

**Національна академія наук України  
Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова**



**Всеукраїнська науково-технічна конференція  
«НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»  
22-24 листопада**

**Організатори конференції:  
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України  
Український державний університет науки і технологій МОН України**

**Збірник тез**

**DOI: 10.52150/2522-9117-2022-conferens**

**м. Дніпро  
2022**

**Організаційний комітет конференції:**

**Голова комітету:** **Бабаченко О. І.** д.т.н., с.н.с., директор ІЧМ НАНУ.  
**Заступник голови:** **Меркулов О. Є.** д.т.н., с.н.с., заступник директора ІЧМ НАНУ.  
**Секретар комітету:** **Кононенко Г. А.** д.т.н., ст. д., учений секретар ІЧМ НАНУ.

**Науковий комітет конференції:**

**Дейнеко Л. М.** д.т.н., проф., зав. кафедрою Матеріалознавства та термічної обробки металів Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій.

**Камкіна Л. В.** д.т.н., проф., декан факультету Металургійних процесів та хімічних технологій Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій.

**Луценко В. А.** д.т.н., с.н.с., пров. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАНУ.

**Муравйова І. Г.** д.т.н., с.н.с., ст. наук. співроб. відділу технологічного обладнання та систем управління ІЧМ НАНУ.

**Парусов Е. В.** д.т.н., с.н.с., зав. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАНУ.

**Приходько І. Ю.** д.т.н., с.н.с., зав. відділу процесів і машин обробки металів тиском ІЧМ НАНУ.

**Сігарьов Є. М.** д.т.н., проф., зав. кафедрою «Металургії чорних металів та обробки металів тиском» Дніпровського державного технічного університету.

**Тогобицька Д. М.** д.т.н., проф., зав. відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів ІЧМ НАНУ.

**Чернятевич А. Г.** д.т.н., проф., пров. наук. співроб. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАНУ.

**Шевченко А. П.** д.т.н., проф., пров. наук. співроб. відділу позапічної обробки чавуну ІЧМ НАНУ.

**Грішин О. М.** к.т.н., заступник декана Металургійних процесів та хімічних технологій, доцент кафедри Теоретичних основ металургійних процесів Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій.

**Нестеров О. С.** к.т.н., с.н.с. зав. відділу металургії чавуну ІЧМ НАНУ.

## Зміст

	Стор.
<b>Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість</b>	7
В.А. Безуглий, А.С. Коверя, к.т.н. Визначення вмісту та фракційного складу пилу до та після термічної обробки донецького антрациту	7
В.Г.Герасименко, к.т.н., доцент, Л. С.Молчанов, к.т.н, Т. С. Голуб, к.т.н. Особливості виробництва якісної заготовки методом безперервної розливки при збільшеній серійності методом «плавка на плавку»	8
Т.С. Голуб, к.т.н., Л. С. Молчанов, к.т.н., С.І. Семикін, к.т.н., В.В. Вакульчук, к.т.н. Розробка та дослідження конструкції сопла когерентного типу з метою підвищення технологічних та екологічних показників конвертерної плавки	9
О.М. Гришин, к.т.н., А.А. Надточій, к.т.н., В.О.Петренко, д.т.н. Формування карбідної фази при комплексному відновленні хрому у складних системах	10
О.М. Гришин, к.т.н., А.А. Надточій, к.т.н. Вплив добавки $Fe_{мет}$ на вуглецевотермічне відновлення оксиду хрому	11
В.І. Єлісеєв, к.ф.-м.н., І.О. Маначин, к.т.н., А.П. Шевченко, д.т.н., Л.А. Флеєр, к.т.н. Оцінка динамічних характеристик частки при прокиненні її рідкий чавун	11
Д.В. Єськов, аспірант, Є.М. Сігарьов, д.т.н., А.А. Похвалітий, к.т.н. Вплив якості залізовміщуючих брикетів на енергоефективність конвертерної плавки	12
В.Г. Кисляков, Л.С. Молчанов, О.Л. Руденко, В.П. Петруша М.В. Пушкаренко Аналіз компонентів шлакоутворюючої суміші для одно стадійного видалення домішок із чавуну	14
С. Є. Кондратюк, д. т. н., проф., Ж. В. Пархомчук, к. т. н., В. І. Вейс Властивості сталевих Виливків з диференційованою структурою	15
Б.В. Корнілов, к.т.н., О.Л. Чайка, к.т.н., А.О. Москалина, к.т.н., О.Є. Меркулов, д.т.н., М.М. Ізюмський Аналіз ефективності технологій, спрямованих на декарбонізацію доменного виробництва	16
Г.Ю. Крячко, к.т.н., Є.М. Сігарьов, д.т.н., М.С. Кузнецов Режимні параметри випуску продуктів доменної плавки	17
Л. С. Молчанов, к.т.н., Т.С. Голуб, к.т.н. Аналітичне дослідження основних механізмів руйнування периклазо-вуглецевих плавлених вогнетривів під впливом агресивних середовищ в умовах підвищеної температури з метою підвищення терміну їх експлуатації	18
В.П. Піптюк, к.т.н., Д.О. Степаненко, к.т.н., С.В. Греков, Н.Є. Ходотова Оцінка можливості використання по прямому призначенню марганцевих феросплавів вітчизняного виробництва з відхиленнями по хімічному складу	19
А.А. Похвалітий, к.т.н., Є.М. Сігарьов, д.т.н., Г.О. Носенко Обґрунтування конструктивних параметрів продувних пристроїв 250-т кисневих конвертерів в умовах попереднього підігріву металобрухту	20
А.А. Похвалітий, к.т.н., Є.М. Сігарьов, д.т.н., П.А. Якунін Визначення показника засміченості брикетів зі сталевої стружки	22
В. П. Руських, к.т.н., доцент, Ю. В. Хавалиць, Р. Ю. Кирсанов Перехід металургії на водневу технологію	23
Ю.С. Семенов, к.т.н. Шляхи відновлення повноцінного функціонування доменного виробництва України у воєнний та післявоєнний час	24
С.І. Семикін, к.т.н., Т.С. Голуб, к.т.н., Л. С. Молчанов, к.т.н. Аналітичне дослідження характеристик струменів, що витікають із сопел різної конструкції	26
Д.О. Степаненко, к.т.н. Обґрунтування раціонального складу рафінувального шлаку для обробки сталі на УВП	27
Н.О. Цюпа, к.т.н., Д.М. Тогобицька, д.т.н., проф. Оцінка корозійної активності луговмісних домених шлаків по відношенню до вогнетривів	28
О.Л. Чайка, к.т.н., Б.В. Корнілов, к.т.н., А.О. Москалина, к.т.н., В.В. Лебідь, к.т.н., М.Г. Джигота Досвід розробки та реалізація математичних моделей матеріального та	29

