі проаналізовано три підходи до розкислення сталі алюмінієм, кожен з яких був представлений у трьох незалежних дослідженнях.

*Модель асоціацій метал-кисень у процесі розкислення сталі.* Перше дослідження, проведене Чжаном та Чоу, розглядає розкислення сталі алюмінієм через модель взаємодії асоціатів метал-кисень, що дозволяє більш точно визначити рівновагу системи розплав-кисень.

На рис. 1 представлено порівняння експериментально вимірної концентрації розчиненого кисню в сталі з розрахованими даними моделі розкислення, що враховує утворення сполук  $AlO$  та  $Al_2O$ . Графік показує, як модель адекватно описує поведінку кисню за низьких концентрацій алюмінію і демонструє розбіжності на високих концентраціях. Це підкреслює можливість застосування моделі асоціацій для прогнозування рівноваги розкислення сталі в залежності від вмісту алюмінію.

*Введення алюмінію шляхом занурення у розплав.* У другому дослідженні, яке виконали Віхлевщук та колеги, розглядається метод занурення алюмінієвих злитків у сталь у ковші, що забезпечує високу ступінь поглинання алюмінію та знижує його втрати від окислення (рис. 2). Методика передбачає глибоке занурення алюмінієвих злитків у сталь на глибину до 4 метрів, що дозволяє підвищити стабільність насичення розплаву алюмінієм до 40% і більше.



**Рис. 1. Порівняння вимірних і розрахункових кривих рівноваги алюміній-кисень**

Схема занурення алюмінієвих злитків може проілюструвати, як глибина занурення впливає на розподіл алюмінію в розплаві. Дослідження також показує, що додавання вапна знижує окислення шлаку, зменшуючи втрати алюмінію. Така схема могла б допомогти краще пояснити підвищення ефективності методу та стабільності алюмінію у розплаві.

*Введення алюмінієвого дроту у газомішаний розплав.* У третьому дослідженні, проведеному Бесковим та іншими, розглядається використання алюмінієвого дроту, що вводиться у сталевий розплав у ковші, перемішуваному аргоном. Дослідження включає чисельне моделювання з використанням обчислювальної гідродинаміки (CFD), яке дозволяє відтворити динаміку процесу утворення оксидів алюмінію та їх розподіл у розплаві. Модель показала, що найбільш активне утворення оксидів  $Al_2O_3$  відбувається в зоні інжекції дроту, а циркуляція рідкої сталі сприяє рівномірному розподілу кисню та алюмінію в розплаві (рис. 3). Виявлено, що на початкових стадіях процесу дооксидування виникає висока ступінь пересичення, що сприяє швидкому утворенню оксидних включень і сприяє очищенню сталі. Промислові випробування на заводі Uddeholm Tooling AB підтвердили відповідність моделі реальним умовам виробництва, показуючи високий рівень узгодженості між моделлю та експериментальними результатами

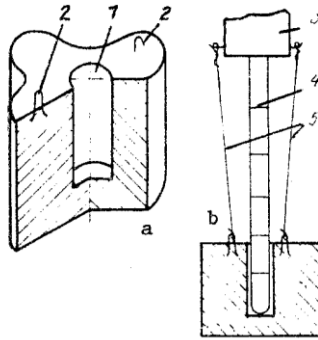


Рис. 2. Алюмінієвий злиток (а) і спосіб його кріплення до рухомої частини агрегату (б): 1) центральний отвір у зливку; 2) вушка на зливку; 3) рухома частина агрегату; 4) футерований стрижень; 5) дрiт

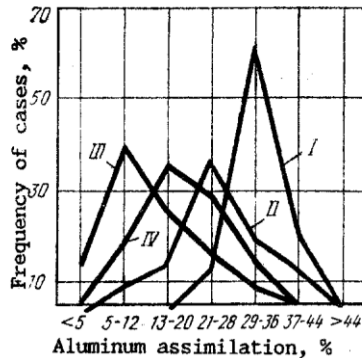


Рис. 3. Вплив способу введення алюмінію та додаткового вдування тепла на засвоєння алюмінію (кольорові криві позначають плавки, розкислені алюмінієвим зливком; чорні – плавки, розкислені алюмінієвими чушками; I та IV – плавки без додаткового вдуву; II та III показують нагрівання з додатковим обдуванням)

Результати трьох досліджень показують, що розкислення сталі алюмінієм може бути ефективно реалізоване за допомогою різних

методів, кожен із яких має свої переваги залежно від вимог до кінцевого продукту. Модель асоціацій метал-кисень дозволяє точніше прогнозувати рівновагу та вміст кисню в розплаві, метод занурення злитків забезпечує високу стабільність насичення алюмінієм, а введення алюмінієвого дроту ефективно усуває оксидні включення на початкових етапах розкислення. Подальше вдосконалення технологій розкислення стали алюмінієм може значно підвищити якість металопродукції та зменшити витрати на легуючі компоненти.

### Перелік використаних джерел

1. Zhang, Gh., Chou, Kc. Deoxidation of Molten Steel by Aluminum. *J. Iron Steel Res. Int.* 22, 905–908 (2015). [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30088-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30088-1)
2. Vikhlevshchuk, V.A., Katel, L.M., Shneerov, Y.A. et al. Efficient technology for deoxidizing steel with aluminum. *Metallurgist* 30, 114–117 (1986). <https://doi.org/10.1007/BF00749428>
3. Beskow, K., Jonsson, L., Sichen, D. et al. Study of the deoxidation of steel with aluminum wire injection in a gas-stirred ladle. *Metall Mater Trans B* 32, 319–328 (2001). <https://doi.org/10.1007/s11663-001-0055-1>

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-37>

## STUDY OF FORGING IN NOTCHED CYLINDER FORGINGS WITH A THROUGH HOLE

## ДОСЛІДЖЕННЯ КУВАННЯ У ВИРІЗНИХ БОЙКАХ ЦИЛІНДРА З НАСКРІЗНИМ ОТВОРОМ

**Chukhlib V.L.,**

*DSc (Engineering), Professor,  
National Technical University  
“Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, Ukraine*

**Чухліб В.Л.,**

*д.т.н., професор, Національний  
технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»,  
м. Харків, Україна*

**Duvansky O.M.,**

*PhD student,  
National Technical University  
“Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, Ukraine*

**Дуванський О.М.,**

*аспірант, Національний технічний  
університет «Харківський  
політехнічний інститут»,  
м. Харків, Україна*

Кування циліндра з наскрізним отвором з корозійностійких сталей є маловивченою темою, що дає велике поле для досліджень [1].