

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова

**II Всеукраїнська науково-технічна конференція  
молодих вчених «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»**

Тези доповідей

м. Дніпро  
2018

**Редакційна колегія випуску:**

- Бабаченко О. І.** д.т.н., директор ІЧМ НАН України;
- Вергун О.С.** д.т.н., заступник директора ІЧМ НАН України;
- Меркулов О.Є.** к.т.н., с.н.с., вчений секретар ІЧМ НАН України;
- Тогобицька Д. М.** д.т.н., проф., зав. відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів ІЧМ НАН України;
- Чернятевич А. Г.** д.т.н., проф., зав. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАН України;
- Шевченко А. П.** д.т.н., пров.н.с. відділу позапічної обробки чавуну ІЧМ НАН України;
- Муравйова І. Г.** д.т.н., с.н.с., зав. відділу технологічного обладнання та систем управління ІЧМ НАН України;
- Приходько І. Ю.** д.т.н., с.н.с., зав. відділу обробки металів тиском ІЧМ НАН України;
- Луценко В. А.** д.т.н., с.н.с, пров. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАН України;
- Нестеров О. С.** к.т.н., с.н.с. зав. відділу металургії чавуну ІЧМ НАН України;
- Тубольцев Л. Г.** к.т.н., с.н.с. зав. Відділу прогнозу та інформаційно-технічних досліджень в металургії ІЧМ НАН України;
- Степаненко Д. О.** к.т.н., с.н.с. відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів ІЧМ НАН України (Голова Ради молодих вчених)

## ЗМІСТ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОЛЕЗНЫХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ПРИМЕНЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ Мешалкин А. П., Коваленко Е. Т., Коткова В. А.....	6
РАЦІОНАЛЬНА КОНСТРУКЦІЯ ФУТЕРІВКИ СТАЛЕРОЗЛИВНОГО КОВШУ Лантух О. С., Молчанов Л. С., Синегін Є. В.....	7
НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМУ КОВШОВОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ЗА КОПНЖЕКЦІЙНОЮ СХЕМОЮ Довженко О. В., Сігарьов Є. М.....	8
ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ СИСТЕМИ «ПОКРИВНИЙ ШЛАК - РОЗПЛАВ» Кочмола Д. С., Сігарьов Є. М.....	9
ФОРМУВАННЯ ВІДКРИТОЇ ЗОНИ НА МІЖФАЗОВІЙ ГРАНИЦІ ПРИ КОВШОВОМУ РАФІНУВАННІ Кочмола Д. С., Сігарьов Є. М.....	10
ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОДУВКИ ЗВЕРХУ ЧЕРЕЗ КОАКСІАЛЬНЕ СОПЛО Голуб Т. С., Дудченко С. О.....	11
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДИХ ДОБАВОК ПРИ КОВШОВІЙ ОБРОБЦІ РОЗПЛАВУ Андрієвський Г. О., Піптюк В. П., Греков С. В.....	12
ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОАГРЕГАТИВ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМАХ РЕЗЕРВНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ Рожевич А. О., Книш Л. І.....	13
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДВОХ РІЗНИЦЕВИХ СХЕМ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ Попов І. В., Бойко Л. Т.....	14
ПРЯМА ТА ОБЕРНЕНА ЗАДАЧІ В МОДЕЛІ «ЧОРНА СКРИНЯ» Конончук А. А., Бойко Л. Т.....	15
ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ Снігура І. Р., Тогобицька Д. М.....	16
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПИЛЕВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ ПОВНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ Москалина А. О., Сохацький О. А., Чайка О. Л.....	17
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛО-ГАЗОДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ ФУРМЕНОЇ І КОЛОШНИКОВОЇ ЗОН ДОМЕННОЇ ПЕЧІ З ВДУВАННЯМ В ГОРН ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА І ПРИРОДНОГО ГАЗУ Корнілов Б. В., Чайка О. Л., Шостак В. Ю.....	18

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ І ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ НА ПІДСТАВІ НОВИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТИКИ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ТА РОЗПАЛУ ШАХТИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ Цюпа К. С., Чайка О. Л., Шостак В. Ю.....	20
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОФІЛЮ ВИДУТИХ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ТА ЇХ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ Шостак В. Ю., Лебідь В. В., Чайка А. Л., Жеребецький А. А.....	21
ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОГО РАФИНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛИ В УСЛОВИЯХ ООО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ» Климчик Ю. В., Чайка А. Д., Гасик М. И., Горобец А. П.....	22
ОСВОЄННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЗАПІЧНОГО РАФІНУВАННЯ СТАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛУЖНОГО АЛЮМОСИЛКАТУ (ПЕГМАТИТУ) Яковицький О. В., Степаненко Д. О.....	24
КОРИГУВАННЯ ГАЗОШЛАКОВОГО ПОТОКУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОФІЛЮ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ КОНВЕРТЕРА Недбайло М. М., Сігарьов Є. М.....	25
БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ Минко А. Н.....	26
ВПЛИВ РОЗМІРУ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ОБКОТИШІВ (СВО) НА СТУПІНЬ ВИКОРИСТАННЯ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ЇХ ВІДНОВЛЕННІ Ванюков А. А.....	27
ШЛАКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ РОТОРНОЇ СТАЛІ ТИПУ FB2 Стовпченко Г. П., Лісова Л. О., Медовар Л. Б.....	28
РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ПІДХОДІВ ДО ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ Шумельчик Є. І., Горупаха В. В., Семенов Ю. С.....	29
ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ЛЕГОВАНОЇ ХРОМОМ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ОХОЛОДЖЕННІ Парусов Е. В., Пушкаренко М. В.....	30
МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ПЕРЕТИНОМ ОБОДУ В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КОЛІС ЗІ СТАЛЕЙ РІЗНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ Бабаченко О. І., Кононенко Г. А.....	31
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПРОРОБЛЮВАНOSTІ СТРУКТУРИ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК ЗІ СТАЛІ 09Г2С Дьоміна К. Г., Дементьева Ж. А., Миргородська О. С., Гунченко Д. В. ....	32
СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ БУНТОВОГО ПРОКАТУ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНИХ ВИРОБІВ Парусов Е. В., Сагура Л. В., Чуйко І. М.....	33

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ,  
ВИГОТОВЛЕНИХ НА ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» ЗА АМЕРИКАНСЬКИМ  
СТАНДАРТОМ

Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Дьоміна К. Г., Хулін А. М., Шпак О. А..... 34

ДОСЛІДЖЕННЯ СПІЛЬНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ШАРУВАТИХ  
МЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ ТА ТИТАНУ ПРИ ЕКСТРУЗІЇ  
З БІЧНИМ ВИТКАННЯМ

Самсоненко А. А., Андреев В. В..... 35

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФОРМОЗМІНУ СТАЛЕВОЇ СІТКИ В  
СКЛАДІ АРМОВАНОГО АЛЮМІНІЄВОГО МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТУ

Макеєва Г. С., Фролов Я. В..... 36

УДК 669.147

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОЛЕЗНЫХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ПРИМЕНЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Мешалкин А. П., к.т.н., Коваленко Е. Т., Коткова В. А. - ст. гр. МЕ03-14**

### **Национальная металлургическая академия Украины**

Важной задачей современной металлургии является поиск альтернативных видов сырья и энергии, обоснование рациональных технологий производства и применения материалов многофункционального назначения на основе техногенных отходов.

На каф. ТМП и Х проводятся исследования по разработке рациональных схем производства новых материалов для повышения эффективности рафинирования металла в сталеплавильных агрегатах и при его внепечной обработке. Установлено, что наиболее рациональным способом производства материалов целевого назначения является реализация в схеме совместной тепловой обработки исходных компонентов – отходов пиролиза углеродсодержащего материала растительного происхождения.

Разработанным схемам производства инновационных материалов присуща технологическая гибкость, которая обеспечивается широким температурным интервалом тепловой обработки исходной смеси в условиях пересыпающегося слоя и возможностью регулирования окислительного потенциала атмосферы теплового реактора.

Установлена возможность более полного использования потенциала вторичной энергии газообразных продуктов, их тепловой и топливной составляющих. Это позволяет существенно сократить расходы топлива на тепловую совместную обработку отходов и расширить спектр функционального назначения материалов.

При реализации предлагаемых схем проявляются следующие положительные эффекты синергии: технологический, энергетический, экономический, сырьевой и экологический.

УДК: 666.762

## РАЦІОНАЛЬНА КОНСТРУКЦІЯ ФУТЕРІВКИ СТАЛЕРОЗЛИВНОГО КОВШУ

Лантух О.С., асп., Молчанов Л.С., к.т.н., Синегін Є.В., к.т.н.

**Національна Металургійна Академія України, м. Дніпро**

В умовах сучасного виробництва роль сталерозливного ковшу значно зростає, так як у ньому здійснюються фінішні операції по доведенню сталі (рафінування, розкислення і легування розплавів). При цьому важливим фактором, що впливає на якість готової металопродукції є вміст у сталі неметалевих включень. Значно впливати на процес їх видалення з металу можна або за рахунок збільшення часу технологічних операцій по позапічній обробці розплаву, або за рахунок оптимізації геометричних особливостей металевої ванни у ковші (використання футерівки раціональної конструкції). Другий напрямок по інтенсифікації видалення неметалевих включень з розплаву є більш прийнятним, так як не призводить до зниження продуктивності усього металургійного комплексу.

З метою визначення найбільш впливових геометричних параметрів футерівки сталерозливного ковшу було проведене «холодне» моделювання. По його результатам встановлено, що з метою інтенсифікації процесів видалення неметалевих включень з розплаву, необхідно виконувати ділянку поєднання донної частини футерівки зі стінками у формі округлення по радіусу (0,16), а для збереження отриманих гідродинамічних особливостей необхідно застосовувати спеціальні пристрої для захисту бійної ділянки. Найбільш раціональною конструкцією гідродинамічного стопора є сферичний сегмент. При використанні вказаних удосконалень у конструкції футерівки сталерозливного ковша досягається збільшення швидкості спливання неметалевих включень на 37 % у ковші без продувки нейтральним газом.

## НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМУ КОВШОВОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ЗА КОІНЖЕКЦІЙНОЮ СХЕМОЮ

**Довженко О. В., Сігарьов Є. М., д.т.н.**

**Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське**

Проведений аналіз показників ковшової десульфуратії переробного чавуну перед сталеплавильним переділом за коінжекційною схемою на обладнанні фірми «*ThyssenKrupp Polysius*» (Німеччина) в умовах вітчизняного металургійного підприємства. У якості десульфураторів використовується суміш флюїдизованого вапна із магнієм у діапазоні співвідношень ( $Q_{\text{пит}}$ ) від 5,2:1 до 2,3:1 відповідно.

Визначено, що підвищення  $Q_{\text{пит}}$  до 3,6...4,5 викликає тенденцію зниження ступеню десульфуратії. Залежність ступеню десульфуратії чавуну від співвідношення питомих витрат вапна та магнію у суміші реагентів може бути представлена у вигляді

$$D = 0,077 Q_{\text{пит}}^3 - 3,263 Q_{\text{пит}}^2 + 12,098 Q_{\text{пит}} + 58,201.$$

Доведено, що підвищення значень  $Q_{\text{пит}}$  більш ніж 3,0...3,5 є недоцільним.

Втрати заліза з кінцевим шлаками, масою від 1,1 до 9,6 т, які скачують з поверхні розплаву після десульфуратії складають від 1,8 до 8,4 кг/т чавуну.

Сумарний вміст заліза у шлаках після десульфуратії коливається в залежності від початкових умов обробки та  $Q_{\text{пит}}$  у широкому діапазоні та складає від 62,4 % до 79,6 %.

З метою підвищення ефективності використання суміші десульфураторів та зменшення втрат заліза зі шлаком, який скачують після рафінування, для умов дослідженого підприємства запропоновані наступні заходи:

- з метою компенсації зниження температури при транспортуванні ковшу із розплавом до стенду десульфуратії (УДЧ) доцільним є збільшення вмісту кремнію в чавуні, зменшення інтенсивності теплового випромінювання з поверхні розплаву під час транспортування ковшу з доменного цеху та/або з міксерного відділення цеху за рахунок «ізоляції» поверхні ванни від атмосфери (використанням шару теплоізолюючої суміші);

- відпрацювання режиму обробки розплаву із гнучким співвідношенням реагентів, у тому числі зі зменшенням співвідношення СаО:Мg у суміші реагентів, яку вдувають у розплав у другій фазі обробки, з (3,8-4,5):1 до (2,3-3,0):1 з виключенням вдування вапна у третій фазі інжекції та впровадженням продувки ванни у вказаному періоді через сопла фурми тільки газом;

- відпрацювання режимів та способів коригування в'язкості та поверхневого натягу покривних шлаків у залежності від фази обробки розплаву;

- в умовах утворення під час проведення десульфуратії значної додаткової шлаку рекомендується обладнання заливального ковшу пористими пробками у днищі для вдування газу. Продувка ванни азотом через пробки (50-70 нм<sup>3</sup>/год) дозволить забезпечити підвищення швидкості операції видалення шлаку з поверхні ванни у шлакову чашу при скачуванні після обробки;

- забезпечення умов для запобігання утворення шлакових конгломератів та/або подрібнення кінцевого шлаку УДЧ з метою повернення у виробництво у якості металодобавки.