теплового балансів доменної плавки в умовах ПрАТ «МК «Азовсталь»	
А.П. Шевченко, д.т.н., І.О. Маначин, к.т.н., Б.В. Двоскін, к.т.н., В.Г. Кисляков, к.т.н., В.П. Петруша Удосконалення процесів підготовки, десульфуратії та подачі рідкого чавуну для конвертерного переділу	30
В.П. Школяренко, к.т.н., А.С. Нурадинов, д.т.н., К.А. Сіренко Оптимізація технологічних процесів лиття безшовних труб у кокіль гравітаційним методом	31
П.О. Юшкевич, к.т.н., Л.С. Молчанов, к.т.н., Т.С. Голуб, к.т.н. Досвід експлуатації та фактори, що впливають на стійкість склепінь печей віддзеркального типу: мартенівська піч та двованний сталеплавильний агрегат	32
<b>Електрометалургія</b>	33
С.В.Аджамський, Ph.D, Г.А., Кононенко, д.т.н., Р.В. Подольський Вплив зміни шорсткості на механічні властивості сталі 316L, виготовленої за технологією селективного лазерного плавлення	33
С.В.Аджамський, Ph.D, Г.А., Кононенко, д.т.н., Р.В. Подольський Обґрунтування раціональних режимів СЛП-технології	33
С.В.Аджамський, Ph.D, Г.А., Кононенко, д.т.н., Р.В. Подольський Досвід виготовлення дентальних імплантів за 3-D технологією зі сплаву на основі титану	34
С.В.Аджамський, Ph.D, Г.А., Кононенко, д.т.н., Р.В. Подольський Вплив напрямку побудови та товщини робочого шару на механічні властивості зразків, виготовлених за технологією селективного лазерного плавлення	35
Ф.К. Біктагіров, д.т.н., В.О. Шаповалов, чл.-кор., О.В. Гнатушенко, к.т.н., А.П.Ігнатов, к.т.н., В.В. Барабаш, асп., В.В. Степаненко, м.н.с. Отримання біметалевих виробів сталь-мідь великих розмірів	36
В.А. Гладких (д.т.н., проф.), А.В. Рубан (к.т.н., доц.), О.Ю. Блуденко (ст. гр МЕ 04-20) Технологія виплавки феросилікомарганцю з підвищеним вмістом заліза	37
А.А. Похвалітий, к.т.н., К.І. Чубін, к.т.н., А.В. Круть Передумови для розширення рафінувального потенціалу еркерних сталевипускних каналів в дугових сталеплавильних печах	38
І.В. Протоковілов, к.т.н., В.О. Шаповалов, д.т.н., В.Б. Порохонько, к.т.н. Керування кристалізацією зливків ЕШП із застосуванням нестационарних режимів електричного живлення	39
А.М. Тимошенко, к.т.н., В.П. Ліхошва, д.т.н., О.В. Шматко Новітній ливарно-індукційний метод одержання біметалевих та тришарових виробів	40
<b>Автоматизація та сучасні методи контролю металургійних процесів та якості металургійної продукції</b>	41
Д.М. Тогобицька, д.т.н., А.І. Белькова, к.т.н., Д.О. Степаненко, к.т.н., І.Г.Муравйова, д.т.н., Ю.М. Ліхачов Алгоритмічні засоби системи вибору оптимального складу доменної шихти на основі її фазових перетворень у високотемпературних зонах печі	42
В.П. Школяренко, к.т.н. Контроль температури розплавів	42
В.П. Школяренко, к.т.н. Перспективи розвитку автоматизації у металургії	43
<b>Металознавство та термічна обробка сталі</b>	44
О.І. Бабаченко, д.т.н., Г.А. Кононенко, д.т.н., Р.В. Подольський, О.Л. Сафронов Аналітична оцінка можливості застосування економно легованих сталей перлітного класу для залізничних рейок	44
Т.В. Балаханова, к.т.н., с.н.с., О.А. Сафронова, м.н.с. Аналіз зворотної ліквідації в лабораторних зливках сталей для залізничних осей	44
О.В. Барановська, м.н.с. Особливості фазоутворення спеченого багатокомпонентного композиту із порошкової суміші на основі системи TiH <sub>2</sub> -Fe-Si-C	45
С. В. Бобирь, д.т.н., Е. В. Парусов, д.т.н., Т. М. Голубенко, к.т.н., О. Є. Барановська, к.т.н. Про особливості формування структури під час ізотермічного гартування та криогенного оброблення сталі 38ХН3МФА	46
С. В. Бобирь, д.т.н., Е. В. Парусов, д.т.н., Т. М. Голубенко, к.т.н., Д. В. Лошкар'єв Нова методика дослідження фазових та структурних перетворень у вуглецевих легованих	47

