

2. Анализ потенциальных направлений промышленной переработки стружки черных металлов в Республике Беларусь / В.И.Тимошпольский и др. *Литье и металлургия*, 2006. №2. С.23-26.
3. Стеблов А.Б., Герман М.Л. Переработка стружки черных металлов. *Рынок вторичных металлов*, 2007. № 1/39. С.46-49.
4. Терлецкий С.В. О некоторых проблемах переработки стружки в современных дуговых сталеплавильных печах. *Литье и металлургия*, 2005. № 3. С.76-78.
5. Охотский В.Б. Модели металлургических систем. Днепропетровск: Системные технологии, 2006. 287с.
6. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1993. 152с.
7. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. К.: Вища школа, 1979. 277с.
8. Оценка качества брикетов из стальной стружки, производимых ООО «Промбрикет» / С.Н.Петрушов и др. *Сб. науч. тр. Донбасс. гос. техн. ун-та*. Алчевск, 2006. Вып. 22. С.96-101.
9. ГОСТ 25281–82 (СТ СЭВ 2287–80). Металлургия порошковая. Метод определения плотности формовок. [Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 мая 1982 г. №2156 срок действия установлен с 01.01.1983 г. до 01.01.1988 г.]. Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1982.

Надійшла до редколегії 19.03.2019.

УДК 669.136

DOI 10.31319/2519-2884.34.2019.4

СТОРОЖЕНКО С.А., к.т.н., доцент
 ЧУБІН К.І., к.т.н., доцент
 ЧУБІНА О.А., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВДУВАННЯ МАГНІЮ В ЧАВУН КРИЗЬ ФУРМИ РІЗНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Вступ. Відомо, що якість ливарної продукції багато в чому залежить не тільки від способів виробництва рідких сплавів та умов їх підведення до ливарної форми та тверднення, але і від їх складових.

На цей час дуже гостро стоїть проблема підвищення якості ливарної продукції. Вирішення цієї проблеми дозволить різко і на належний рівень підняти конкурентоспроможність України в галузі ливарного виробництва.

Чавун продовжує залишатися одним із основних матеріалів сучасності. Ливарні чавуни використовуються для деталей, від яких потребується висока конструкційна міцність і спеціальні властивості. Як ніякий інший ливарний матеріал, чавун є універсальним, бо має різноманітні властивості. Можливість широко варіювати структуру чавуну, змінюючи хімічний склад розплаву в процесі позапічної обробки, умови тверднення та охолодження в твердому стані, дає ймовірність зміни експлуатаційних характеристик чавунних виливків в напрямку підвищення якості.

Впровадження процесу модифікування чавуну магнієм у «великій» металургії призвело до створення в цілому напряму, пов'язаного забезпеченням істотної економії

матеріальних і трудових ресурсів та з появою високоякісних чавунів з кулястим графітом [1-3].

В ливарному виробництві заміна в ряді випадків сталевого литва або заготовок з кольорових металів високоміцним чавуном, як менш дефіцитним і більш дешевим матеріалом, також має низку технологічних переваг. Але протягом більш 60 років використання технологій додавання магнію в чавун для модифікування не вирішено проблему поступового введення цього реагенту в розплав. В ливарному виробництві вона залишається актуальною і сьогодні. Тому закономірно, що і в світі, і в нашій країні в найближчі роки розвиток ресурсозберігаючих технологій позапечної обробки ливарного чавуну буде пріоритетним.

Постановка задачі. Завданням даного дослідження є вивчення гідрогазодинаміки рідкої ванни при позапечній обробці рідкого чавуну диспергованим магнієм під час продування газом розплаву в ливарних ковшах, а саме:

- встановлення експериментальних передумов вдосконалення процесу позапечної обробки ливарного чавуну вдуванням диспергованого магнію;
- з використанням холодного фізичного моделювання дослідження особливостей гідрогазодинамічної картини при обробці чавуну вдуванням диспергованого магнію в ливарний ківш крізь заглибні фурми різної конструкції та уточнення місць переважного протікання реакції;
- шляхом високотемпературного моделювання з використанням розробленого обладнання комплексної обробки чавуну оцінити ефективність запропонованих технологічних заходів щодо обробки чавуну диспергованим магнієм в ливарному ковші з отриманням чавуну з кулястим графітом.