З метою оцінки можливості використання шлаків УДЧ за схемою виробничого реціклінгу проведена серія високотемпературних досліджень.

Використана методика планування експерименту. Зразки кінцевих шлаків УДЧ розплавляли у алунових тиглях у печі Таммана. Визначені особливості та режими вилучення заліза з кінцевих шлаків. Вихід заліза зі шлаків склав від 56,1% до 85,1%. Хімічний склад отриманих зразків заліза, %: 1,03-3,07 С; 0,10-0,47 Мn; 0,8-1,0 Si; 0,54-0,70 S.

Таким чином, існує доцільність розробки технології використання кінцевих шлаків УДЧ у якості добавки у металошихту, наприклад доменної плавки, з метою компенсації втрат заліза зі шлаками, які скачують після десульфуратії.



УДК 669.162

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ СИСТЕМИ «ПОКРИВНИЙ ШЛАК - РОЗПЛАВ»

**Кочмола Д. С., Сігарьов Є. М., д.т.н.**

**Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське**

Визначення характеру формування та розвитку барботажної зони, впливу масштабу потоків розплаву на глибину затягування шлаку  $Z_{шл}$  з поверхні вглиб рідкої металевої ванни при вдуванні газу скрізь заглибну обертову фурму проведено з використанням методики повного факторного експерименту на холодній моделі великовантажного заливального ковшу.

Після переведення до натуральних значень отримані математичні моделі для визначення впливу досліджених факторів на глибину затягування шлаку для односплової заглибної фурми мають вигляд:

- для діапазону швидкості обертання фурми від 0 до 90 об/хв.

$$Z_{шл} = -0.28 + 0.0215 \cdot n + 0.407 \cdot \delta + 0.4802 \cdot Q - 0.0082 \cdot n \cdot \delta - 0.0004 \cdot n \cdot Q + 0.5891 \cdot \delta \cdot Q + 0.00075 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (1)$$

- від 90 до 120 об/хв.

$$Z_{шл} = -0.28 + 0.0024 \cdot n + 0.4068 \cdot \delta + 0.4806 \cdot Q - 0.0021 \cdot n \cdot \delta - 0.0023 \cdot n \cdot Q + 0.589 \cdot \delta \cdot Q + 0.0032 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (2)$$

- від 120 до 240 об/хв. відповідно

$$Z_{шл} = -0.2798 + 0.028 \cdot n + 0.4068 \cdot \delta + 0.48 \cdot Q - 0.0001 \cdot n \cdot \delta - 0.0028 \cdot n \cdot Q + 0.5891 \cdot \delta \cdot Q + 0.0009 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (3)$$

Для двосплової заглибної фурми відповідні математичні моделі представлені виразами:

- для діапазону швидкості обертання фурми від 0 до 90 об/хв.

$$Z_{шл} = 0.6328 - 0.0068 \cdot n + 0.0257 \cdot \delta + 0.1673 \cdot Q + 0.0077 \cdot n \cdot \delta + 0.9702 \cdot Q \cdot \delta - 0.0068 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (4)$$

- від 90 до 120 об/хв.

$$Z_{шл} = 0.7 - 0.004 \cdot n + 0.032 \cdot \delta + 0.089 \cdot Q + 0.0072 \cdot n \cdot \delta + 0.0014 \cdot Q \cdot n + 0.969 \cdot \delta \cdot Q - 0.0069 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (5)$$

- від 120 до 240 об/хв.

$$Z_{шл} = 0.6225 - 0.0091 \cdot n + 0.0309 \cdot \delta + 0.1763 \cdot Q + 0.004 \cdot n \cdot \delta + 0.0049 \cdot Q \cdot n + 0.9645 \cdot \delta \cdot Q - 0.0048 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (6)$$

де:  $n$  – кількість об/хв.;  $\delta$  - товщина шлаку, мм;  $Q$  – витрата газу, л/хв.

Згідно до результатів чисельних експериментів, проведених з використанням отриманих моделей (1-6) до факторів, які мають найбільший вплив на глибину затягування шлаку у ковшову ванну можна віднести:

- при швидкості обертання заглибної фурми до 90 об/хв. швидкість обертання та товщину шару покривного шлаку;
- від 90 до 120 об/хв. - товщину шару шлаку;
- від 120 до 240 об/хв. - швидкість обертання фурми відповідно.

Встановлено, що максимальна глибина затягування шлаку у ванну (у досліджених діапазонах витрат газу), спостерігається при використанні стаціонарної фурми і підвищеній товщині покривного шлаку.

За умов сталої товщини шару шлаку і витрат газу при швидкості обертання фурми 90 об/хв. показник  $Z_{шл}$  майже у два рази менший ніж для стаціонарної фурми.

## ФОРМУВАННЯ ВІДКРИТОЇ ЗОНИ НА МІЖФАЗОВІЙ ГРАНИЦІ ПРИ КОВШОВОМУ РАФІНУВАННІ

Кочмола Д. С., Сігарьов Є. М., д.т.н.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

З метою з'ясування особливостей формування відкритої зони на міжфазовій границі «шлак-метал» ( $S_{\text{відн}}$ , %), гідрогазодинамічних і масообмінних особливостей та характеру формування і розвитку барботажної зони у об'ємі ванни при вдуванні газу скрізь обертову заглибну фурму провели серію експериментів на моделі великовантажного заливального ковшу.

Для врахування одночасного впливу швидкості обертання фурми ( $n$ ), товщини шару покривного шлаку ( $\delta$ ) та витрати газу ( $Q$ ) була використана методика повного факторного експерименту.

Отримані вирази для проведення чисельних досліджень, які для умов використання заглибної фурми з односопловим наконечником мають вигляд :

- для діапазону обертів фурми 0-90 об/хв.:

$$S_{\text{відн}} = -3,14 + 0,1237 \cdot n + 0,2927 \cdot \delta + 17,954 \cdot Q - 0,0007 \cdot n \cdot \delta + 0,1 \cdot n \cdot Q - 0,4 \cdot \delta \cdot Q + 0,0015 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (1)$$

- для діапазону 120-240 об/хв. відповідно:

$$S_{\text{відн}} = -3,29 + 0,0855 \cdot n + 0,2825 \cdot \delta + 17,818 \cdot Q - 0,006 \cdot n \cdot \delta - 0,016 \cdot n \cdot Q - 0,3918 \cdot \delta \cdot Q - 0,002 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (2)$$

Відповідні математичні моделі для заглибної фурми з двосопловим наконечником мають вигляд:

- для діапазону обертів фурми 0-90 об/хв.:

$$S_{\text{відн}} = -29,568 + 0,4577 \cdot n + 0,8438 \cdot \delta + 39,584 \cdot Q - 0,01338 \cdot n \cdot \delta - 0,2447 \cdot n \cdot \delta - 0,7715 \cdot \delta \cdot Q + 0,0068 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (3)$$

- для діапазону 120-240 об/хв. відповідно:

$$S_{\text{відн}} = -29,569 + 0,0216 \cdot n + 0,8438 \cdot \delta + 39,587 \cdot Q + 0,00072 \cdot n \cdot \delta - 0,0167 \cdot n \cdot Q - 0,7718 \cdot \delta \cdot Q + 0,00056 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (4)$$

На базі математичних моделей виконані дослідження зміни  $S_{\text{відн}}$  у залежності від швидкості обертання фурми, товщини покривного шлаку та витрат газу. Визначено неоднозначну залежність розмірів «ока», що утворюється на поверхні ванни від параметрів вдування газу та швидкості обертання фурми.

Необхідно відмітити, що вплив товщини шару покривного шлаку та швидкості обертання фурми у діапазонах 0-90 та 90-120 об/хв. менш виражений.

При збільшенні товщини покривного шлаку, витрати газу та швидкості обертання заглибної фурми геометричні параметри «ока» на поверхні ванни змінюються різнонаправлено. Так, збільшення витрати газу з 1,0 до 2,2 л/хв. для односоплової фурми призводить до зменшення площі «ока» при відповідному зростанні швидкості обертання фурми та товщини покривного шлаку.

Збільшення швидкості обертання фурми при витратах 2,2 л/хв. призводить до пропорційного збільшення площі «ока» при незначній кількості шлаку, а по ходу накопичення шлаку – до зменшення відповідного показника.

Для двосоплової фурми при мінімальній кількості шлаку на поверхні ванни розміри «ока» пропорційні швидкості обертання фурми, а при збільшенні товщини покривного шлаку спостерігається тенденція до зменшення розмірів вказаної відкритої зони.

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОДУВКИ ЗВЕРХУ ЧЕРЕЗ КОАКСІАЛЬНЕ СОПЛО

Т. С. Голуб, к.т.н., С. О. Дудченко

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро

У практиці кисневого конвертування основним елементом, що управляє, як і раніше є верхня киснева фурма, можливості якої, в більшій мірі, визначаються конструкцією наконечників, що відповідають за повноту використання потенційної енергії тиску дуття й інтенсивність перемішування ванни. У зв'язку з цим актуальними є напрямки досліджень щодо розробки нових конструкцій наконечників фурм та відповідних дуттєвих режимів, що підвищують інтенсивність і якість конвертерної продувки.

У ІЧМ НАНУ були проведені дослідження на фізичній моделі 160-т кисневого конвертера з верхньою продувкою в масштабі 1:28 щодо вивчення особливостей продувки рідкої ванни при використанні фурми з коаксіальним щілинним соплом, утвореним колами діаметром 6,0 мм і 5,42 мм (вибрано згідно подібності сумарної площини перетинів сопел на промисловому агрегаті з 5-ти сопловим наконечником з діаметром сопел 32 мм) шляхом зіставлення його газодинамічних параметрів з роботою циліндричних сопел (1, 3, 4 та 5 сопел з еквівалентної сумарною площею перетину сопел на зрізі) при тиску газу до 0,3 МПа, що забезпечує подібність промисловому варіанту інтенсивності продувки, й різних положеннях фурми.

Експерименти показали, в першу чергу, відмінність характеру профілю витікання струменя газу, що характеризується розширенням по довжині струменя, на відміну від звуження на відстані 5 - 15 калібрів профілю струменя з циліндричних сопел.

Аналіз динамічного напору струменя, який оцінювали за рівнем сили її впливу на модель із рідиною, що була розташована на чаші ваг, та характеризувалася зміною ваги моделі при продуванні при розташуванні наконечника фурми на рівні 12-16 калібрів (характерному для роботи промислових фурм) показав наступне. Зміна ваги моделі, яку продували через щілинне сопло, була аналогічна зміні ваги моделі при продуванні через одне циліндричне сопло, проте з меншим рівнем коливань. При порівнянні із продуванням через багато сопловий наконечник вплив струменя, що витікає зі щілинного сопла, був більш жорстким, особливо коли тиск продувального газу був більшим ніж 0,10 МПа, що проявлялося у більшій вазі моделі.

Дослідження інтенсивності звуку, що чинить струмінь газу при витіканні із різних сопел, показали наступне. При тиску продувального газу до 0,10-0,15 МПа інтенсивність звуку струменя зі щілинного сопла була менша за інтенсивність звуку з одно соплового циліндричного сопла, проте більша за інтенсивність звуку, що створювали багато соплові струмені. Коли тиск продувального газу був більшим за 0,15-0,20 МПа струмінь, який витікав із щілинного сопла, створював менш інтенсивний звук, ніж струмені, які витікали з інших дослідних наконечників.

Отже, при роботі досліджуваного щілинного сопла в умовах близьких до промислових було зроблено висновок, що такий струмінь повинен чинити інтенсивний (на рівні струменя, що витікає з одного сопла) вплив на ванну, проте з підвищеним рівнем інтенсивності, ступенем заглиблення та подрібнення й, ймовірно, перемішування ванни. На підтвердження вищесказаного виявлено, що при рівних положення фурми й дуттєвих умовах показники глибини занурення струменя, що витікає зі щілинного сопла, в рідину були приблизно в 1,24-1,37 рази більші у порівнянні із роботою струменя, що витікає з одного циліндричного сопла. Це можна пояснити залученням в газовий струмінь більшої кількості навколишньої атмосфери під час продування через щілинний наконечник, що також впливає з наведеного вище аналізу профілю струменя.