сталях	
С. І. Губенко, д.т.н Особливості формування мезоструктури в сталевій матриці поблизу неметалевих включень	48
С. І. Губенко, д.т.н., Е. В. Парусов, д.т.н., І. М. Чуйко, к.т.н. Про причини тріщино утворення у конструкційних сталях	48
Є.О. Заболотських, асп., І.В. Дерев'янку, к.т.н., О.В. Жаданос, к.т.н. Технологія обробки залізовуглецевих розплавів карбідом кремнію при виплавці високоміцних чавунів	49
Т.В. Кімстач, ст. викл., С.І. Реп'ях, д.т.н., проф, К.І. Узлов, д.т.н, проф, Р.В.Усенко к.т.н, доц. Оптимізація припустимої кількості домішок в в антифрикційній бронзі БрО3А3	50
Т.В. Кімстач, м.н.с., О.А.Сафронова, м.н.с Перспективний напрям підвищення властивостей високоміцного товстолистого прокату	51
М. А. Ковзель, к.т.н., О. І. Бабаченко, д.т.н., Е. В. Парусов, д.т.н., О. В. Парусов, к.т.н., Е. В. Олійник, аспірант Особливості розподілу легувальних елементів за структурними складовими нових хромомарганцевих сплавів у литому стані	52
М.А. Ковзель, к.т.н., Т.В. Котова, к.т.н., Т.А. Аюпова, к.т.н., Ю.О. Кушнір Дресування листового прокату із низьковуглецевих сталей для холодної штамповки	53
М.А. Ковзель, к.т.н. , Т.В. Котова, к.т.н., Т.А. Аюпова, к.т.н., Ю.О. Кушнір Вплив дресування на структуру та механічні властивості тонкого листа	54
М. А. Ковзель, к.т.н., Е. В. Парусов, д.т.н., І. Р. Снігура, к.т.н., О. В. Кукса, к.т.н. Визначення раціональних композицій хімічного складу економнолегованих зносостійких сплавів на основі заліза	55
Г.А. Кононенко, д.т.н., О.Є. Меркулов, д.т.н., Р.В. Подольський, О.А. Сафронова Проблеми та перспективи сучасних рейкових сталей	56
Ю.М. Кусков, д.т.н., Ф.К. Біктагіров, д.т.н., А.П. Ігнатов, к.т.н., А.В. Нетяга, інж. Спадковість структури металу при електрошлаковій наплавці витратним електродом	56
О.М. Мисливченко, к.т.н., Р.В. Литвин, к.т.н., А.А. Бондар, д.х.н., О.Б. Згалат-Лозинський, д.т.н. Отримання борвмісних високоентропійних сплавів та покриттів на їх основі	57
Л.І. Ниркова, д.т.н., С.О. Осадчук, к.т.н., Ю.О. Харченко, аспірант Дослідження корозійного розтріскування та катодного захисту тривало експлуатованої трубної сталі Х70	58
Н.Е. Погребна, проф., к.т.н., А.В. Гребенєва, доц., к.т.н. Вплив термічної обробки на структуру і фазовий склад високохромистих чавунів	59
Н.Е. Погребна, проф., к.т.н., А.В. Гребенєва доц., к.т.н. Вплив термодформаційного зміцнення на параметри зерна аустеніту	59
Я.М. Романенко; М. П. Беженар, д-р техн. Наук Прогнозування показників зусилля руйнування мікропорошків марки «КИБОР» та «КУБОНІТ»	60
Ю. Ю. Румянцева (Ph.D), Л. О. Романко, Д. О. Савченко, Д. В. Туркевич Вплив морфології та хімічної природи добавок на електропровідність композитних матеріалів на основі сVN із зв'язкою NBN	61
О.М. Сидорчук, К.О. Гогаєв, В.В. Лук'янчук Одержання штампових сталей 4Х3Н5М3Ф та 4Х4Н5М4Ф2 електрошлаковим переплавом з урахуванням оптимальних режимів термічної обробки	62
Д.М. Тогобицька, д.т.н., проф., І.Р. Снігура, к.т.н., н.с., В.П. Піптюк, к.т.н., с.н.с., Н.Є. Ходотова, м.н.с. Науково-обґрунтований вибір легуючої добавки – запорука спрямованого формування властивостей та якості металургійних розплавів	64
К.О. Черноіваненко, к.т.н. Сфероїдизація карбідів швидкорізальної сталі при відпалі	65
<b>Прогресивні технології обробки металу тиском</b>	65
Є.С. Болубаш Різання металевого листа кумулятивним струменем піротехнічного пристрою в ракетно-космічній техніці	65
В. В. Вереньов, д. т. н. Динаміка лінії приводу валків у станах з багатонитковою прокаткою	66
С.О. Воробей, д-р техн.наук Прогнозування площинності гарячекатаних штаб	67