Результати роботи. За даними роботи [4] перспективним методом є вдування магнію у високодисперсному стані в струмені газу-носія, що забезпечує поступове дозоване введення магнію, можливість регулювання швидкості надходження модифікатора в метал, високе його засвоєння. Під час проведення досліджень використовувались фізичне холодне/ та високотемпературне моделювання з дотриманням відповідних критеріїв подібності.

При виготовленні моделі ливарного ковша були дотримані умови геометричної подібності моделі і зразка стосовно води, яка продувається повітрям [5].

Оскільки середовище, яке моделюється, є гетерофазним (метал, газ), виконання моделі слід здійснювати в суворій відповідності до теорії подібності [6]. Згідно з положеннями даної теорії масштаб таких моделей можна визначити за допомогою чисел Вебера ($We = \frac{\sigma_p}{\rho_p l W^2}$, тут і далі σ – поверхневий натяг, ρ – густина, l – характерний розмір, W – швидкість, індекс «р» відноситься до рідини) і Лапласа ($La = \frac{\sigma_{жс}}{\rho_{жс} l^2 g}$, тут g –

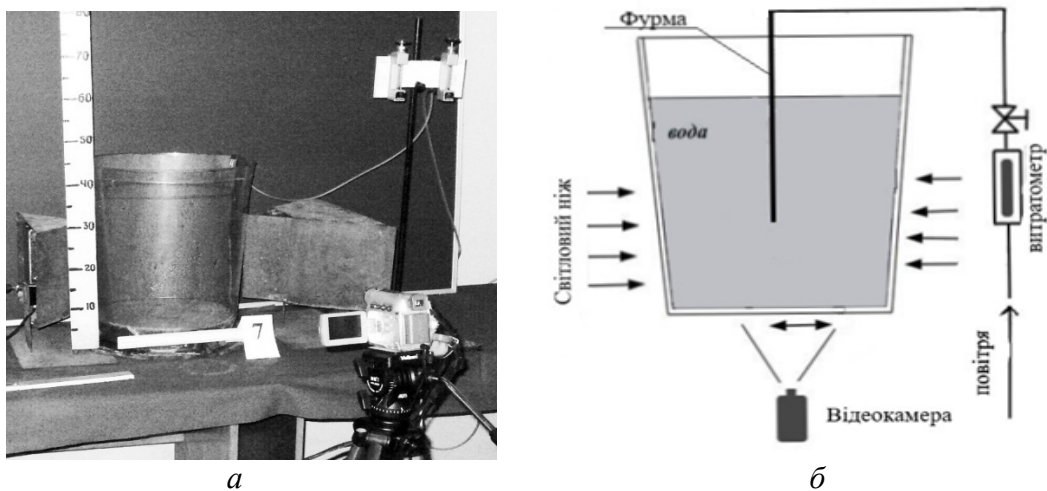
прискорення вільного падіння). Оскільки значення швидкостей в натурному зразку невідомі, для визначення масштабу моделі K_l використовуємо число Лапласа з умови $La = idem$:

$$K_l = \sqrt{\frac{K_{\sigma_p}}{K_{\rho_p} K_g}}, \quad (1)$$

де $K_{\sigma_p} = \frac{\sigma'_p}{\sigma_p}$, $K_{\rho_p} = \frac{\rho'_p}{\rho_p}$, $K_g = 1$ – масштаби відповідно поверхневого натягу, густини та прискорення вільного падіння (тут і далі «штрих» відноситься до моделі).