Також про це свідчать більш низькі результати втрат рідини за однаковий час продування при однаковому розташуванні фурми щодо поверхні рідини у порівнянні роботи струменя, що витікає зі щілинного сопла, та струменів, що витікають з інших дослідних сопел.

УДК 669.17.046.517В:669.046.52.001.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДИХ ДОБАВОК ПРИ КОВШОВІЙ ОБРОБЦІ РОЗПЛАВУ

Андрієвський Г.О., м.н.с., Піптюк В.П. с.н.с. к.т.н., Греков С.В. н.с.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Раніше було здійснено теоретичне прогнозування властивостей феросплавів Mn, Si, Cr, Nb, V, W та ін. матеріалів, що дозволило отримати відсутні знання для них, з огляду на те що відповідної інформації в літературі було недостатньо. З'явилась можливість виконувати чисельні, експериментальні та дослідно-промислові дослідження різних етапів і способів позапічної обробки з метою оцінки ефективності застосування твердих добавок, у тому числі феросплавів.

Виконана дослідно-промислова перевірка ефективності використання кускових Mn-вмістких феросплавів (марки ФМн78 і СМн17) на УКП при введенні в ківш ємкістю 60т в умовах сталеплавильного цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь» при виробництві якісної сталі поточного марочного сортаменту. Висока узгодженість розрахункових і експериментальних даних по вмісту Mn у пробах металу свідчить про достатню для інженерних і наукових розрахунків збіжність та адекватності отриманих результатів за допомогою програмного забезпечення процесу, що моделюється, останньої версії. Зіставляються розрахункові дані з власними експериментальними даними гарячого фізичного моделювання, що проводилось у ІЧМ НАНУ, а також на базі лабораторного комплексу ДДТУ (м. Кам'янське). У якості добавок використовували такі матеріали: феросиліцій марок ФС45 та ФС65, графіт, коксик, феротитан ФТі30, алюміній первинний. Адекватність умов забезпечувалась тим, що індуктор під час гарячого фізичного моделювання вимикався (статичний стан) і розрахунки здійснювались в аналогічному статичному стані.

Чисельно досліджена тривалість плавлення феросплавів марок ФМн78, ФС65 і МнС17 з різним вмістом провідних елементів. Визначено, що зниження тривалості плавлення феросплаву, а, отже, підвищення ефективності його використання, при введенні в ківш на УКП забезпечується, головним чином, за рахунок зміни вмісту в ньому провідного елемента (чим менше його зміст, тим швидше протікає процес плавлення).

Для підвищення технологічності використання в сталеплавильному виробництві за допомогою зазначених розробок по прогнозуванню властивостей феросплавів стандартних марок здійснено прогнозування комплексу властивостей нових складів нестандартних феросплавів з поліпшеною технологічністю для легування і мікролегування електросталі. Теоретично обґрунтована можливість підвищення їх ефективності при застосуванні.

У напрямку пошуку ефективного використання дрібнофракційного матеріалу, що не реалізується у феросплавному виробництві, представлені результати лабораторного випробування брикетів дрібнофракційного феросиліцію ФС65 з добавкою обважнювача при виробництві сталі. Оцінені характеристики, а також тривалість і умови плавлення брикетів. Надано рекомендації щодо використання брикетів у виробництві сталі.

В даний час здійснюється пошук раціональних місць і режимів введення феросплавів у вигляді кусків, дроту, інжекції для різних способів позапічної обробки. Раніше всі процеси з оцінки ефективності використання феросплавів розрахунковим методом враховували одну гранулу, а будуть – порційне введення, що більше відповідає реальним умовам.

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОАГРЕГАТИВ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМАХ РЕЗЕРВНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

А.О. Рожкевич, магістр, Л.І. Книш, д.т.н.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Вітроенергетичні установки знаходять все більше розповсюдження в багатьох галузях промисловості та сільського господарства, формуючи при цьому новий перспективний напрям сучасної енергетики. Більшість районів України мають низький вітровий потенціал, що суттєво обмежує використання промислових горизонтально-осьових вітроагрегатів. Такі станції успішно функціонують лише в прибережних районах Чорного та Азовського морів, в деяких районах Карпат. Останнім часом спостерігається значний інтерес до автономних вітроенергетичних систем різного типу, які здатні генерувати електричну енергію при низьких швидкостях вітру. До таких систем відносяться вертикально-осьові вітроагрегати, проектних рішень яких існує безліч. Вертикально-осьові вітроагрегати можуть входити до комплексних автономних систем (сонячно-вітрових та ін.) енергозабезпечення або бути складовою частиною систем резервного енергопостачання великих промислових, сільськогосподарських та побутових споживачів.

Різноманітність проектних рішень вертикально-осьових вітроагрегатів створює додаткові труднощі під час їх дослідження. Чисельні моделювання вітротурбін, яке базується на рішенні рівнянь Нав'є-Стокса, практично не застосовується на практиці. Експериментальний підхід з використанням реальної моделі є надто коштовним. Вочевидь, найбільш придатним методом отримання основних проектних параметрів вертикально-осьових вітроагрегатів є інженерний метод, що базується на використанні імпульсної теорії.

Дводискову імпульсну модель було покладено в основу даного дослідження. Втрати імпульсу потоку, що проходить крізь ометаєму площу вітротурбіни, пов'язується зі середньою за часом сумарною аеродинамічною силою, яка діє на лопаті та визначається через аеродинамічні коефіцієнти профілю. Математична модель при цьому зводилась до системи трансцендентних рівнянь для визначення компонентів індукованих швидкостей. Після визначення індукованих швидкостей енергетичні характеристики розраховувались на основі чисельного інтегрування значень сил та моментів, що діють на лопаті, в залежності від азимутального кута.

Особливо слід зазначити, що розрахунок неможливе провести без даних щодо аеродинамічних коефіцієнтів профілів лопаті вітроагрегату, більш того ці значення необхідні у всьому діапазоні кутів атак. Такі дані можливо отримати лише експериментально, вони є власністю наукових центрів, публікації про них у науковій літературі уривчаті та неповні. Питання стоїть особливо гостро під час проектування вітротурбін нових геометричних форм, значення аеродинамічних коефіцієнтів для яких невідомо.

Математична модель, що запропонована, була реалізована під час розрахунку типового вертикально-осьового вітроагрегату з профілем лопаті NASA0018. Уточнення значень аеродинамічних коефіцієнтів даного профілю для всіх кутах атаки проводилось на основі натурних експериментів в аеродинамічній трубі Т-5. В результаті комп'ютерного моделювання отримані типові енергетичні параметри вітроустановки, що досліджувалась, визначено вплив її геометричних параметрів на загальні показники ефективності.

УДК 519.6

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДВОХ РІЗНИЦЕВИХ СХЕМ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

**Попов І.В., студент групи ПС-14-1**  
**науковий керівник: Бойко Л.Г. к.ф.-м.н., доц.**  
**кафедра обчислювальної математики та математичної кібернетики**

**Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро**

Розглядається одновимірне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} + f_0(x, t), \quad (x, t) \in G. \quad (1)$$

Тут  $f_0(x, t)$  – відома в області  $G$  функція, де  $G = \{(x, t) \mid 0 < x < 1; 0 < t \leq t_{\max}\}$ ,  $T(x, t)$  – шукана функція (температура),  $x$  – просторова координата,  $t$  – часова координата.

Розв'язок диференціального рівняння (1) повинен задовольняти такі додаткові умови.

Початкова умова:

$$T(x, 0) = f_1(x), \quad 0 \leq x \leq 1, \quad (2)$$

де  $f_1(x)$  – відома функція на відрізку  $0 \leq x \leq 1$  при  $t = 0$ .

Дві крайові умови:

$$T(1, t) = f_2(t), \quad 0 \leq t \leq t_{\max}. \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = f_3(t). \quad (4)$$

Тут  $f_2(t)$ ,  $f_3(t)$  – відомі функції на відрізку  $0 \leq t \leq t_{\max}$ .

Функції  $f_1(x)$ ,  $f_2(t)$ ,  $f_3(t)$  в (2), (3), (4) такі, що виконується узгодженість початкової та крайових умов:

$$f_3(0) = f_1'(x)|_{x=0}; \quad f_2(0) = f_1(1). \quad (5)$$

Задача (1) – (5) розв'язується методом сіток з використанням явного та неявного шаблонів. Порівнюються переваги та недоліки кожної із різницьових схем.

Для чисельної реалізації алгоритмів методу сіток розроблена комп'ютерна програма, яка написана мовою C# в середовищі візуальної розробки програм MS Visual Studio 2013. Робота програми перевірена на тестовому прикладі, результати очікувані. Програма дозволяє виводити шукану функцію  $T(x, t)$  на екран комп'ютера або у табличному вигляді, або з використанням методів візуалізації даних.

## ПРЯМА ТА ОБЕРНЕНА ЗАДАЧІ В МОДЕЛІ «ЧОРНА СКРИНЯ»

**Конончук А. А., студентка групи ПС-14-1**  
**науковий керівник: Бойко Л. Т., к.ф.-м.н., доц.**  
**кафедра обчислювальної математики та математичної кібернетики**

**Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро**

При вивченні складних процесів, коли немає можливості знайти внутрішні зв'язки в системі, в системному аналізі використовується модель «чорної скрині». Суть моделі полягає в тому, що, не маючи інформації про внутрішню структуру процесу, для його математичного опису використовують лише залежність вихідних величин від вхідних. Модель «чорної скрині» виявляється вельми корисною при заміні однієї системи іншою, що функціонує аналогічним чином.

Нехай на об'єкт, що вивчається, посилаються деякі сигнали  $a_j \in (\alpha_j, \beta_j)$ ,  $j = \overline{2, n}$ . Реальний об'єкт перетворює ці сигнали в деякий результат  $b \in (\gamma, \delta)$ . Припускається стаціонарність реального процесу, та відсутність взаємозв'язку між різними його реалізаціями. Отже, реальний об'єкт (чорна скриня) встановлює відповідність

$$b = f(a_2, a_3, \dots, a_n). \quad (1)$$

Аналітичний вигляд функції  $f(a_2, a_3, \dots, a_n)$  є невідомим. Відомими є лише сигнали на вході та на виході. Відомі також проміжки, яким належить кожен із сигналів. В залежності (1) дослідників реального процесу можуть цікавити такі задачі:

- по відомих значеннях сигналів на вході прогнозувати (передбачати) значення відгуку  $b$  (**пряма задача**);
- по відомому значенню результату  $b$  прогнозувати (передбачати) значення сигналів  $a_j$ ,  $j = \overline{2, n}$ ,  $n \geq 2$ , які приводять до такого результату (**обернена задача**).

Щоб розв'язати ці задачі потрібно знати залежність (1) в аналітичному вигляді, для цього будуємо наближену математичну модель реального процесу. Для побудови наближеного аналітичного вигляду функції  $f(a_2, a_3, \dots, a_n)$  проводяться  $m$  реальних експериментів, в результаті яких маємо таблицю значень  $\{a_{ij}, j = \overline{2, n}; b_i\}_{i=1}^m$ . Далі, відповідно обраної апроксимації (лінійної, квадратичної тощо) будується система, яка є некоректною за Адамаром.

Оскільки обидві задачі є некоректними, для їх розв'язування застосовувався метод регуляризації Тихонова. Дослідження по математичному моделюванню реальних процесів, що обговорюються в даних тезах, є продовженням досліджень, початих в роботі [1].

Розроблена програма (мовою C#), яка реалізує алгоритми розв'язування прямої та оберненої задач. Таблиця значень, отримана з експериментів, зчитується з excel-файлу. При побудові аналітичного вигляду (1) виводиться діаграма дисперсії для перевірки точності результатів, добутих за допомогою комп'ютерної програми. Правильність роботи програми була перевірена на тестових прикладах. В якості тестових прикладів були розглянуті такі варіанти реальних процесів: лінійний, квадратичний, кубічний. Для цих варіантів реальних процесів будувалися такі варіанти прогнозних моделей: лінійний, квадратичний. Результати роботи програми є правдоподібними.

1. **Бойко Л.Т.** Програмна реалізація алгоритму в задачі обробки експериментальних даних [Текст] / Л.Т. Бойко, Є.М. Гончаров // Тези доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем MPZIS-2017». – Дніпро, 22-24 листопада 2017 р. – С. 30-31.

## ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Снігура І. Р., аспірант, Тогобицька Д. М., д.т.н., проф.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Покращення якості сталі та, як наслідок, підвищення споживчих властивостей металопродукції являється одним з головних та актуальних питань чорної металургії. Розробка нових і вдосконалення прийнятих технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесів розкислення, мікролегування, доводки сталі за хімічних складом, пов'язана з вивченням кінетики плавлення та засвоєння легуючих елементів. Системний аналіз технології виробництва сталей та сплавів спеціального призначення з контролем якості металу сучасними методами та розробка і впровадження комп'ютерних систем наскрізної технології одержання металопродукції, фізико-хімічного моделювання розплавів та їх взаємодії в системі «метал-шлак» дозволять забезпечити теоретичну основу для підвищення ефективності виробництва сталей та раціонального використання дорогих легуючих і мікролегуючих елементів.

Одним із ефективних способів підвищення якості сплаву являється прогнозування комплексу його теплофізичних властивостей (температура ліквідус і солідус, густина, мікронеоднорідність, в'язкість, поверхневий натяг, електропровідність та інші), що дозволить провести оперативну оцінку засвоєння добавок, які вводять у металевий розплав. Раніше нами були розроблені моделі для прогнозування температур плавлення та кристалізації, густини як однокомпонентних розплавів, так і залізобілезцевих сталей, жароміцних нікелевих сплавів, алюмінієвих та магнієвих сплавів з високою точністю прогнозу та урахуванням їх індивідуальних особливостей, на основі експериментальних даних, шляхом математичного моделювання з урахуванням параметрів міжатомної взаємодії, які характеризують хімічний і структурний стан досліджуваних систем.

Розроблені моделі пройшли апробацію шляхом співставлення з широко відомим зарубіжним спеціалізованим комп'ютерним комплексом JMatPro за сприянням вчених Падерборнського університету (Німеччина), що підтвердило їх адекватність для прийняття рішень по управлінню температурним режимом плавки. Слід зазначити, що для вибірки даних температур плавлення і кристалізації жароміцних нікелевих сплавів спостерігається значна неузгодженість розрахунків з використанням програми JMatPro на відміну від запропонованих моделей на основі оригінальної концепції спрямованого хімічного зв'язку.

У представленій роботі зосереджено увагу на хромонікелевих сталях з вмістом основних легуючих елементів Cr, Ni від 0 до 30%, які є одними з найбільш затребуваних на вітчизняних і зарубіжних ринках сталеплавильної продукції. Використання концепції спрямованого хімічного зв'язку дозволило розробити напівемпіричні моделі для прогнозування температур плавлення і кристалізації, які мають вид:  $T_L, T_S = f(Z^y, d, \text{tg}\alpha)$  з коефіцієнтом детермінованості  $R^2 \geq 0.9$ .

Ґрунтуючись на особливостях будови металевих розплавів висунута гіпотеза про підхід до вибору легуючих добавок з урахуванням їх плавкості та мікронеоднорідності, що дозволить уникнути невиправданого перегріву металу і підвищити ступінь засвоєння добавки. На прикладі, сталі марки 14X17H2 з метою запобігання сегрегації кластерів в її розплаві та підвищення службових властивостей готової металопродукції, показана ефективність застосування поєднання у вигляді феросплавів чи комплексних лігатур наступних легуючих елементів: бору, молібдену та інших.

Результати досліджень рекомендуються до використання в промислових умовах з метою науково-обґрунтованого вибору легуючих добавок і спрямованого формування кінцевого продукту, що забезпечить зниження енергетичних витрат за допомогою інтеграції розроблених моделей в АСУТП сталеплавильного виробництва.



УДК 669.162.21.: 662.6/9.

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПИЛЕВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ ПОВНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ**

**Москалина А. О., Сохацький О. А., Чайка О. Л.**

**Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова, м Дніпро**

Енергетичні методи розрахунку ґрунтуються на енергетичних балансах технологічних процесів, виробництв, підприємств і є необхідною інформаційною базою, яка забезпечує наукову підтримку вибору керуючих рішень по створенню сучасної системи управління енергією при виробництві металу.

Розроблений метод повного енергетичного балансу стосовно до доменної плавки, який включає в себе спільний розрахунок і розгляд матеріального, теплового та ексергетичного балансів, дозволив уточнити вплив параметрів дутцевого режиму, теплових втрат, властивостей шихтових матеріалів і паливних добавок на теплоенергетичні, ексергетичні, екологічні та техніко-економічні показники доменної плавки [1].

Дослідження впливу застосування пиловугільного палива (ПВП) і природного газу на розподіл матеріальних, теплоенергетичних і ексергетичних потоків в печі, і їх вплив на показники доменної плавки виконані з використанням розробленої методики складання повного енергетичного балансу за даними роботи доменних печей ПАТ «МК «Азовсталь», ПАТ «Запоріжсталь», ПрАТ «ММК ім. Ілліча», ПАТ «АМК», ПАТ «АМКР».

Виконані дослідження дозволили уточнити закономірності і дати кількісну оцінку впливу марок вугілля та хімічного складу ПВП на теплоенергетичні, ексергетичні, екологічні та техніко-економічні показники доменної плавки. Встановлено, що найбільший вплив на розвиток теплообмінних та відновних процесів по висоті печі, витрати коксу, температуру в фурменій зоні доменної печі робить вміст вуглецю та водню в ПВП, оптимальним варіантом є використання ПВП, приготовлених з суміші малозольного вугілля з багатим вмістом вуглецю та водню.

З використанням методу повного енергетичного балансу виконувалися розрахунки проектних показників роботи доменної печі після їх реконструкції, розроблені рекомендації по вибору енергоефективних режимів доменної плавки з застосуванням різних паливних добавок та їх комбінацій, виконана оцінка енергоефективності роботи системи «доменна піч – кисневий конвертер» при застосуванні ПВП та природного газу, зміні вмісту кремнію та температури чавуну.

### **Список літератури**

1. А. с. № 73905 України. Методика расчета. Полный энергетический баланс доменной плавки / Бородулин А.В., Чайка А.Л., Сохацкий А.А., Москалина А.А. Заявл. № 73841 15.05.17. Регистр. 25.09.17

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛО-ГАЗОДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ ФУРМЕНОЇ І КОЛОШНИКОВОЇ ЗОН ДОМЕННОЇ ПЕЧІ З ВДУВАННЯМ В ГОРН ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА І ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Корнілов Б. В., Чайка О. Л., Шостак В. Ю.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Досвід освоєння пиловугільного палива (ПВП) на доменних печах України середнього об'єму 1500 ÷ 3000 м<sup>3</sup> в 2009-2018 роках і дослідження, проведені фахівцями ІЧМ НАНУ, показали, що перехід доменних печей від вдування природного газу до застосування ПВП призводить до зміни умов протікання тепло-газодинамічних процесів, що відбивається на збільшенні теплових навантажень на повітряні фурми і шахту, на їх термін служби, стійкості газодинамічного режиму плавки, рівності ходу печі і її техніко-економічних показниках.

Метою роботи є вдосконалення тепло-газодинамічної роботи фурменої і колошникової зон доменної печі при вдуванні в горн пиловугільного палива і природного газу шляхом розробки критеріїв і методів, спрямованих на стабілізацію і забезпечення раціонального енергозберігаючого режиму виробництва чавуну.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- виконати аналіз існуючих методів контролю і критеріїв оцінки стійкості тепло-газодинамічного режиму роботи доменної печі;
- розробити критерій оцінки ефективності згоряння пиловугільного палива в фурменому вогнищі з урахуванням стійкого протікання тепло-газодинамічних процесів в системі ТВД - фурмене вогнище.
- виконати аналітичні та чисельні дослідження закономірностей розвитку тепло-газодинамічних процесів вільної від шихти області колошника, з урахуванням виносу пилу і їх зіставлення з техніко-економічними параметрами роботи;
- розробити критерій оцінки газодинамічної роботи колошникової зон доменної печі, що дозволяє виконати оцінку рівності ходу доменної печі;
- удосконалити метод оцінки коефіцієнта заміни коксу ПВП і природним газом;
- обґрунтувати методуку та виконати оцінку раціональності обраного тепло-газодинамічного режиму доменної печі на основі виконаних аналітичних і чисельних досліджень і розроблених критеріїв.

За результатами виконаних досліджень отримані такі наукові результати:

**1. Розроблено метод і критерій оцінки ефективності згоряння пиловугільного палива в фурмені вогнищі, на підставі яких реалізована модель розрахунку, що дозволяє якісно і кількісно оцінювати час повного згоряння і переміщення від пальника вугільної частинки в фурмені вогнищі при зміні дуттєвих параметрів (температура, витрата і швидкість дуття), параметрів ПВП (фракційний та хімічний склад) і витрати природного газу.** Встановлено закономірності та дана кількісна оцінка впливу параметрів дуття, ПВП і природного газу на горіння вугільної частинки в фурменому вогнищі. Показано, що зменшити час повного горіння вугільної частинки та її переміщення від пальника дозволяє: збільшення температури дуття; зменшення фракції вугільного пилу; збільшення вмісту летких в ПВП; зменшення витрат дуття; збільшення витрат природного газу; зменшення швидкості дуття практично не впливає на час повного горіння вугільної частинки, але зменшує її переміщення від пальника.

**2. Розроблено метод прогнозу і встановлено вплив конструкції колошника, розподілу газового потоку, виходу доменного газу, температури і його тиску у вільній від шихти зони колошника на виніс колошникового пилу, рівність ходу печі і техніко-економічні показники плавки.** В процесі розробки отримано, що техніко-економічні показники плавки і стійкість газодинамічного режиму роботи печі взаємообумовлені з показниками роботи колошника: тиском, витратою і температурою колошникового газу. Узагальнюючим показником роботи вільної від шихти зони колошника є швидкість колошникового газу, яку доцільно

контролювати в автоматизованому режимі і підтримувати на оптимальному рівні керуючими впливами «знизу» - змінюючи витрату і склад дуття, і «зверху» - тиск під колошником.

**3. Запропоновано критерій і вдосконалений метод оцінки коефіцієнта заміни коксу різними марками ПВП, природним газом і їх сумішшю.** Встановлено, що коефіцієнт заміни коксу природним газом і пиловугільним паливом залежить від масової частки вмісту вуглецю і водню в суміші.

**4. Удосконалено модель розрахунку і встановлено вплив витрати ПВП і природного газу на стійкість тепло-газодинамічної роботи фурмені вогнища.** Встановлено, що з стійкому газодинамічному режиму роботи фурменної зони сприяє стабільність подачі і щільності потоку ПВП, зменшення колової нерівномірності подачі ПВП та природного газу, збільшення обсягу фурмених вогнищ.

**Практичну цінність роботи складають:**

1. Метод розрахунку і критерій оцінки ефективності повноти згоряння пиловугільного палива в фурменому вогнищі, який дозволить здійснювати вибір раціонального дуттєвого режиму, який забезпечує повноту спалювання ПВП в залежності хімічного і фракційного складу вугілля, застосування природного газу для забезпечення високої ефективності доменної плавки.

2. Раціональний вибір відношення витрат пиловугільного палива і природного газу в горн доменної печі на основі критерію оцінки коефіцієнта заміни коксу пиловугільним паливом, природним газом і їх сумішшю.

3. Метод оцінки стійкості і управління тепло-газодинамічних режимом роботи доменної печі, в основі якого лежить підтримка швидкості колошникового газу в раціональному діапазоні.

4. Удосконалення конструкції колошника за рахунок вибору раціонального перерізу газовідводів і місця їх врізки на етапі проектування і оцінка їх впливу на газодинамічний режим доменної печі.

УДК 669.162.2:669.162.211.4.008.6

## **ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ І ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ НА ПІДСТАВІ НОВИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТИКИ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ТА РОЗПАЛУ ШАХТИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ**

**Цюпа К. С., Чайка О. Л., Шостак В. Ю.**

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м Дніпро**

Перехід на технологію вдування пиловугільного палива (ПВП) зменшує ресурс роботи футерівки і систем охолодження доменних печей. Для тривалого виробництва чавуну із застосуванням ПВП потрібен сучасний підхід до вибору профілю, футерівки та конструкції охолодження печі, систем контролю за її технічним станом і тепловою роботою.

Автоматизований контроль теплових процесів, що протікають в огорожі доменної печі, а також контроль технічного стану футерівки і наявності на ній гарнісажу, в доменному цеху ПАТ «Запоріжсталь» дозволили вперше отримати унікальну інформацію про вплив технології доменної плавки і конструкції доменних печей на збільшення теплових втрат, закономірності їх розподілу по зонах печі, перевитрата коксу на їх покриття, збільшення питомих теплових навантажень, передчасний вихід з ладу футерівки, холодильних плит і кожуха доменної печі.