Є.С. Кирилюк, к.т.н., С.Ф. Кирилюк, м.н.с., Ю.О. Шишкіна, к.т.н., О.В. Толочина, к.т.н. Дослідження впливу гарячого пресування на структуру та властивості порошкових алюмоматричних композитів системи Al-TiC	68
О.П. Максименко, д.т.н., О.В. Нікулін, к.т.н., А.Б. Приймак, К.В. Колесник Віртуальне моделювання прокатки у дротовому блоці	69
Е. В. Парусов, д.т.н., І. М. Чуйко, к.т.н., О. В. Парусов, к.т.н. Про ефективність побудови процесу волочіння бунтового прокату з вуглецевих сталей на засадах прогнозних моделей	69
О.Ю. Потап, к.т.н, А.В. Іванічик, М.В. Михайловський, к.т.н. Дослідження точності AGC-алгоритму регулювання товщини прокату в умовах високочастотних збурень	70
В.Г. Раздобреєв, к.т.н., К.Ю. Ключніков, Д.Г. Паламар, О.І. Лещенко Ресурсозберігаюча технологія виробництва профілю стрічкового типу способом волочіння в роликівих волоках з використанням розгінних калібрів	71
М.М. Штода, к.т.н. Розробка та впровадження температурно-швидкісного режиму прокатки круглих профілів на ТЗС ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	71
<b>Моделювання та оптимізація технологічних процесів</b>	72
Л.Т.Бойко, к.ф.-м.н., І.С. Ляшенко, магістр Застосування мурашиного алгоритму до розв'язування задачі комівояжера	72
О.П. Єгоров, к.т.н., М.О. Рибальченко, к.т.н., І.О. Маначин, к.т.н. Моделювання адаптивної системи керування температурним режимом муфельних електричних печей з нейронечітким регулятором	73
К.С. Красніков, к.т.н., В.О. Скоробреха Комп'ютерне дослідження домішкового засвоєння при вдуванні у розплав через осьову фурму	75
К.С. Красніков, к.т.н., Т.Ф. Фатихова Комп'ютерна візуалізація і аналіз впливу продув очного режиму осьової фурми на розмиття ковшової футеровки	75
К.С. Красніков, к.т.н., О.В. Феліпенко Чисельне дослідження застійних областей розплаву під час продування	76
Ю.О. Павленко, О.О. Жульковський, к.т.н., І.І. Жульковська, к.т.н., С.П.Пантейков, к.т.н. Комп'ютерна система для розрахунку конструктивних параметрів кисневого конвертера і верхньої фурми	76
О.П. Петров, О.В. Кукса, С.В. Греков, С.С. Черський Прогнозування та фізико-хімічних і теплофізичних властивостей нікельвмісних феросплавів	77
М.О. Рибальченко, к.т.н., В.І. Шибакінський, к.т.н., О.П. Єгоров, к.т.н. Моделювання АСР рівня металу у кристалізаторі МБЛЗ	78
В.Ю. Селівьорстов, д.т.н., О.І. Шакіров Стабілізація термочасових параметрів заливки сталі в керамічні форми	79
А. Ю. Семенко, к. т. н., О. П. Верзілов, к. т. н, Д. І. Гойда, м. н. с. Моделювання процесів магнітного впливу на струмінь металу на ділянці проміжний ківш-кристалізатор МБЛЗ	79
<b>Екологічні проблеми чорної металургії</b>	80
В.С. Киричок, аспірант, А.А. Надточій, к.т.н., О.М. Гришин, к.т.н. Вибір факторів для прогнозування властивостей марганцевих шлакових розплавів	80
В.О. Маслов, д.т.н., Л.О. Дан, к.т.н., Л.О. Трофімова, к.т.н. Зменшення негативного впливу на довкілля шляхом організації комплексного використання дисперсних залізо графітових відходів металургії	81
В. П. Руських, к.т.н., доцент, Ю. В. Хавалиць, Р. Ю. Кирсанов Про вплив металургії на зміну клімату	82
А.О. Хорольський, к.т.н. Оптимізація параметрів процесів отримання кінцевої продукції під час розробки родовищ благородних металів	83
І.І. Чоботько Доцільність застосування суспензій інгібіторів на основі натрієвої групи для обробки відвальної маси відходів вуглевидобутку	84