Поверхневий натяг води і чавуну згідно з літературними джерелами знаходяться в діапазоні відповідно 0,073-0,075 Н/м і 0,8-1,3 Н/м. Густина води і чавуну знаходяться в межах відповідно 998,2 кг/м³ і 6900-7000 кг/м³. Підстановка числових значень σ і ρ в рівняння (1) дає значення масштабу моделювання $K_l = \frac{l'}{l}$ близько 0,5-0,6.

В умовах лабораторії кафедри металургії чорних металів ДДТУ виконано холодне моделювання процесу продувки магнієм чавуну в ливарних ковшах. Створено прозору експериментальну установку в масштабі 0,6 реального ковша місткістю 1 т (рис.1), що відповідно до теорії подібності дає підставу для отримання достовірних характеристик руху потоків металу в реальному зразку.



а – фото установки; б – схема установки

Рисунок 1 – Установка для моделювання процесу обробки рідкої ванни диспергованим магнієм

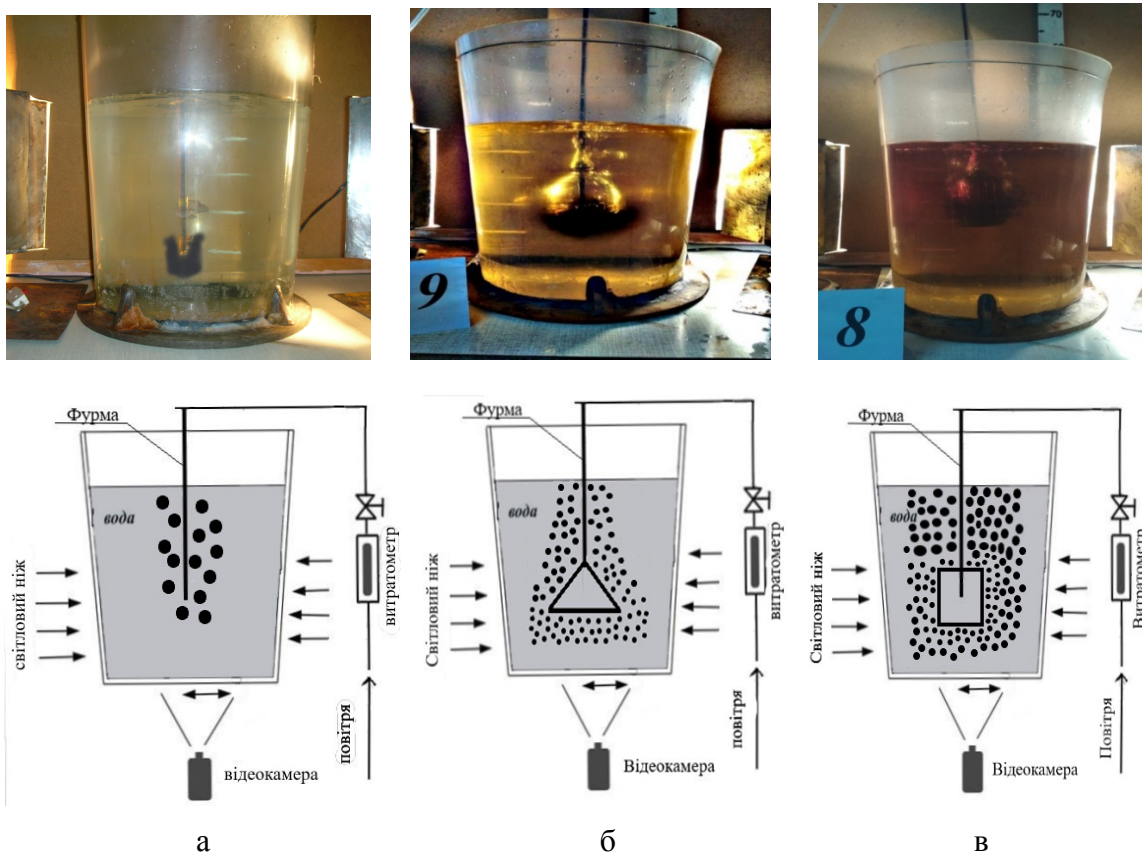
На моделі досліджено такі фурми: у вигляді трубки постійного перерізу; з воронкою на вихідному кінці; з випарником, закритим з нижнього торця, на вертикальних стінках якого зроблено 24 отвори невеликого діаметра. Розплав моделювали 10%-им водним розчином оцтової кислоти з додаванням йоду, диспергований магній – сумішшю NaHCO_3 та картопляного крохмалю у співвідношенні 4:1, газ-носієм – стисненим повітрям. Питома витрата повітря відповідала витраті газу-носія 0,12 м³ на 1 кг магнію. Продувальну фурму, воронку та випарник відповідної конструкції виготовляли з полістиролу.