Величина теплових втрат в системі охолодження доменних печей є одним з інтегральних показників ефективності конструкції печі і технології плавки з точки зору наявності резерву зменшення витрат коксу і умовного палива на виплавку чавуну, збільшення тривалості кампанії печі. За даними досліджень виконаних в ДЦ ПАТ «Запоріжсталь» збільшення теплових втрат на кожен 1 МВт призводить в середньому до збільшення витрати скіпового коксу на  $\sim 2,5$  кг/т чавуну або на  $\sim 0,7\%$ . На покриття теплових втрат витрачається від 10 до 45 кг/т чавуну і більше в залежності від конструкції і технічного стану печі, завантаження і технології ведення плавки. Збільшення витрати ПВП з 140 до 160 кг/т і більше чавуну на доменних печах ПАТ «Запоріжсталь» призводить до інтенсифікації процесів руйнування футерівки і, як наслідок, до збільшення теплових втрат на 2 – 4 МВт і збільшення витрати коксу на їх покриття на 5 – 10 кг/т чавуну.

Найбільші питомі теплові навантаження відповідають найбільш схильною до руйнування футерівки зоні, якій при вдування ПВП, є розпар і нижня частина шахти. Залежно від матеріалу футерівки і конструкції системи охолодження, питомі теплові навантаження в нижній частині шахти знаходяться в межах від  $5 \text{ кВт/м}^2$  (торкретбетон і чавунні холодильні плити) до  $60 \text{ кВт/м}^2$  (карбідкремнієві вогнетриви і мідні холодильні плити); у верхній частині шахти, що охолоджується чавунними холодильними плитами – від  $0,8 \text{ кВт/м}^2$  (ШПД) до  $5 \text{ кВт/м}^2$  (торкретбетон). При руйнуванні футерування питомі теплові навантаження можуть збільшуватися в два і більше разів і можуть досягати  $120 \text{ кВт/м}^2$  і більше в тонкостінній високотеплопровідній футеровці. Також показником розпаду футерівки є збільшення її температури, яка в нижній частині шахти і розпарі може досягати  $>1200^\circ\text{C}$ . За даними систем автоматизованого контролю середня товщина гарнісажу має тенденцію до зменшення у напрямку від верхньої до нижньої частини шахти, тобто має тенденцію зворотню розподілу питомих теплових навантажень. Середня товщина гарнісажу змінюється в межах від 20 мм (розпар) до 300 мм (верхня частина шахти).

Завдяки реалізації систем автоматизованого контролю вперше отримані фактичні значення розподілу температури на робочій поверхні футерівки шахти, що дозволило оцінити можливість утворення на ній гарнісажу в залежності від фізико-хімічних властивостей шихтових матеріалів.

Аналіз динаміки руйнування футерівки шахти на доменних печах ПАТ «Запоріжсталь» різної конструкції до і після проведення відновлювальних ремонтів показав, що застосування комбінованих систем охолодження з використанням мідних холодильних плит і високотеплопровідної карбідкремнієвої футерівки в нижній частині шахти дозволило збільшити ресурс роботи шахти доменних печей в порівнянні з «традиційною» конструкцією, призначеною під технологію вдування природного газу. Проте, тенденція негативного впливу від збільшення витрати ПВП на технічний стан футерівки зберіглась.

УДК 669.162.2.001.5

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОФІЛЮ ВИДУТИХ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ТА ЇХ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ**

**Шостак В. Ю. аспірант, м. н. с, Лебідь В. В., н. с.,  
Чайка А. Л., к. т. н., с. н. с, Жеребецький А. А., н. с.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

В ході експлуатації доменної печі, особливо при форсованому режимі плавки з застосуванням ПВП, відбувається руйнування футеровки і системи охолодження, що призводить до втрати виробництва, перевитрати коксу і необхідності проведення відновного ремонту печі. Ресурс роботи печі, швидкість руйнування її футеровки і системи охолодження безпосередньо залежить від конструкції профілю та системи охолодження, властивостей футеровки.

Тому, практичний інтерес представляє дослідження профілю видутих доменних печей з метою визначення впливу конструкції профілю печі, технології ведення плавки і сировинних умов на характер зносу футеровки і системи охолодження.

Для оцінки величини зносу футеровки і системи охолодження видутих доменних печей запропонований і реалізований на 5-ти видутих на відновний ремонт доменних печах ПАТ «Запоріжсталь» і ПрАТ «МК» Азовсталь » оригінальний інструментальний метод лабораторії ТЕТ ІЧМ по вимірюванню профілю.

За результатами дослідження профілю видутих доменних печей встановлені особливості руйнування різних типів футерування і систем охолодження доменних печей, а також дана оцінка впливу технології та профілю доменних печей на особливості утворення гарнісажу, характер руйнування системи охолодження по висоті і периметру печі.

Виконано порівняння фактично отриманих даних по інструментальним вимірам з показаннями систем автоматизованого контролю зносу футеровки (розробки лабораторії ТЕТ ІЧМ), встановлених на деяких досліджуваних печах.

Встановлено вплив нерівномірності розподілу паливних добавок, теоретичної температури, на окружну нерівномірність руйнування футеровки по висоті доменної печі.

УДК 669.17.046.517В : 669.187.25

**ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЙ  
ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОГО РАФИНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛИ В УСЛОВИЯХ  
ООО «МЗ«ДНЕПРОСТАЛЬ»**

**Климчик Ю.В.<sup>1</sup>, Чайка А.Д.<sup>1</sup>, Гасик М.И.<sup>2</sup>, Горобец А.П.<sup>2</sup>,**

**1 Управление научно-исследовательских работ и технологии процессов,  
ООО «Интерпайп Украина», 49000, г. Днепр, ул. Писаржевского 1а, Е-  
mail: info@ua.interpipe.biz**

**2 Национальной металлургической академии Украины, 49000, г. Днепр,  
просп. Гагарина 4. Е-mail: nmetau@nmetau.edu.ua**

В соответствии с действующей на ООО«МЗ«Днепросталь» проектной технологии производства стали, переданной компанией Danieli, выплавка металла-полупродукта в ДСП-190 с внепечной обработкой в ковше 160 тонн, твердыми шлакообразующими материалами (ТШМ), в составе которых предусмотрено применение импортного и дорогостоящего плавикового шпата. Это повышает затраты на внепечное рафинирование стали и ставит в зависимость все этапы сквозной технологии выплавки и разливки электростали от импортного плавикового шпата, поставляемого в основном из Китая.

Технологической особенностью сформированного шлакового расплава является нестабильность его состава по содержанию  $\text{CaF}_2$ , обусловленного повышенной летучестью фтора и его соединений в течение 40-90 мин обработки металла на ковше-печи. При этом содержание  $\text{CaF}_2$  в шлаке существенно снижается по сравнению с первоначальным, что уменьшает жидкоподвижность шлаковой системы и, как следствие, ограничивает протекание массообменных процессов в системе металл-шлак.

В условиях ООО «МЗ«Днепросталь» проведено опытно-промышленное производство электростали с обработкой металла-полупродукта в сталеразливочном ковше. Опытные плавки по получению металла полупродукта проводились по действующей технологии (ТИ ИС 005-01-2015). Внепечная обработка металла выполнена с присадкой в стальковш на выпуске из ДСП ферросплавов (ФС65, МнС17, ФМн78), в количестве определенном требованиями химического состава стали, и ТШМ с применением щелочного алюмосиликата – пегматита. Содержание кислорода в металле-полупродукте на выпуске было в пределах 600-900ppm. Первичное раскисление стали выполняли присадкой алюминия 120-140 кг на плавку, в зависимости от показателя окисленности металла.

Последующая обработка стали происходила на установке ковша-печи (УКП). Пробы для определения химического состава стали отбирали при выпуске металла-полупродукта из печи, из ковша при обработке металла и после окончания обработки стали на УКП. Данные об изменении содержания серы в металле при выпуске из печи ДСП-190 и по окончанию внепечной обработки стали опытных плавков приведены в таблице.

**Таблица** Исходное  $[S]_{\text{исх}}$  и конечное  $[S]_{\text{кон}}$  содержание серы и степень десульфурации стали ( $\eta_S$ , %) по ходу внепечной обработки металла опытных плавков с использованием пегматита и действующей технологии с применением плавикового шпата

Технологический вариант	Кол-во плавков, шт	$[S]_{\text{исх}}$ , ppm	$[S]_{\text{кон}}$ , ppm	$\eta_S$ , %
С применением пегматита	242	$\frac{330 \dots 520}{430}$	$\frac{20 \dots 90}{60}$	87,0
Действующая технология	50	$\frac{370 \dots 540}{440}$	$\frac{20 \dots 70}{40}$	90,9

*Примечание.* В числителе приведено минимальное и максимальное содержание в металле серы соответственно, в знаменателе – среднее.

Как следует из данных таблицы, степень десульфурации стали опытных плавов с пегматитом в основном не отличалась от показателя десульфурации стали действующей технологии с применением плавикового шпата.

Подтвержден эффект влияния  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в составе шлаков системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 + (\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})$  на реологические характеристики шлакового расплава (снижение вязкости, снижение температуры начала кристаллизации). В отличие от  $\text{CaF}_2$  указанные оксиды щелочных металлов образуют соединения с оксидными компонентами шлака, ускоряя растворение извести. При этом снижается испарение оксидов щелочных металлов и обеспечивается стабильность состава рафинировочного шлака в течение обработки металла на УКП.

На основании опытно-промышленного освоения, разработана новая импортозамещающая технология внепечной обработки электростали с применением ТШМ, содержащих щелочной-алюмосиликат (пегматит), что исключает использование дорогостоящего плавикового шпата.

## ОСВОЄННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЗАПІЧНОГО РАФІНУВАННЯ СТАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛУЖНОГО АЛЮМОСИЛКАТУ (ПЕГМАТИТУ)

Яковицький О.В.<sup>1</sup>, Степаненко Д.О., к.т.н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПрАТ «Дніпроспецсталь», м. Запоріжжя,

<sup>2</sup>Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Діюча на ПрАТ «Дніпроспецсталь» технологія позапечної обробки сталі на УКП-60 відповідно до технологічних інструкцій визначає склад твердих шлакоутворюючих матеріалів (ТШМ) для формування шлаку на стадії позапечної обробки сталі. Технічний регламент визначає нормативи витрат суміші  $\approx 10$  кг / т сталі при співвідношенні компонентів суміші вапно / плавиковий шпат рівний 3/1. Компонентом шлакової суміші, що визначає реологічні властивості шлаку (в'язкість) і в значній мірі впливає на кінетику масообмінних процесів на межі метал / шлак, є імпортований плавиковий шпат.

При аналізі впливу фториду кальцію, що міститься в шлаках позапечної обробки сталі, відзначають позитивний вплив на зниження температури його плавлення і, відповідно, в'язкості ковшових шлаків, що формуються з твердих шлакоутворюючих матеріалів. До недоліків відноситься висока ціна імпортованого плавикового шпату, негативний вплив  $\text{CaF}_2$  і фторидних летючих з'єднань на навколишнє середовище.

Техніко-економічні особливості використання плавикового шпату (нестабільність складу рафінувального шлаку УКП, висока вартість імпортованої сировини, утворення летючих фтористих з'єднань) визначають необхідність пошуку компоненту шлакоутворюючої суміші, альтернативного плавиковому шпату, який забезпечував би високу десульфуруючу здатність, відповідну в'язкість, знижував рівень виділення шкідливих сполук і був заміною імпортованої мінеральної сировини.

В умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь» в період 2014-2018 рр. проведена науково-дослідна робота (НІР) за участю фахівців заводу Дніпроспецсталь, науковців Національної металургійної академії України та Інституту чорної металургії НАН України по заміні плавикового шпату лужним алюмосилкатом – пегматитом Єлісеєвського родовища (с. Єлісеївка, Приморський р-н, Запорізька обл.) при позапечній обробці сталі на установці ківш-піч. За період проведення НІР було вивлавлено більш ніж 120 дослідних плавок різного марочного сортаменту конструкційних та інструментальних сталей.

Підтверджено ефект впливу  $\text{Na}_2\text{O}$  і  $\text{K}_2\text{O}$ , які входять до складу пегматита, в складі шлаків системи  $\text{CaO-SiO}_2 + (\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})$  на реологічні характеристики шлакового розплаву (зниження в'язкості, зниження температури початку кристалізації). Експериментально підтверджено зниження температури плавлення ТШМ з  $1363^\circ\text{C}$  (вапно + плавиковий шпат) до  $1342^\circ\text{C}$  (вапно + пегматит). Зазначені оксиди лужних металів утворюють з'єднання з оксидними компонентами шлаку, прискорюючи розчинення вапна. При цьому знижується випаровування оксидів лужних металів і забезпечується стабільність складу рафінувального шлаку протягом обробки металу на УКП, що сприятливо позначилось на ступіні десульфурації сталі.

