

Д. В. Єськов, Є. М. Сігарьов, А. А. Похвалітий, М. А. Кащєєв

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ДУТТЬОВІ РЕЖИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАГЛИБНИХ ФУРМ

Для забезпечення надійної та довготривалої роботи заглибних фурм, що використовують у процесах ковшової десульфурзації чавуну перед конвертерною переробкою, необхідні сучасні надійні засоби подачі порошкоподібних реагентів крізь сопла наконечника фурми, оптимальна схема вогнетривкого футерування стовбура фурми та раціональні режими її експлуатації. До найбільш розповсюдженої у промисловості конструкції наконечника відносять Т-подібний, що має 2 сопла, розміщені на одній осі у протилежних напрямках.

Якість складових, використаних для виготовлення вогнетривкого футерування та концепція футерівки у значній мірі визначають тривалість експлуатації фурми. В процесі обробки рідкого чавуну фурми для введення десульфураторів експлуатуються в складних умовах. Крім різких теплових ударів і корозійного зносу внаслідок хімічної дії покривного шлаку, стовбур фурми та її футерування зазнають значних механічних навантажень, - інтенсивною вібрацією і різкими поштовхами, викликаними бурхливим перебігом процесу десульфурзації. В цих умовах на термін служби фурми впливають не тільки властивості вогнетривких матеріалів і спосіб їх нанесення, але й технологія введення реагентів, конструкція металевого каркасу, спосіб закріплення футерівки, якість її ремонту та інші чинники.

Відшарування футерівки у випадках відсутності армування, тенденція до вигину фурми по границі зони армування (при армуванні сталевими кутами), виникнення повздовжніх тріщин при армуванні плоскими (50x6 мм) та колоподібними прутками (діам. 25-32 мм) з нестачею пружності та відшаруванням футерівки та зниження інтенсивності відшарування при використанні U-подібних кріплень на прутку діам. 25мм свідчать про доцільність подальших досліджень умов та особливостей руйнування та відшарування вогнетривкого шару. **Для зменшення схильності футерівки до розтріскування у вогнетривку масу виробники фурм додають дріт різних фракцій (довжини та діаметру волокон) з корозійностійкої сталі.**

Так, наприклад, за даними промислового використання, при складі вогнетривкого футерування, %: 3,0 CaO; < 48,0 SiO₂; > 44,0 Al₂O₃; < 1,4 Fe₂O₃; з зернами бетону

фракцій 0-6 мм й армуванням 4-ма сталевими кутами, стійкість футерівки фурм українського виробника складає 67-72 обробок чавуну. Використання фурм закордонного виробника, з футеруванням з зернами (0-6 мм) бетону складу, %: 40,0 SiO₂; 51,0 Al₂O₃; 1,0 Fe₂O₃; 3,0 MgO; 1,2 TiO₂ та 0,3 Al, фракцій, введенням 3% сталеві фібри й армуванням трьома сталевими кутами, у східних умовах експлуатації дозволяє забезпечити вже 158-166 обробок чавуну.

За результатами промислової експлуатації фурм встановлено, що утворення тріщин відіграє більш значну роль у руйнуванні футерівки, ніж корозія. Утворенню тріщин сприяє також те, що несуча труба має загально прийняті різними виробниками підсилюючі елементи для виключення її прогинів. Різна товщина слоїв вогнетривкого бетону в місцях посилення і поза цих місць сприяє розтріскуванню та відшаруванню футерівки по всій її довжині.

За результатами аналізу промислових даних пошкодження вогнетривкого футерування на стовбурі фурм виявлені як на відстані 1,2-1,5 м від накопичника фурми (у цій зоні виявлено переважний розвиток тріщин), так і в зоні шлакового поясу. Переродження мікро- у макротріщини при чергуванні нагрівання і охолодження фурми, в умовах заповнення останніх рідким чавуном, призводить як до відшарування вогнетриву, так і до руйнування металеві конструкції з подальшим обривом фурми.

Описані вище проблеми характерні і для умов експлуатації заглибних Т-подібних фурм для ковшової десульфурзації чавуну на УДЧ у КЦ ПрАТ «Камет-Сталь».

Вочевидь, виробникам заглибних фурм доцільно включати в стратегію проектування футерівки наступні фактори: термомеханічні напруження, що виникають при відхиленні від робочої (проектної) температури; утворення змішаних кристалів та нових з'єднань при хімічній взаємодії з покривним шлаком, що змінює свій склад по ходу обробки; механічну ерозію, що виникає при контакті металевого розплаву в умовах переміщення останнього вздовж стовбура фурми по ходу вдування реагентів у потоці газу-носію та т. ін.