Рух бульбашок CO_2 фіксували відеозйомкою, розташування реакційної зони – зміненням кольору рідини внаслідок взаємодії крохмалю з йодом. Мета даних експериментів – охарактеризувати поведінку та розмір спливаючих бульбашок в об'ємі ковша та оцінити об'єм і розташування реакційної зони.

Визначено, що при зануренні в ківш фурми постійного перерізу та вдуванні «модифікатора» в результаті реакції миттєво утворювалися бульбашки газу, які піднімалися вгору вздовж заглибної фурми і тільки короткий час (1-2 с в перерахунку на зразок) залишалися в контакті з рідиною. Реакційна зона, яка визначалася за зміною кольору рідини при взаємодії йоду і крохмалю, навколо фурми не поширювалася на периферію (рис.2, а), в придонній зоні ковша знаходилася застійна зона. В районі виходу газу з «металу» спостерігалися сплески, які спричиняли появу пульсацій на поверхні рідини, – аналог бурхливого процесу при обробці магнієм розплаву на натурному зразку.

Показано, що зазначені вище недоліки частково нівелювалися при наявності на виході продувальної фурми воронки певного діаметра. При такому способі введення «модифікатора» утворення бульбашок відбувається безпосередньо під воронкою, реакційна зона збільшується і охоплює практично 2/3 об'єму рідини в ковші. Але, зважаючи на те, що наявність воронки уповільнює процес виходу на поверхню газорідного потоку, створюються умови для укрупнення бульбашок газу, які спливають на поверхню рідкої ванни (рис.2, б). Застійні зони зберігаються близько дна та стінок ковша. Інтенсивність сплесків знижується.

При подачі диспергованого «модифікатора» з переведенням останнього в пароподібний стан у закритому випарнику мало місце подрібнення бульбашок та збільшення об'єму рідини, залученої до реакції (рис.2, в). Застійні зони в нижній частині ковша спостерігалися переважно в місцях сполучення дна і стінок. Завдяки відсутності факторів, які сприяють злиттю бульбашок та рівномірному розташуванню отворів по поверхні випарника, кількість бульбашок, які утворювалися в результаті реакції, зменшувалась незначно, вихід їх на поверхню «дзеркала» рідини порівняно з описаними вище експериментами відбувався доволі спокійно без сплесків і викидів крапель рідини.