УДК 622.335

## ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ТА ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ ПИЛУ ДО ТА ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДОНЕЦЬКОГО АНТРАЦИТУ

В.А. Безуглий, А.С. Коверя<sup>1</sup>, к.т.н.<sup>1</sup>НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

Розвиток технічних засобів термічної обробки сипучих вуглецевих матеріалів, зокрема антрациту, направлений на використання регенерації фізичного тепла обробленого матеріалу шляхом продування газом-теплоносієм за замкненою схемою з постійною газо-очисткою. Особливістю викопного антрациту є наявність в його складі пилу, який утворюється як на усіх етапах видобутку та транспортування, так і під час процесу термічної обробки. У свою чергу, це викликає необхідність видалення антрацитового пилу з газового потоку. Таким чином, виникає потреба дослідження вмісту та фракційного складу пилу, який утворюється як до, так і під час термічної обробки антрациту.

Для дослідження був використаний антрацит Донецького вугільного басейну фракції 25-6 мм. Результати технічного аналізу наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічний аналіз досліджуваного антрациту

Параметр	Позначення	Одиниця	Значення	ГОСТ
Волога аналітичної проби	W <sup>a</sup>	%	3,8	11014-2001
Зольність на сухий стан	A <sup>d</sup>	%	5,3	11022-95
Вихід летких на горючий стан	V <sup>daf</sup>	%	6,9	6382-2001

Після відбору антрациту він був поміщений до герметичного пакету та транспортований до лабораторії, де після струшування шматки антрациту виймалися. Пил з пакету висипався в окрему ємність та розсіювався за фракціями на послідовно закріплених механічних ситах з розміром комірок у 40, 63, 100, 200, 315, 500 та 1000 мікрометрів. Для визначення поверхневого пилу антрацит порціями по 1 кг завантажувався у верхню частину сит та в закритому вигляді струшувався протягом 5 хвилин. Отриманий на кожному ситі пил зважувався за допомогою електронних ваг ТВЕ-0,21-0,001. Було відібрано 8 кілограмів антрациту, який піддавався термічній обробці у муфельній печі за температури 1200 °С протягом 2 годин. Після охолодження та виймання з печі визначався вміст та фракційний склад пилу термоантрациту за вказаною методикою. Результати вимірювань наведені на рисунку 1.