Метал дослідних плавок оцінювався методом здавального дослідного контролю на забрудненість неметалевими включеннями по нормам ГОСТ 1778-70, методикам ASTM-E45 (метод А). Метал дослідних плавок повністю відповідає вимогам нормативно-технічної документації та технічних протоколів на поставку металопродукції.

Виконано оцінку економічної ефективності заміни імпортованого плавикового шпату пегматитом - мінеральною сировиною вітчизняного родовища. Встановлено, що розроблена технологія забезпечує зниження собівартості сталі, у середньому, на 21,6 грн./т. сталі, в залежності від кількості заміни плавикового шпата пегматитом (від 50 % до 100 %).

В 2018 році по описаній вище НІР авторський колектив з Дніпроспецсталі та НМетАУ отримали два Патенти на Корисну Модель України.

Робота виконана під керівництвом акад. НАН України, д.т.н., проф, М.І. Гасика та д.т.н., проф. Д.М. Тогобицької.



## КОРИГУВАННЯ ГАЗОШЛАКОВОГО ПОТОКУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОФІЛЮ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ КОНВЕРТЕРА

Недбайло М. М., Сігарьов Є. М., д.т.н.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Авторами розроблена раніше та використана для модернізації гарнісажної фурми ККЦ ПАТ «Дніпровський комбінат» методика розрахунку параметрів (куту нахилу, діаметру та взаємного розташування сопел).

Для організації перенаправлення частини потоку шлакових крапель на визначені за результатами сканування нові «проблемні» зони футерівки конвертера, спроектована, виготовлена та випробувана у промислових умовах конструкція двоярусної 10-ти соплової гарнісажної фурми з розділеним газовим потоком (6-ть сопел Лаваля, згрупованих по три у напрямку цапфових зон та 4 додаткові циліндрові сопла на стовбурі фурми). Газові потоки з додаткових сопел призначені для впливу на частину відбитого від днища агрегату та/або шлакової ванни зворотнього газошлакового потоку та перенаправлення крапель шлаку у визначені горизонти робочого простору.

Для дослідження ступеня впливу та визначення особливостей використання розробленої конструкції фурми в умовах коливань глибини ванни кінцевого конвертерного шлаку ( $H_B$ ), висоти розташування наконечника фурми над ванною по ходу роздування на футерівку ( $h_\phi$ ) та відстані між наконечником фурми і боковими циліндровими соплами ( $l_\alpha$ ) на товщину шару гарнісажного шлаку, який сформований на стінах конвертера ( $B_T$ ) по ходу операції та на ширину зони шлакового гарнісажу у «проблемних» зонах ( $C_T$ ) спланований та реалізований повний факторний експеримент.

Експерименти проводили з використанням авторської методики на низькотемпературній моделі конвертера.

Математичні моделі, отримані за результатами обробки отриманих експериментальних даних, у натуральних значеннях мають вигляд:

$$B_T = -0,642 + 0,43 \cdot H_B - 0,1476 \cdot h_\phi + 0,1507 \cdot l_\alpha - 0,067 \cdot H_B \cdot l_\alpha + 0,0166 \cdot h_\phi \cdot l_\alpha \quad (1)$$

$$C_T = -2,5825 + 6,0825 \cdot H_B + 0,0825 \cdot h_\phi + 0,168 \cdot l_\alpha - 0,2475 \cdot H_B \cdot h_\phi - 0,1675 \cdot H_B \cdot l_\alpha \quad (2)$$

За результатами експериментів встановлені особливості використання двоярусної фурми у перемінних висхідних умовах та показано, що визначальними факторами ефективності нанесення гарнісажного шару є глибина шлакової ванни та висота фурми над ванною.

За результатами експериментів на моделі та промисловими випробуваннями можливо зробити висновок про доцільність подальшого удосконалення запропонованої конструкції гарнісажної двоярусної фурми у наступних напрямках:

- по-перше, заміна шестисоплового наконечника фурми на чотирьохсопловий із згрупованими у напрямках цапф зони соплами Лаваля збільшеного діаметру;
- по-друге, перехід до використання наконечника із звичайної сталі та переведення фурми на газове охолодження, яке позитивно себе показало в умовах ККЦ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

## БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Минко А. Н., к.т.н.

ЧНПФ «Анкор-Тенлоэнерго», г. Харьков

С каждым годом в промышленно развитых странах Европейского Союза в чаще стали использоваться малые источники электроэнергии для обеспечения собственных нужд предприятий горно-металлургической. В мировой практике в диапазоне мощностей от 100 кВт до 5 МВт наиболее часто в роли автономных источников электроэнергии используют турбогенераторные установки блочно-модульного исполнения [1, 2]. Такое оборудование и комплектующие блоки к нему выпускают G-Team a.s. (Чехия), Capstone Turbine Corporation (США), JFE Engineering Corporation (Германия), Turbec (Италия), ГК «Турбопар» (Россия), Dresser Rand (Франция), OPRA Technologies (Нидерланды).

В настоящее время в Украине такое оборудование не выпускают и не используют, поскольку нет научно-технической базы для его разработки, проектирования и изготовления.

Одним из перспективных направлений развития электрогенерирующих установок за рубежом являются установки малой мощности, работающие на низкопотенциальном, с точки зрения энергоемкости, топливе (ресурсе). Под таким топливом (ресурсом) понимается остаточный теплотворный потенциал, содержащийся в отходах от основного технологического процесса того или иного промышленного предприятия (металлургический комбинат, фабрика), отходящие газы от котлов-утилизаторов, а также невостребованный пар от систем охлаждения крупного горно-металлургического и энергетического оборудования [3].

Современные турбогенераторные установки блочного исполнения, скомпонованные по типу «турбина–редуктор–генератор» имеют следующие энергетические показатели [4]:

- генерируемая мощность 0,1–5,0 МВт;
- частота вращения генератора 3000 об/мин;
- частота вращения вала турбины 25 000–96 000 об/мин;
- избыточное давление пара на входе в установку менее 4,0 МПа;
- избыточное давление пара на выходе из установки менее 0,6 МПа;
- температура пара на входе в установку 420–650 °С (и менее).
- коэффициент полезного действия (по электричеству) 26–33 %;
- коэффициент полезного действия (по утилизации тепла) 66–80 %.

Литература:

1. Минко А.Н. Электрогенерирующие установки малой мощности блочного исполнения. – Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 11–12 квітня 2017 р. – Кременчук: КрНУ, 2017. – С. 110-111.

2. Минко А.Н., Шевченко В.В. Комплексная структура разработки турбогенераторной установки блочно-модульного исполнения / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9 (1231). – С. 86-89

3. Шевченко В. В., Минко А. Н., Потоцкий Д. В. Рекомендации по компоновке и выбору основного энергетического оборудования теплоутилизационных электрических станций блочно-модульного исполнения. – Електротехнічні та комп'ютерні системи. – №26 (102). – 2017. – С. 18-24.

4. Минко А.Н. Энергетические показатели современных турбогенераторных установок блочно-модульного исполнения / Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства» – ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кр.Рог. – 2017 г. – С. 335.

УДК 669.162.1:662:788.3 (043)

## **ВПЛИВ РОЗМІРУ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ОБКОТИШІВ (СВО) НА СТУПІНЬ ВИКОРИСТАННЯ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ЇХ ВІДНОВЛЕННІ**

**Ванюков А. А., к.т.н.**

**Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

Вплив розміру СВО на ступінь використання вуглецю при їх відновленні. Визначався ступінь відновлення в СВО розміром 10-15 мм і 15-20 мм в інтервалі температур 750-950°C. Важливим результатом проведеного дослідження є експериментально встановлений факт, що при однаковій температурі і терміні витримки при ній, ступінь відновлення в СВО більшого розміру ( $\approx 20$  мм) є вищим, ніж у СВО меншого розміру ( $\approx 15$  мм), при  $t^{\circ}\text{C } 950^{\circ}$   $d=20$  мм та  $d=15$  мм ступінь відновлення 83,7% та 44,2% відповідно.

Відновлювальні гази швидше використовуються в тих місцях, де вони регенеруються, тобто в об'ємах обкотиша з високою температурою. Внаслідок цього не відбувається адекватної поставки відновлювача в об'єми з низькою температурою. Це є причиною підвищення швидкості хімічної реакції в об'ємах обкотиша з високою температурою.

На останній стадії реакція відновлення у внутрішніх об'ємах обкотиша прискорюється та перетікають в об'єми з низькою температурою завдяки хімічним реакціям великого споріднення CO до оксидів заліза та підвищеного тиску що забезпечує процес попереднього відновлення оксидів заліза до початку процесу газифікації вуглецю.

За результатами експериментів проведено розрахунок мольного співвідношення  $C_x/O$  в СВО у процесі відновлення. В усіх пробах цей показник менше одиниці (1100 °C - 0,53; 1000 - 0,85; 900 - 0,5). Це доводить, що при відновленні СВО за рахунок твердого палива витрати відновлювача менші, що пов'язано з попереднім відновленням центральних об'ємів обкотиша монооксидом вуглецю.

Зроблено аналіз доменної плавки при використанні СВО -168кг/ $T_{\text{чавуну}}$ . За рахунок цих СВО знизилась витрата коксу -24кг/ $T_{\text{чавуну}}$ . Розрахунковий ефект заміни вуглецю коксу вуглецем СВО склав (0,7-1,38) кг $C_{\text{кокса}}$  / на 1 $T_{\text{чавуну}}$  на 1 кг $C_{\text{СВО}}$  / на 1  $T_{\text{чавуну}}$ , якщо витрата СВО змінюється від 60 до 160 кг /  $T_{\text{чавуну}}$ .

## ШЛАКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ РОТОРНОЇ СТАЛІ ТИПУ FB2

Стовпченко Г. П., Лісова Л. О., Медовар Л. Б.

Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ

Ефективність роботи енергетичної установки багато в чому залежить від матеріалів, які використовуються при виготовленні різних вузлів установок. Найбільш відповідальною ланкою є ротори турбін, які працюють в умовах високих температур. Парові турбіни, на відміну від газових, працюють при вищих температурах та має зони високого, середнього та низького тиску, що ускладнює виготовлення моноблочної турбіни. Тому активно ведуться як способи виробництва таких роторів, так і матеріалів, які б забезпечили ефективну роботу парових турбін та підвищили ККД енергетичної установки.

Основним класом сталей, що використовується в практиці виробництва роторів парових турбін є високолеговані склади з вмістом хрому до 12 %. В рамках загальноєвропейського проекту COST 501 (1983-1997 рр.) розроблені сталі з 9-12 % хрому для роботи при температурі 600 °С. Досягнення цієї програми були розвинені в новому проєкті COST 522 (1998 – 2003 рр.) з ціллю підвищити робочі температури до 630 – 650 °С. Розроблена сталь FB2 із додаванням Со 1,3 % та В 0,01 %. Легування бором дозволило підвищити температуру експлуатації на 20 °С. Ця марка сталі відноситься до азотованих, вміст азоту в ній складає 0,02 %.

Виробництво сталі FB2 складається із багатьох ланок, однією із якої є електрошлаковий переплав. Специфічний склад сталі викликає деякі труднощі при забезпеченні вихідного хімічного складу. Так, у виплавленому металі відбувається утворення нітридів бору, ніобію, молібдену та ванадію, що негативно впливає на структуру злитку. Також відбувається окислення В Nb, Mn та Si. Активно взаємодіє з елементами алюміній. Усі ці особливості потрібно враховувати при виборі шлакової системи, а також контролювати вміст легко окисних елементів.

Проведені термодинамічні розрахунки системи метал-шлак-газ в стаціонарний період переплаву для сталі FB2 та шлакової системи  $30\text{CaF}_2/30\text{Al}_2\text{O}_3/30\text{CaO}$  з додаванням  $\text{SiO}_2$  (5-9 %),  $\text{MnO}$  (0.5-5%)  $\text{V}_2\text{O}_3$  (0.5-2%) в атмосфері азоту та суміші азоту з аргоном.

Розрахунки показали, що переважним є застосування суміші газів аргону та азоту (20 % та 80% відповідно), що забезпечує вихідний рівень азоту в сталі. При використанні атмосфери азоту рівноважний вміст його в сталі перевищує заданий в два рази.