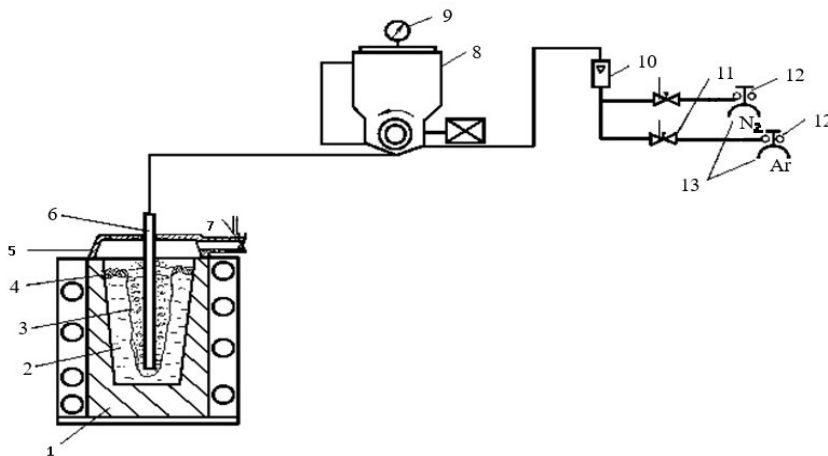
а – фурма постійного перерізу; б – фурма, оснащена воронкою;
в – фурма з випарником, закритим з торця

Рисунок 2 – Установа для моделювання процесу вдування модифікатора крізь заглибні фурми різної конструкції

Починаючи з часу отримання високоміцного чавуну, було висунуто кілька гіпотез про механізм його утворення, проте жодна з них не в змозі пояснити всіх явищ, які спостерігаються на практиці. Результати досліджень процесу вдування диспергованого магнію в чавун крізь заглибну фурму з випарником закритого типу певним чином по-

яснюють гіпотезу утворення чавуну з кулястим графітом, яка викладена в роботі [7]. На основі запропонованої гіпотези можна пояснити не тільки форму включень, а й інші факти, що мають місце, наприклад, відсутність модифікувального ефекту, якщо при введенні магнію бульбашки не утворюються.

З метою підтвердження отриманих результатів в лабораторії кафедри металургії чорних металів ДДТУ проведено високотемпературне моделювання процесу обробки чавуну диспергованим магнієм з використанням спеціально створеної багатоцільової установки (рис.3) комплексної обробки чавуну. Модифікування ливарного чавуну відбувалося в 150-кг індукційній печі за допомогою занурювальної фурми з закритим випарником, який забезпечує перехід диспергованого магнію в пароподібний стан за рахунок тепла металевого розплаву і вдування в об'єм останнього струменя газової суміші магнію і аргону.



- 1 – тигель; 2 – металева ванна; 3 – барботажна зона; 4– шлак;
5 – кришка; 6 – занурювальна фурма; 7 – уловлювач пилу;
8 – живильник з роторним дозатором; 9–манометр;
10 – ротаметр; 11– вентиля; 12– редуктори; 13 – газові балони

Рисунок 3 – Схема багатофункціональної установки для комплексної обробки чавуну

При такому способі введення існує можливість запобігання вибухоподібного переходу твердого магнію в пароподібний стан.

Для забезпечення рекомендованого хімічного складу чавуну з

кулястим графітом марок ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45 експеримент проводили за наступним планом:

1. У звичайних набивних тиглях з кислим (кварцит) футеруванням розплавляється ($P_{\text{чав}}$) 100 кг переробного чавуну, який містить 4,05-4,15% С, 0,09-0,15% Mn, 0,65-0,90% Si, 0,020-0,080% S і 0,045-0,065% P.

2. Із забезпеченням початкової температури чавуну 1330-1400°C після видалення первинного кислого окислювального покривного шлаку і при необхідності наведення нового основного шлаку обробляється чавун вдуванням диспергованого магнію марки МГП-99 фракцій 0,67-1,0 мм.

3. Подання магнію до занурювальної фурми здійснюється за допомогою живильника з роторним дозатором в потоці аргону з інтенсивністю (J_{Ar}) 0,11-0,18 м³/(т·хв.).

4. Для наведення контрольованого шлакового покриття при обробці чавуну в тиглі використовується вапно (фракція 0,005-0,007 м) наступного хімічного складу: 90,71% CaO; 1,32% SiO₂; 2,11% MgO; 0,32% Al₂O₃; 0,032% S; 5,09% в. п. п.