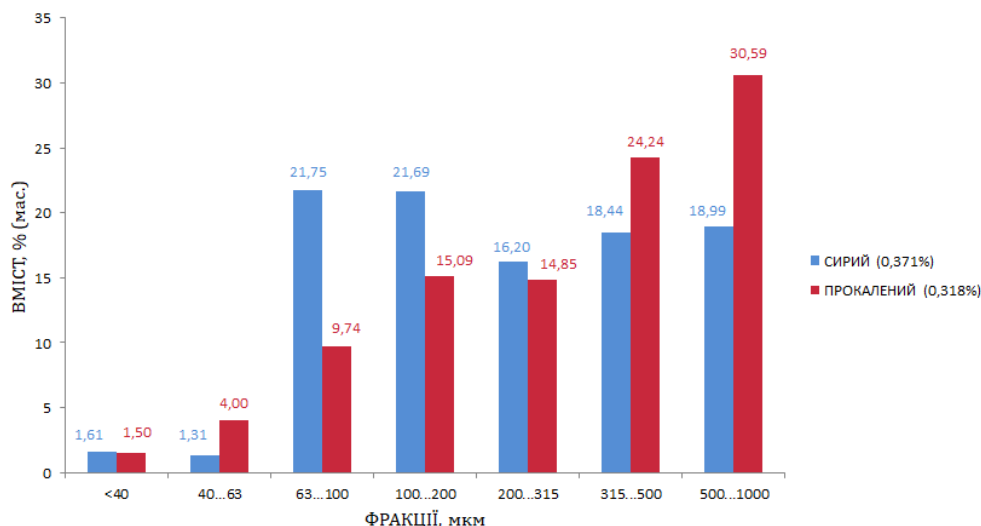


Рисунок 1 – Вміст та фракційний склад пилу до та після термічної обробки антрациту  
УДК 621.746.047:669.016.2

## ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЯКІСНОЇ ЗАГОТОВКИ МЕТОДОМ БЕЗПЕРЕРВНОЇ РОЗЛИВКИ ПРИ ЗБІЛЬШЕНІЙ СЕРІЙНОСТІ МЕТОДОМ «ПЛАВКА НА ПЛАВКУ»

В.Г. Герасименко, к.т.н., доцент, Л. С.Молчанов, к.т.н, Т. С.Голуб, к.т.н.

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

При серійному розливанні повинні пред'являтися підвищені вимоги до стійкості дозуючих пристроїв сталерозливних і проміжних ковшів та стійкості їх футеровки. Для підвищення стійкості та надійності футеровки промковша проводять операцію нанесення на робочий шар футерівки спеціального торкрет-покриття на основі MgO. Для посилення зони розташування занурювальних стаканів, що піддається максимальній ерозії (зона шлакового пояса), її оснащують вставкою зі стабілізованого діоксиду цирконію, що дозволяє розливати до 8-10 плавок через один занурювальний стакан. Для зниження зносу стопорів їх виконують з максимальним діаметром в зоні шлакового пояса і розташованої вище області кріплення стопора. Для досягнення тривалого розливання доцільно верхню частину стакану-дозатора виконувати з міцнішого матеріалу та покривати керамічним покриттям що зменшує швидкість заростання внутрішньої порожнини стакану-дозатора. Для захисту розливної труби використовують в зоні прийому струменя металу більш міцні вогнетриви збільшеної товщини. Для забезпечення надійної роботи футеровки проміжного ковша протягом розливу 10-20 плавок необхідно підвищувати стійкість днища й стінок у місці падіння струменя зі сталерозливного ковша шляхом встановлення високоглиноземистої або магнезійної цегли, які мають високу вогнетривкість й стійкість проти ерозійного впливу струменя сталі.

Температурно-швидкісний режим технології безперервного розливання сталі має визначальний вплив на стійкість футерівки при серійному розливанні сталі на МБЛЗ. Оптимальна температура металу в промковші повинна перевищувати температуру ліквідус на 25 – 30°C. Для цього в процесі розливання метал доводять до встановленої температури й надалі підтримують на заданому рівні. Відмічено, що втрати тепла сталлю в процесі її знаходження в сталерозливному ковші через стінки, днище та дзеркало металу складають 0,45 - 0,6 °C за хвилину й залежать від стану футеровки сталерозливного ковша. Щодо швидкісних показників розливання у сучасних конвертерних цехах з МБЛЗ, де широко застосовують лиття методом «плавка на плавку», швидкість розливання кожного перерізу зливка визначається ритмом видачі плавок з конвертерів. Технологічно можливі швидкості розливу залежать від перерізу БЛЗ, що відливаються, марки сталі й призначення готової продукції. Таким чином, фактори, що лімітують швидкість розливання сталі на МБЛЗ можна узагальнити за впливом на якість заготовки:

- 1) утворення поперечних тріщин на поверхні злитка, що викликаються силами тертя між оболонкою злитка та стінками кристалізатора (визначальні параметри – довжина кристалізатора та коефіцієнт тертя матеріалу стінок та змащуючого матеріалу стінок);
- 2) утворення поздовжніх тріщин в оболонці зливка до виходу з кристалізатора, що викликаються утрудненою усадкою (визначальні параметри - абсолютний розмір граней, співвідношення розмірів граней, коефіцієнт тертя, гладкий або хвилястий профіль робочих стінок кристалізатора);
- 3) утворення поздовжніх тріщин після виходу з кристалізатора, що викликаються прогином граней під дією феростатичного тиску (визначальні параметри – довжина кристалізатора, абсолютний розмір й співвідношення розмірів граней, конструкція пристроїв, що підтримують);
- 4) систематичні обриви оболонки злитка під час руху кристалізатора вгору (визначальні параметри – закон, частота та амплітуда зворотно-поступального руху кристалізатора, коефіцієнт тертя, якість поверхні зливка).



## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ СОПЛА КОГЕРЕНТНОГО ТИПУ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОНВЕРТНОЇ ПЛАВКИ

Т.С. Голуб, к.т.н., Л. С. Молчанов, к.т.н., С.І. Семикін, к.т.н., В.В. Вакульчук, к.т.н.

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

Згідно зі статистичним звітом Всесвітньої організації з виробництва сталі у 2021 році загальний обсяг виробництва конвертерної сталі становив 73,2% від загального обсягу. А відповідно до прогнозів фахівців, киснево-конверторний процес зберігатиме свої позиції й у подальшій перспективі. При цьому найбільш актуальним зберігається задача зниження викидів вуглекислого газу на тону готової продукції. Відповідно до робіт ряду авторів найпростіший спосіб вирішення цього завдання – підвищення частки брухту в конвертері. Зазначений ефект досягається за рахунок використання спеціальних фурм для збільшення ступеня допалювання монооксиду вуглецю - двоярусних й дворядних, які забезпечують підвищення вмісту теплоти ванни. При цьому актуальним є дослідження та розробка для фурм прогресивних конструкцій наконечників, що сприятимуть підвищенню ефективності допалювання, і відповідно їхньої теплової роботи.

У практиці електрометалургійного виробництва існують позитивні результати використання когерентних сопел, що складаються з центрального сопла та зовнішньої кільцевої оболонки, яка створює захисний шар для підвищення аеродинамічної ефективності центрального струменя. У літературі представлено результати досліджень, за якими можливо припустити доцільність застосування сопел когерентного типу для умов верхньої киснево-конвертерної продувки.

Були виготовлені зразки лабораторних сопел когерентної конструкції що відрізняються співвідношенням центральної та периферичної частини при дотриманні рівності загальних умов виходу струменів (відсоткова частка кільцевого зазору по відношенню до загальної площі сопла, %: 75, 65, 50, 45, 35, 25). Їх досліджували шляхом зважування струменя, оцінки їх сили дії за допомогою модифікованого рідинного манометра та тіньової фотозйомки при досягненні швидкості газового потоку при виході з сопла на рівні 2 М. Отримані результати порівнювали з параметрами циліндричними соплами відповідного діаметру.

За результатами проведених досліджень встановлено:

- для когерентних струменів характерна досить стабільна структура;
- ширина початкового розкриття струменя приблизно у два рази більша й зберігається на достатній відстані;
- структура когерентного струменя з часткою кільцевого зазору більше 50% складається з об'ємної складновузелкової структури ділянок підвищеного тиску з короткими проміжками між ними, а при менших параметрах джгутова, як у струменя, що витікає з циліндричного сопла, з більшими проміжками між ущільненнями;
- при продуванні крізь сопла когерентного типу з часткою кільцевого зазору 45-50% структура струменя неоднорідна без наявних ущільнень.

За результатами зважування струменів, що витікають з сопел когерентного типу та дослідження їх сили впливу встановлено:

- значне (на 40 – 45 %) збільшення ваги та сили дії струменя при використанні сопел з часткою кільцевого зазору 55-65 %;
- використання сопел з кільцевого зазору 45-50% не приводить до збільшення сили дії;
- при кільцевого зазору 25-35% вага струменя менше на величину порядку 5%.