Для моделювання складних металургійних процесів, розрахунку режимів нагріву й охолодження та їх впливу на футерування, а також визначення ефективності систем продування ковшової ванни широко застосовуються методи розрахункової гідродинаміки (CFD), аналізу методом кінцевих елементів (FEA), ізотермічного та прямого висо-

котемпературного експерименту [1]. Крім того, з використанням програмного комплексу FactSage, виконуються термодинамічні розрахунки для моделювання шлакових режимів та механізмів корозії футерування.

На окрему увагу заслуговує набуття знань щодо енергетичних принципів стабільності тріщин у футеруванні при їхньому виникненні та розвитку. Термодинамічні концепції «сталої» та «хиткої» рівноваги, «розвитку та гальмування тріщини» пов'язані з механічними напруженнями при роботі футерування фурми у розплаві та її пошкодженнями при термоударі.

Ковшова ванна, що барботується газовими потоками, сформованими при вдуванні газових або газопорошкових струменів крізь сопла заглибної фурми, є вкрай нестабільною системою. У глибині зон барботажу розвивається сильна турбулентність з відповідними швидкостями масопереносу та масообміну; пульсації швидкості розплаву можуть сягати до 50% від середніх значень швидкості у потоці. Руйнування вогнетривкого бетону внаслідок безпосередньої хімічної взаємодії з розплавом чавуну малоімовірно. Як і забруднення металевої ванни вогнетривками фурми при температурах до 1600°C. Зазвичай потоками металу найбільш інтенсивно розмивається поверхня футерування у зоні, наближеній до максимального газопотоку.

Спокійніше протікання процесу при кращих результатах десульфурзації і меншій тривалості обробки досягається застосуванням багатосоплових та обертових фурм [3]. В той же час, на сьогодні останні отримали суттєво менше розповсюдження у промисловій практиці.

Порівняльний аналіз особливостей руйнування футерування заглибної стаціонарної та обертової фурм в зонах контакту з металевим розплавом (нижче границі «шлак-метал») по ходу вдування газу проводили з використанням моделі 230-т заливального ковшу конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь». Використано авторську методику ізотермічного моделювання гідрогазодинамічних процесів. У якості модельних речовин використовували воду, у якості моделі вогнетриву футерування фурми – кристалізований шар з діамиду вуглецевої кислоти ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), що наморожували на металеву трубу для подачі газу (стисненого компресорного повітря).

Футерування фурми було умовно поділено на п'ять «зон» за її висотою з метою вивчення особливостей та глибини руйнування у кожній з виділених «зон». Використовували Т-подібні наконечники (для обертової та стаціонарної фурм) та з наконечник з двома соплами, розміщеними під кутом 45 град. до осі фурми (для стаціонарної фурми).

У ванну моделі ковша перед початком вдування газу вводили індикатори з «нульовою» плавучістю для вивчення гідродинаміки. Швидкість обертання заглибної фурми змінювали в межах від 1 до 100 об/хв (V), витрату газу на продування ванни - від 0,1 до 1,0 м³/хв (Q), кут нахилу сопел наконечника від 45 до 90 град (α).

Визначені характерні траєкторії руху рідини вздовж стовбура фурми та у стін ковша, характер розвитку та особливості утворення реакційної та циркуляційних зон, характер та особливості руйнування футерування фурми у кожній зі «зон» на її поверхні. За результатами обробки отриманих даних отримані математичні моделі для кожної із «зон» на поверхні футерування фурми, виконано перевірку статистичної значущості вибіркового коефіцієнтів регресії. Наприклад, для першої зони на футерівці фурми, модель, що описує вплив досліджених факторів на глибину зносу футерівки, у натуральних величинах має вигляд:

$$\Delta_1^{\text{нат}} = 4,759 + 0,0998 \cdot V + 0,62 \cdot Q - 0,116 \cdot V \cdot Q$$

а для п'ятої зони: $\Delta_5^{\text{нат}} = 6,185 + 0,074 \cdot V - 4,3845 \cdot Q - 0,07755 \cdot V \cdot Q$

На основі чисельного моделювання з використанням отриманих моделей побудовані відповідні поверхні відгуку. Так, вплив підвищення витрати газу при зміні швидкості обертання фурми у діапазоні від 1 до 100 об/хв на глибину руйнування футерівки, представлено на рис. 1.