5. Для вдування диспергованого магнію в ливарний ківш використовували продувну занурювальну фурму з випарником, закритим з нижнього торця, на вертикальних стінках якого виконано 24 отвори невеликого діаметра (рис.2, в).

6. У ході вдування диспергованого магнію в чавун з інтервалом 1-4 хв. за допомогою спеціального пристрою відбиралися проби металу в кварцові пробірки.

На основі проведеного високотемпературного моделювання показано можливість модифікування розплаву з запобіганням вибухового переходу твердого магнію в

пароподібний стан і отримання чавуну з кулястим графітом (рис.4) та ще раз підтвердити результати, отримані в роботі [8].

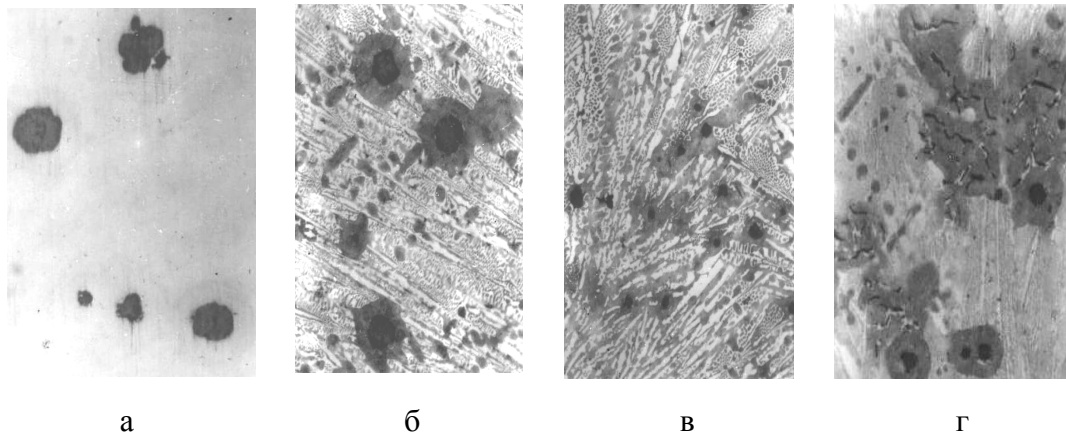


Рисунок 4 – Мікроструктура зразків 1 до травлення (а) та після травлення (б) і зразків 2 після травлення (в – периферія, г –центр)

Зразок 1 (рис.4, а, б), відібраний з реакційної камери після 18 хвилин продувки (0,004% S, 0,0245% Mg), має світлий, блискучий променистий злам, однорідний по перетину. Мікроструктура – ледебурит сотового типу, дендрити аустеніту (перліт). Є включення графіту компактною і правильною кулястою форми (окремі до 50-60 мкм), спостерігається відсутність феритної оторочки навколо графітних включень, перлітна оторочка тонка (до 50 мкм), кількість включень (до 3 мм²). Є дендрити первинного аустеніту. Вермикулярний графіт відсутній по всьому перетину зразка. Спостерігаються включення полон діаметром до 5 мм.

Зразок 2 (рис.4, в, г), відібраний з порівняльної камери одночасно зі зразком 1 (0,006% S, 0,0158% Mg), має структуру, аналогічну зразку 1. При трохи більшій кількості розміри включень графіту менші (діаметр до 40 мкм). Є вермикулярний графіт. Кількість включень у напрямку до центру зростає зі збільшенням частки вермикулярного графіту. Плівки відсутні. Поверхневої сірої оторочки немає.