При постійному вмісті  $\text{V}_2\text{O}_3$  (0,5 %) в шлакові та підвищенні вмісту  $\text{MnO}$  збільшується перехід марганцю в метал та знижується інтенсивність відновлення бору (при наявності  $\text{SiO}_2$ ). У випадку відсутності в складі шлаку  $\text{SiO}_2$  при однаковому вмісті  $\text{MnO}$  и  $\text{V}_2\text{O}_3$  відбувається збільшення рівноважного вмісту бору в металі.

Показано, що при ЕШП сталі FB2 вміст  $\text{MnO}$  не повинен перевищувати 1 %, оскільки при підвищенні  $\text{MnO}$  до 5 % відбувається активне випаровування марганцю.

Також проведені термодинамічні розрахунки для потрібної системи  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  без додавання інших оксидів (атмосфера  $\text{N}_2\text{+Ar}$ ). Показано, що шлак системи  $35\text{CaF}_2\text{-33Al}_2\text{O}_3\text{-32CaO}$  забезпечує вихідний рівень марганцю та бору в металі та майже не окиснює його компоненти. Проте в реальних умовах інтенсивність випаровування та окиснення компонентів може бути відмінною від розрахункових. Тому для подальших досліджень важливо обрати також ефективні склади шлаків, що містять оксидами активних компонентів ( $\text{MnO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$  та  $\text{SiO}_2$ ). Серед таких найбільш перспективним є склад  $30\text{CaF}_2\text{-30Al}_2\text{O}_3\text{-30CaO-9 SiO}_2\text{-0,5 MnO-0,5 V}_2\text{O}_3$ .

УДК 669.162.261.3:621.311.16

## **РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ПІДХОДІВ ДО ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ**

**Шумельчик Є. І., к.т.н., Горупаха В. В., Семенов Ю. С., к.т.н., с.н.с.**

**Інститут чорної металургії ім. З.И. Некрасова НАН України, м. Дніпро**

Сучасне доменне виробництво України, в порівнянні з провідними світовими виробниками чавуну: Китаєм, Японією та Індією, знаходиться в складному становищі – в умовах постійного зниження собівартості виплавки чавуну без необхідного обсягу інвестицій, спрямованого на модернізацію та реалізацію довгострокових інноваційних проектів, що дозволили б зайняти більш високі позиції в світовому рейтингу. Через брак сировини доменні цехи в Україні часто тривалий час простоюють. У зв'язку з чим, доменні печі зупиняють на термін, що перевищує допустимий, відповідно до вимог технологічних інструкцій ведення технології. У роботі представлені результати задувок доменних печей після їх тривалої зупинки із застосуванням нових удосконалених підходів, які дозволили безаварійно вивести печі на робочі показники. Цей досвід, хоча і змушений, однак, на жаль, є актуальним для сучасних реалій виробництва чавуну в Україні.

Обґрунтовано новий підхід до вибору раціональних програм завантаження, що забезпечує стабільний економічний хід доменної печі при зміні технологічних умов плавки. Розроблені температурні показники оцінки розподілу газового потоку по радіусу печі, встановлено їх раціональні діапазони зміни при роботі в різних газодинамічних і паливних умовах. Сформульовані вимоги до розподілу температур газового потоку по радіусу печі.

На основі аналізу температур футерівки по висоті печі протягом п'яти років її експлуатації встановлені граничні значення температур, при яких футерівка середини і верху шахти частково або повністю вироблена, для футерівки низу шахти, розпару і заплечиків встановлені: температура, яка свідчить про утворення в нижній зоні печі нестійкого захисного гарнісажу і температура, що характеризує повну його відсутність.

Досліджено вплив дуттєвого режиму при використанні в ньому збільшеної кількості водяної пари, природного газу, природного газу із пиловугільним паливом та окремо пиловугільного палива на зміну форми кривої розподілу температури периферійного газового потоку по висоті печі від фурменної зони до колошника, що стало передумовою для розробки методу ідентифікації межі зони в'язко-пластичного стану в периферійній зоні печі.

Для умов перехідних режимів доменної плавки з метою забезпечення її стабільності при зміні якісного і кількісного складу компонентів шихтових матеріалів, а також при зміні паливних добавок в дутті науково обґрунтовано комплексне використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю: стаціонарних термозондів і термопар футерівки по висоті і окружності доменної печі для виявлення нових закономірностей і зв'язків процесів з подальшим їх застосуванням для обґрунтування вибору управляючих впливів, а також запропоновано новий підхід до вибору енергоефективних режимів завантаження.

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ЛЕГОВАНОЇ ХРОМОМ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ОХОЛОДЖЕННІ

Пушкаренко М. В., кер. Парусов Е. В., к.т.н.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Однією з головних задач сучасного матеріалознавства є створення наукових основ контролюємого управління процесами структуроутворення у металах з метою досягнення найкращого поєднання комплексу властивостей готових виробів. Останнього часу істотно виріс попит на якісний бунтовий прокат з вуглецевих сталей, котрий у більшості використовується при виробництві різноманітних холоднодеформованих виробів високої міцності. Це пов'язано з тим, що структура прокату переважно складається з сорбітовидного перліту, це дозволяє забезпечити формування найкращого поєднання показників міцності та пластичності металу. Кількість та ступінь дисперсності перліту у структурі сталі залежить від швидкості охолодження та температури, при якій протікає розпад аустеніту. К головним способам досягнення необхідного ступеня дисперсності перліту можна віднести: підвищення стійкості переохолодженого аустеніту за рахунок введення легуючих або мікролеуючих елементів, температури гарячої деформації, а також збільшення швидкості повітряного охолодження прокату на лінії Стелмор.

Представляло інтерес провести дослідження особливостей кінетики розпаду аустеніту, а також закономірностей формування структури сталі С82D<sup>Cr</sup> при безперервному охолодженні з різними швидкостями від підвищеної температури нагріву та виявлення найбільш прийняттого режиму термообробки для отримання структури перліту з максимальним ступенем дисперсності.

Досліджені особливості кінетики перетворень і побудована термкінетична діаграма (ТКД) розпаду переохолодженого аустеніту сталі, легованої хромом С82D<sup>Cr</sup> у процесі охолодження від температури 1040 °С. При побудові ТКД використовувався метод диференційно-термічного аналіз. Встановлено, що для формування в промислових умовах в структурі прокату зі сталі С82D<sup>Cr</sup> перліту з найкращим ступенем дисперсності доцільно використовувати у міжкритичному інтервалі таку швидкість охолодження аустеніту, при якій утворюється сорбітовидний перліт з найменшою міжпластинковою відстанню. При цьому температура виткоутворення прокату на лінії Стелмор повинна бути не менш ніж 1040 °С, подальше прискорене повітряне охолодження витків металу на транспортері слід проводити зі швидкістю не менш ніж 17 °С/с до інтервалу температур 570...540 °С з наступною квазіізотермічною витримкою під теплоізоляційними кришками. Такий режим охолодження забезпечить розпад аустеніту по дифузійному механізму з утворенням максимально можливої кількості сорбітовидного перліту в структурі бунтового прокату. Встановлені найбільш ефективні інтервали швидкостей повітряного охолодження, які дозволяють забезпечити не менш ніж 90 % сорбітовидного перліту в структурі прокату, виключити виділення надлишкової фази (цементит вторинний), а також утворення структур за проміжним та здвиговим механізмами. Результати досліджень отримали промислове впровадження при розробці режиму охолодження бунтового прокату діаметром 8,0...12,0 мм зі сталі С82D<sup>Cr</sup> на лінії Стелмор у потоці безперервного дрібносортно-дротового стану 320/150, якісні показники якого відповідали вимогам EN ISO 16120-4:2011 «Особливі вимоги до бунтового прокату спеціального призначення».

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ПЕРЕТИНОМ ОБОДУ В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КОЛІС ЗІ СТАЛЕЙ РІЗНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

**Бабаченко О. І., д.т.н., Кононенко Г. А., к.т.н.**

### **Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро**

Досягнення високих механічних властивостей обода залізничного колеса з вуглецевої сталі забезпечується за рахунок формування в ній структури тонкодисперсного перліту - сорбіту і доевтектоїдного фериту в невеликій кількості у вигляді сітки по границях колишніх аустенітних зерен без наявності бейнітної структури. Рішенням даної задачі може бути застосування систем гнучкого управління режимами термічної обробки, заснованих на моделюванні процесів фазових і структурних перетворень.

Мікроструктурні дослідження ободів залізничних коліс показують, що існуючі режими термообробки призводять в деяких випадках до формування, поряд з феритом і перлітом, структури бейніту в місцях, де може мати місце хімічна мікронеоднорідність та реалізовуватись достатньо висока швидкість охолодження.

Модулювали охолодження обода залізничного колеса при прискореному охолодженні за допомогою методу кінцевих елементів з використанням рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є) при термічній обробці залізничних коліс зі сталі з граничними відхиленнями за хімічним складом в межах вимог нормативної документації, які можуть формуватися в металі обода колеса в результаті ликвації хімічних елементів при дендритній кристалізації заготовки. Для залізничних коліс застосовують вуглецеві сталі. В основному, вони відрізняються тільки вмістом вуглецю, марганцю і кремнію. На практиці діапазон змін цих елементів в колісній сталі різних марок в збіднених і збагачених хімічними елементами ліквацийних ділянках, що формуються при кристалізації, може становити: 0,45-0,70 % вуглецю; 0,25-0,50 % кремнію; 0,40-1,0% марганцю. Нами умовно було виділено три хімічних склади: з мінімальним ( $C = 0,45\%$ ;  $Si = 0,25\%$ ,  $Mn = 0,40\%$ ), середнім ( $C = 0,58\%$ ;  $Si = 0,38\%$ ,  $Mn = 0,70\%$ ), та максимальним ( $C = 0,70\%$ ;  $Si = 0,50\%$ ,  $Mn = 1,0\%$ ) вмістом хімічних елементів. Для кожного умовного складу враховувався комплексний вплив хімічного складу. Показано, що при охолодженні обода залізничного колеса в його внутрішніх шарах реалізується менша швидкість охолодження, тобто фазові перетворення зі зміною відстані від поверхні катання проходять в інших умовах. Доведено, що на перших етапах прискореного охолодження необхідно зменшувати інтенсивність витрати води, щоб швидкість охолодження не перевищувала критичну, з метою забезпечення формування рівномірної високодисперсної мікроструктури за перетином обода колеса.

## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПРОРОБЛЮВАНОСТІ СТРУКТУРИ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК ЗІ СТАЛІ 09Г2С

К. Г. Дьоміна<sup>1</sup>, к.т.н., Ж. А. Дементьєва<sup>1</sup>, О. С. Миргородська<sup>2</sup>, Д. В. Гунченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро,

<sup>2</sup> Національна металургійна академія України, м. Дніпро

За результатами раніше виконаних досліджень впливу пластичної деформації на параметри первинної, дендритної, структури конструкційних сталей було розроблено метод оцінки її пророблюваності. За показник пророблюваності була прийнята металографічна характеристика – щільність «слідів» дендритної структури, яка визначається як кількість структурних елементів в об'ємі сталі.

Для розвитку даного методу розглянуто процес гарячої пластичної деформації безперервнолитої заготовки перерізом  $335 \times 400$  мм методом поздовжньої прокатки для одержання заготовок з круглим поперечним профілем  $\varnothing 250$  і  $180$  мм на трубозаготівельному стані 900 / 750 в умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат». Показано, як відбувається ущільнення «слідів» дендритної структури в центральних шарах, на відстані 0,25, 0,50, 0,75 радіуса і в поверхневих шарах трубних заготовок. Встановлено, що ущільнення структури по перерізу досліджених заготовок має схожий характер, протікає нерівномірно і змінюється від 1,48 до 3,94 і від 1,95 до 9,18 рази для трубних заготовок  $\varnothing 250$  і  $180$  мм відповідно. Причому максимальне ущільнення спостерігається на відстані  $\frac{1}{2}$  радіуса в обох заготовках. При цьому в середньому по перерізу величина ущільнення структури добре узгоджується з величиною фактичної витяжки: для трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм складає 2,70 рази при величині фактичної витяжки  $\lambda = 2,73$ , для трубної заготовки  $\varnothing 180$  мм складає 5,16 рази при величині фактичної витяжки  $\lambda = 5,27$ .

У зв'язку з цим, за критерій оцінки роботи методу прийнятий коефіцієнт витяжки  $\lambda$  – відношення площі поперечного перерізу заготовки до і після прокатки. Для встановлення залежності ущільнення структури в процесі деформації від величини фактичної витяжки запропоновано коефіцієнт пророблюваності «слідів» дендритної структури  $K$ , який визначається за формулою:

$$K = 1 - \delta_\lambda,$$

де  $\delta_\lambda$  – похибка визначення ущільнення «слідів» дендритної структури щодо коефіцієнта витяжки  $\lambda$ .