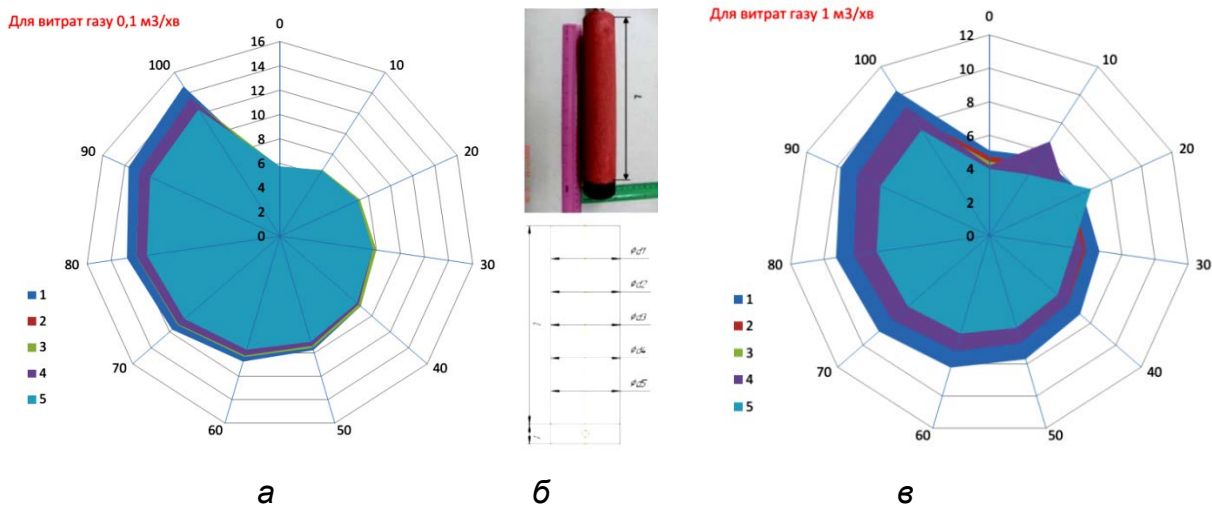


Рис. 1 - Топографія зносу вогнетривкого футерування заглибної фурми в залежності від витрат газу та швидкості обертання фурми (1-100 об/хв): а, в – витрати газу 0,1 та 1,0 м³/хв; б – вигляд моделі футерівки заглибної фурми та схема розміщення досліджених «зон» на поверхні футерування (1-5 на графіках)

При витратах газу до 0,5 м³/хв характер зносу футерування по висоті фурми (профіль зносу) практично незмінний, крім ділянки між 3-й та 5-й зонами (є пік при збільшенні швидкості обертів фурми у 4-й зоні). Після збільшення витрат понад 0,5 м³/хв виникає «пік» у діапазоні 0-30 об/хв. на у зоні 4, який зберігається і при подальшому підвищенні витрат газу.

Для стаціонарної фурми, у свою чергу, встановлені характерні особливості нерівномірності зносу футерування у різних «зонах» (рис. 1, б). Для першої зони на футерівці фурми, модель, що описує вплив досліджених факторів на глибину зносу футерівки стаціонарної фурми, у натуральних величинах має вигляд:

$$\Delta_1^{\text{нат}} = -4,458 + 0,16 \cdot \alpha - 7,555 \cdot Q + 0,213 \cdot \alpha \cdot Q$$

а для п'ятої зони: $\Delta_5^{\text{нат}} = 8,566 - 0,0879 \cdot \alpha + 13,44 \cdot Q + 0,022 \cdot \alpha \cdot Q$

Визначено, що при мінімальній витраті газу та куті нахилу сопел фурми 90 град. максимальна глибина руйнування шару CO(NH₂)₂ спостерігається у поверхні ковшової ванни. У свою чергу, при мінімальній витраті газу та куті нахилу сопел фурми у 45 град. мінімальний знос шару CO(NH₂)₂ - у поверхні ванни, а підвищений, хоч і відносно рівномірний (у середньому 5,6 мм), виникає на невеликій відстані від торця фурми (у зоні, наближеній до зони виходу газу) (рис. 2).