Висновки. На підставі проведених експериментальних досліджень доведено доцільність використання занурювальної продувної фурми з випарником, закритим з торця, для введення диспергованого магнію в ливарний ківш із забезпеченням спокійного характеру протікання процесу та отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом для потреб ливарного виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Внепечная обработка чугуна магниесодержащими реагентами / А.Ю.Никулин и др. *Сталь*, 1993. № 9. С.18-21.
2. Совершенствование технологии внепечной обработки чугуна и стали / А.Ф.Каблуковский и др. *Сталь*, 1994. № 9. С.15-17.
3. Чубін, К.І. Розвиток теорії та удосконалення технології десульфурації чавуну вдунанням диспергованого магнію: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Дніпродзержинськ, 2008. 40с.
4. Гидродинамика и тепломассообмен в испарителе закрытого типа при обработке чугуна магнием / Е.Н.Сигарев, А.Г.Чернятевич, С.Е.Самохвалов, К.И.Чубин. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2006. №7. С.203-208.
5. Еронько С.П., Пилюшенко В.Л., Шестопалов В.Н. Исследование на физической модели распределения полей скоростей потоков в жидкости при продувке ее газом. 4-я

- Всесоюз. конф. по тепло- и массообменным процессам в ваннах сталеплавильных агрегатов: тез. докл. Жданов, 1986. С.13.*
6. Гресс А.В., Стороженко С.А. Физическое моделирование гидродинамики металлической ванны литейного ковша. *Зб. наук.пр., сер. «Металургія»*. Запоріжжя: ЗДІА, 2011. Вип. 24. С.19-24.
 7. Могилевцев О.А. Роль пузырей модификатора в образовании зародышей шаровидного графита в чугунах. *Теория и практика металлургии*, 1999. № 4. С.31-33.
 8. Сигарев Е.Н. Особенности модифицирования чугуна диспергированным магнием с использованием вращающейся погружной фурмы. *Металургія*, 2012. Выпуск 3(28). С.5-12.

Надійшла до редколегії 18.02.2019.

УДК 621.791.927.5

DOI 10.31319/2519-2884.34.2019.5

КОЛОМОЄЦЬ І.В., аспірант
ПЕРЕМІТЬКО В.В., д.т.н., професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ЭФЕКТИВНІСТЬ ВНЕСЕННЯ ДОДАТКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

Вступ. Процес експлуатації багатьох деталей машин супроводжується зношуванням. У промисловості існує чимало способів підвищення терміну експлуатації деталей, серед яких одним з найефективніших є відновлювальне або зміцнювальне дугове наплавлення [1]. Саме цьому способу надається перевага через поширеність та економічну вигідність обладнання.

Особливістю зношування багатьох пар є його нерівномірність по лінії або поверхні контактування. Це підтверджує, зокрема, аналіз епюр поверхні спрацьованої бочки валків листопрокатного стану. Як наслідок, змінюється реальна конфігурація контактних поверхонь, що прискорює настання їх заміни та реновації. Виходячи з цього, стає актуальним розробка шляхів, прийомів, які дозволили б наносити неоднаковий за складом та властивостями наплавлений матеріал, диференційований за характером реального прикладання зусиль при експлуатації.

Слід також звернути увагу на фактор зони сплавлення. Накладання різних за складом шарів металу може призводити до несприятливих наслідків, таких як утворення мартенситних прошарків при нанесенні аустенітного шва на вуглецеву сталь. Через це актуальним є пошук способів регулювання не лише хімічного складу, але й ступеня зональної неоднорідності.

У цьому сенсі слід згадати про уявлення про наплавлену деталь як багат шарову конструкцію [2], в якій кожний шар має свій хімічний склад, структуру, теплофізичні й механічні властивості. Така практика реалізується з метою покращення взаємодії поверхневих і глибинних шарів та попередження відлущування і розтріскування. Вочевидь, сутність конструкції наплавленого шару може стосуватися не лише шарів металу, але й зон окремого валика.

Перша спроба реалізації наплавлення металу, де окремі зони отриманого валика матимуть свій хімічний склад, структуру та властивості передбачала нанесення металу з періодичною заміною електродного дроту [3]. Це дало змогу забезпечити відновлення прокатних валків у відповідності до вимог рівномірного схоплення металу, що підлягає прокатці, розташовуючи шари наплавленого металу у шаховому порядку для чергуван-