Якщо  $K < 1$ , то при прокатці структура металу в цих шарах заготовки не зазнає особливого деформаційного впливу. Якщо  $K > 1$ , то при прокатці структура металу заготовки в таких мікрооб'ємах знаходиться в зоні інтенсивної пластичної деформації.

Визначено, що для обох заготовок найбільш високих значень коефіцієнт пророблюваності структури досягає на відстані 0,50 і 0,75 радіуса: 1,21 і 1,44 – для заготовки  $\varnothing 250$  мм, 1,17 і 1,74 – для заготовки  $\varnothing 180$  мм. Його знижені значення (1,06 і 0,83) в поверхневих шарах заготовок свідчать про наявність зони скрутної деформації, а мінімальні (0,54 і 0,38) в центральних шарах – про вплив на метал тільки розтягуючих напруг.

Таким чином, використання запропонованого коефіцієнта пророблюваності структури дає можливість аналізувати технологічні процеси обробки металів тиском зі свідомо високим ступенем нерівномірності, що є особливо актуальним для гарячекатаного прокату великих перерізів і таких видів металопродукції, як залізничні осі та колеса.



УДК 621.771.25:669.14-194:620.18:593.3

## **СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ БУНТОВОГО ПРОКАТУ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНИХ ВИРОБІВ**

**Сагура Л. В., к.т.н., Чуйко І. М., к.т.н., кер. Парусов Е. В., к.т.н.**

**Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро**

Споживачами бунтового прокату, з якого виготовляють різноманітні холоднодеформовані вироби високої міцності є, здебільшого, метизні підприємства. Для умов України в даний час актуальним питанням є зниження собівартості переробки прокату й питання, пов'язані з покращенням екологічної безпеки. В той же час, метизні підприємства пред'являють досить жорсткі вимоги до якісних показників початкової сировини (бунтового прокату з високовуглецевої сталі), посиляючись на те, що зазначена металопродукція використовується при виготовленні відповідальних видів металовиробів: холоднодеформовані дріт й арматура, сталеві та арматурні канати, тощо. Прокат повинен мати максимально можливу кількість сорбітовидного перліту у структурі та характеризуватися найкращим поєднанням міцностних та пластичних показників, з метою забезпечення його переробки за сучасною схемою прямого волочіння (без застосування додаткових термічних обробок). В більшості випадків метизні підприємства прагнуть до зміни застарілого способу кислотного травлення при видаленні окалини з поверхні прокату та переходу до механічного способу. Це дозволяє істотно скоротити собівартість виробництва та знизити навантаження на екологічне середовище.

В умовах національних металургійних підприємств бунтовий прокат з високовуглецевої сталі виготовляється згідно ДСТУ 3683-98 та ГОСТ 14959-79, але ці стандарти не регламентують ряд важливих показників. Так, ДСТУ 3683-98 не висуває вимоги до забруднення сталі неметалевими включеннями та надлишкових фаз у структурі металу, а ГОСТ 14959-79 – до мікроструктури та механічних властивостей. Тому все більше метизних підприємств України орієнтуються на вимоги європейських стандартів, зокрема, EN 16120:2011, який окрім основних показників (хімічний склад сталі, глибина поверхневих дефектів, глибина знеуглецьованого шару, осьова ліквация, цементитна сітка), приділяє більш жорсткі вимоги до якісних показників металу. Згідно ДСТУ 3683-98 в мікроструктурі бунтового прокату з високовуглецевої сталі, охолодженого двостадійним способом, кількість сорбітовидного перліту повинна складати не менше 50 %, в той час як згідно EN 16120:2011 мінімальна його кількість повинна бути не менше 75 %. З огляду відсутності в національних стандартах важливих вимог до якісних показників бунтового прокату, доцільно розробити сучасну нормативну документацію для виробництва якісної сировини – бунтового прокату з високовуглецевих марок сталі.

Враховуючи вимоги стандарту EN 16120:2011 в умовах металургійного підприємства ВАТ «Молдавський металургійний завод» промислово впроваджені технології виробництва бунтового прокату діаметром 5,5...14,0 мм зі сталей марок С72D, С78D, С80D, С82D і С86D. Виготовлений гарячекатаний прокат характеризується наступним комплексом якісних показників: рівномірно сформованою сорбітною структурою (кількість сорбітовидного перліту складає 85...93 %), мінімальною глибиною знеуглецьованого шару ( $\leq 1,0$  %), низьким вмістом неметалевих включень (не більше 1,5 балу за кожним типом включень згідно ISO 4967), практично повною відсутністю цементитної сітки у структурі металу (клас А – 95,0 %, клас В – 5,0 %, згідно GA-03-064 «Beckaert»). Досягти зазначеного результату вдалося не тільки завдяки раціонально обраному хімічному складу сталі, а й за рахунок інноваційних підходів до деформаційно-термічної обробки бунтового прокату в потоці безперервного дрібносоротно-дротового стану. Отриманий рівень якісних показників металопрокату дозволив підвищити не тільки клас міцності сталі, а й його технологічну пластичність, завдяки чому стало можливим переробляти бунтовий прокат у різноманітні високоміцні холоднодеформовані вироби з використанням технології прямого волочіння (без застосування патентування).

УДК 621.771.294:620.17

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ НА ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» ЗА АМЕРИКАНСЬКИМ СТАНДАРТОМ**

**Бабаченко О. І., д.т.н., Кононенко Г. А., к.т.н., Дьоміна К. Г., к.т.н., Хулін А. М., к.т.н.,  
Шпак О. А.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

Залізнична ось є високо навантаженою деталлю рухомого складу. В процесі експлуатації на залізниці вона піддається значним статичним, динамічним і циклічним впливам. Різноманіття напружень, що діють на колісну пару при її обертанні, може призвести до втомних пошкоджень цих виробів. Основною причиною непередбачуваних руйнувань осей при їх експлуатації на залізниці є втома металу. Такі руйнування призводять до великих матеріальних, а іноді і екологічних збитків. Тому дослідження втомної міцності осьової сталі є досить актуальним питанням.

За останні кілька років на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» була освоєна технологія виробництва залізничних осей марки F за стандартом AAR M-101. Дійсні дослідження присвячені вивченню втомної міцності поверхневих і внутрішніх шарів металу цих виробів в порівнянні з осями інших марок, для прогнозування їх працездатності на залізниці.

Результати втомних випробувань залізничної осі марки F (AAR M-101) виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» показали, що при нарузі 295-286 МПа поверхневий шар виробу має на 15,0-46,4% більшу втомну міцність, ніж внутрішній шар на глибині  $\frac{1}{2}$  радіуса поперечного перерізу осі. Більш висока втомна міцність поверхневого шару металу в порівнянні з  $\frac{1}{2}$  радіуса пояснюється тим, що при нормалізації осі в процесі її виробництва поверхневі шари металу охолоджуються з більшою швидкістю і мають в результаті цього більший рівень міцності. Це припущення підтвердили виміри твердості зразків методом Роквелла, які показали, що зразки, відібрані від поверхні осі, мають в середньому на 1,1 HRC (13,0%) більшу твердість, ніж зразки, відібрані від внутрішніх шарів ( $\frac{1}{2}$  радіуса).

Металографічний аналіз випробуваних зразків показав, що такі дефекти структури осьової сталі, як мікропори, точкові комплексні оксиди та структурна неоднорідність знижують її втомну міцність.

Встановлено, що осі марки F (стандарт AAR M-101) виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» за втомною довговічністю не поступаються осям марки EA1N (стандарт EN 13261), виготовленим на тому ж підприємстві з операцією кування і без нього.

УДК 621.77: 621.777.01

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СПІЛЬНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ШАРУВАТИХ МЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ ТА ТИТАНУ ПРИ ЕКСТРУЗІЇ З БІЧНИМ ВИТІКАННЯМ**

**Самсоненко А. А. , к.т.н., доц., Андрєєв В. В. , к.т.н.**

**Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

В роботі проведено аналіз існуючих способів виробництва шаруватих металевих композицій, в яких з'єднання шарів отримано з використанням пластичної деформації. Найбільше розповсюдження для виробництва довгомірних біметалевих профілів на основі сплавів алюмінію та титану отримали прокатка, волочіння та пряме пресування. Поряд з перевагами дані процеси мають ряд недоліків. Для прокатки характерні наступні недоліки: обмеження в товщинах шарів, обмеження по максимальному обтиску за прохід, складність дискретного впливу на окремі елементи шаруватої композиції, обмежений сортамент по формі металовиробів, необхідність попереднього формування заготовки. Для волочіння: дискретність процесу, незначні разові деформації, обмежений сортамент по формі металовиробів, можливі втрати стабільності процесу, необхідність попереднього формування заготовки. Для прямого пресування: дискретність процесу, неконтрольована та нерівномірна деформація шарів заготовки, руйнування серцевини при значній різниці між межами міцності матеріалів шарів, складність отримання профілів з частковим контактом шарів по периметру. В даній роботі розглянуто можливість використання процесу екструзії з бічним витіканням для отримання шаруватих прямокутних профілів на основі сплавів алюмінію та титану.

З метою визначення можливих умов реалізації процесу було проведено теоретичне дослідження процесу отримання біметалевого прямокутного профілю на основі сплавів титану та алюмінію методами екструзії з бічним витіканням з використанням програмного продукту QForm VX (дослідження виконано на кафедрі ОМТ НМетАУ в рамках угоди про використання програми QForm No. MSL2015\_10\_5 від 28.10.2015 р.).

З використанням комп'ютерного моделювання показані особливості перебігу процесу при пресуванні біметалічної смуги на основі алюмінію та титану загальною товщиною 20 мм (товщина титану 4 і 16 мм). Досліджено комплексний вплив фактора тертя і коефіцієнта витяжки в матриці при куті пресування  $90^\circ$  на стабільність процесу бічного пресування: найбільш стабільно процес проходить при  $\lambda_d = 1 \dots 2$  і  $m = 0,1 \dots 0,3$ . Визначено, що зі збільшенням площі поперечного перерізу титанового шару можливе збільшення коефіцієнта витяжки в матриці.

УДК 621.77

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФОРМОЗМІНУ СТАЛЕВОЇ СІТКИ  
В СКЛАДІ АРМОВАНОГО АЛЮМІНІЄВОГО МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТУ****Макеєва Г. С. , аспірант, Фролов Я. В., проф., д.т.н.****Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

Виконано експериментальні дослідження гарячої прокатки алюмінієвих полос, армованих сталеву сіткою. З'єднання прокаткою двох алюмінієвих штаб сплаву EN AW-5083 було експериментально виконано армуванням сталеву сіткою під кутом  $45^\circ$  до напрямку прокатки та без армування між алюмінієвими шарами. Проаналізовано вплив параметрів деформації в межах 25 – 55 % на формозміну сталеву сітку в складі армованого алюмінієвого матричного композиту та на з'єднання композиту. В дослідженні представлено метод розрахунку та параметри, що описують формозміну та параметри деформації всього композиту, а також видовження ґратки сітки, видовження дротів сітки та овалізацію дротів сітки. Були проведені тести на розтягнення у повздовжньому та поперечному напрямку, ударні випробування та аналіз мікроструктури, що визначають властивості прокатаного композиту. Також проведений аналіз впливу параметрів деформації на механізм з'єднання композиту, його властивості та механізм роз'єднання композиту при механічних випробуваннях. Спираючись на отримані результати, визначено оптимальний діапазон ступеня деформації, в якому армований алюмінієвий матричний композит має найкращі показники механічних властивостей. Покращення механічних властивостей армованих сталеву сіткою алюмінієвих матричних композитів обмежено з-за накопичення розтягуючих напружень в дротах сітки при прокатці. Отже, в поєднанні з додатковим інтенсивним стисканням на вузлах сітки цей ефект призводить до руйнування дротів сітки та до повздовжніх розтягуючих напружень для всього композиту. Таким чином існує протиріччя між деформацією, що необхідна для міцного з'єднання між шарами композиту при заданій температурі та збільшенням деформації. Найбільш гарні результати в випробуваннях на поперечне розтягнення були отримані з використанням зразків, що прокатані при 45 % деформації. Параметри зони деформації при прокатці відіграють значну роль в формозміні дротів сітки в складі композиту. З-за формозміни ґратки сітки та повороту трохи овалізованих дротів навкруг своєї осі спостерігається з'єднання алюмінієвих шарів композиту, що нагадує блискавку-застібку при ступенях деформації 25 – 35 %.