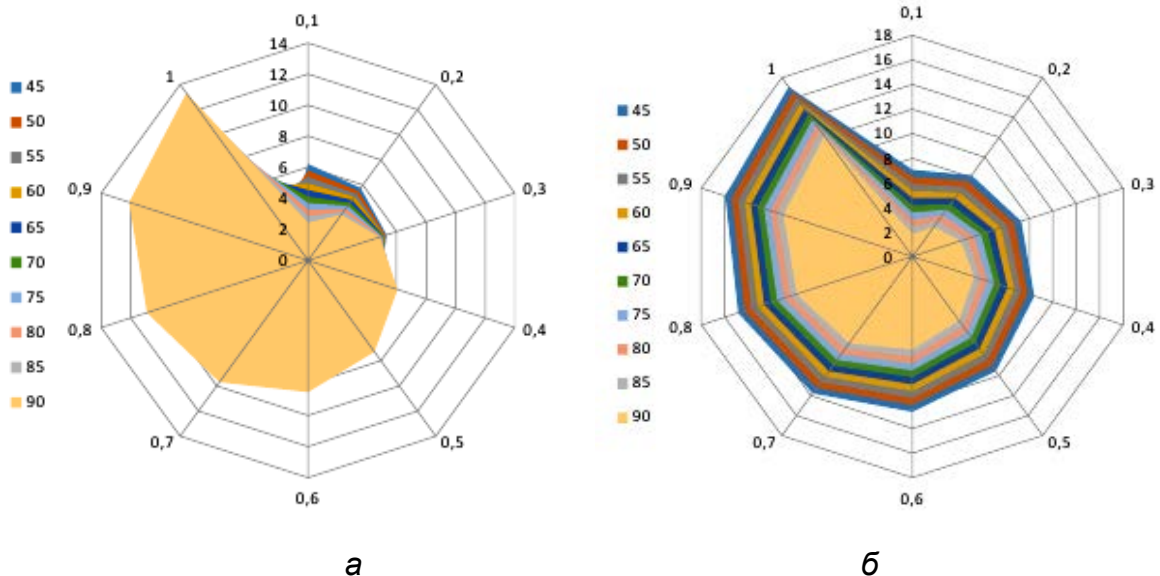


Рис. 2 - Топографія зносу вогнетривкого футерування заглибної фурми в залежності від витрат газу (0,1-1,0 м³/хв) та кута нахилу сопел наконечника (45-90 град): а – для зони 3; б – для зони 4 на поверхні вогнетривкого футерування

При максимальній витраті газу та куті нахилу сопел фурми у 90 град. максимальний знос шару $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ у поверхні ванни та підвищений – у зоні виходу газу з сопел. При максимальній витраті газу та куті нахилу сопел фурми 45 град максимальний знос шару $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ у зоні виходу газу з сопел, а нерівномірний, підвищений у порівнянні з іншими зонами на стовбурі фурми знос, спостерігається у поверхні ковшової ванни.

Висновки. Для обертової фурми, у досліджених умовах, до визначального на глибину та інтенсивність зносу футерування фурми фактору, можна віднести швидкість обертання фурми. У глибині барботажною зоною розвивається сильна турбулентність з відповідними швидкостями масопереносу та масообміну; пульсації швидкості розплаву можуть сягати до 50% від середніх значень швидкості у потоці. Максимізація зносу «вогнетривкого» шару спостерігається при максимальних витратах газу-носію. Найменший знос - при мінімальних витратах газу, у зоні, наближеній до зони виходу газу при куті нахилу сопел фурми у 90 град. Для стаціонарної фурми, максимальний знос вогнетривкого шару, як при куті нахилу сопел у 90, так і у 45 град., спостерігається також при максимальних витратах газу-носію. В той же час, при куті нахилу сопел у 45 град. по мірі збільшення відстані від зони виходу газу по висоті стовбура фурми, величина зносу, у порівнянні з 90 град., зменшується і складає від 6 до 15% (від глибини зносу шару $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) футерування фурми з соплами з кутом у 90 град. у середній частині фурми, до 23% - у поверхні ванни відповідно. Найменший знос шару $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ спостерігається при мінімальних витратах газу, у зоні, наближеній до зони виходу газу при куті сопел фурми у 90 град. За аналогічних умов, при куті сопел фурми у 45 град., знос шару $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ більше на 24-35% у нижніх зонах фурми, і менше, на 26-65% - у верхніх горизонтах ванни.

Список літератури

1. Особливості формування зони хвиль та сплесків на поверхні ковшової ванни / Є.М. Сігарьов, Г.Ю. Крячко, О.В. Довженко [та ін.] // Зб. наукових праць ДДТУ (технічні науки). 2021, вип.2 (39). С. 3-10.
2. Ковшечая десульфурация чугуна вдуванием диспергированного магния через погруженную вращающуюся фурму / Е.Н. Сигарев, А.Г. Чернятевич, К.И. Чубин, С.А. Зарандия // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. №7(265). С. 106-110.
3. Спосіб десульфуратії чавуну диспергованим магнієм та пристрій для його здійснення: пат. 104946 Україна: заявл. 17.10.2012, опубл. 25.03.2014, Бюл. №6.