Таким чином, конструкція когерентного сопла з часткою кільцевого зазору 75% може бути рекомендована для застосування на другому контурі або другому ярусі верхніх продувних фурм кисневого конвертера. При їх застосуванні буде досягнуто ефективніше допалювання відпрацьованих газів у зв'язку зі збільшенням поверхні контакту струменя з димовими газами.

## ФОРМУВАННЯ КАРБІДНОЇ ФАЗИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ВІДНОВЛЕННІ ХРОМА У СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

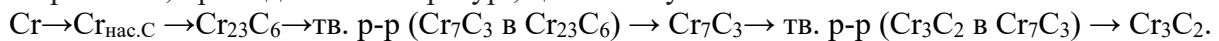
**О.М. Гришин к.т.н., А.А. Надточій к.т.н., В.О. Петренко д.т.н.**

**Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро**

Розробка фізико-хімічних закономірностей твердофазного відновлення оксидів з метою отримання багатокомпонентних губчастих лігатур дуже актуальний напрямок у металургії. Однак до цього часу немає єдиного уявлення, як про механізм процесу, так і закономірностей формування продуктів відновлення, що утворюються. Існуючі погляди на фазові і структурні перетворення при відновленні хромової руди не повною мірою враховують і спираються на закономірності кристалохімічних перетворень.

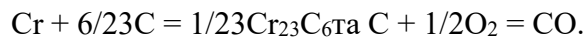
Твердофазне відновлення хрому в простих та складних системах практично неможливе без участі вуглецю. Хром має високу спорідненість до вуглецю, що призводить до утворення карбідів.

Формально, при заданій температурі, це можна уявити схемою:



Ця схема побудована відповідно до принципу послідовності перетворень.

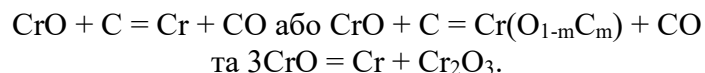
Твердофазне відновлення хрому без участі вуглецю (наприклад, гостроосушеним воднем) реалізується послідовно  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CrO} \rightarrow \text{Cr}$ . Введення в систему вуглецю запускає процеси утворення карбідів і в міру втрати кисню можна припустити, що на тлі наростання нестабільності кристалографічних ґрат оксиду можливе утворення оксикарбідів змінного складу  $\text{Cr}_2(\text{O}_{3-n}\text{C}_n)$ . "Живість" таких сполук буде дуже малою через високу спорідненість хрому до вуглецю, а також останнього до кисню. У межах структури оксикарбиду надалі можливі перетворення:



У такій формі енергетично краще взаємодія вуглецю з киснем, проте складно оцінити, як зміниться пріоритет цих взаємодій в межах кристалічної решітки оксикарбиду.

Таким чином, на першому етапі відновлення відбувається формування двох фаз:  $\text{CrO}$  та  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  через проміжну фазу оксикарбиду  $\text{Cr}_2(\text{O}_{3-n}\text{C}_n)$ , який забезпечує більш стійкий стан системи та отже менші енергетичні витрати переходу від однієї фази до іншої.

Відновлення на другому етапі монооксиду хрому ( $\text{CrO} \rightarrow \text{Cr}$ ) може паралельно супроводжуватися, при  $T > 697^\circ\text{C}$ , його диспропорціюванням. Одночасно можуть протікати дві реакції:



Карбід  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , що утворився на першому етапі, надалі може перетворюватися на тригональний карбід  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (і далі  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ). Термодинамічно можлива також взаємодія хрому з карбідом  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  за реакцією:



Разом з тим, термодинамічно більш переважно утворення карбиду  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  щодо реакції  $\text{Cr} + 6/23\text{C} = 1/23\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Вуглець, що знаходиться в підрешітці впровадження оксикарбиду, у міру видалення кисню, взаємодіє з хромом, утворюючи карбід  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ .

Відновлення  $\text{CrO}$  на другому етапі також можуть проходити через стадію утворення оксикарбиду  $\text{Cr}(\text{O}_{1-m}\text{C}_m)$ , який далі трансформується у  $\text{Cr}$  або карбід  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Термічний розпад  $\text{CrO}$  супроводжується утворенням оксиду хрому, який у подальшому повторить алгоритм відновлення, що приведений вище:  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CrO} \rightarrow \text{Cr}$ .

УДК669.112.2:669.26

## ВПЛИВ ДОБАВКИ Fe<sub>мет</sub> НА ВУГЛЕЦЕВОТЕРМІЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДУ ХРОМУ

**О.М. Гришин к.т.н., А.А. Надточій к.т.н.**

**Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро**

Експериментальній перевірці були піддані можливі шляхи розвитку вуглецевотермічного відновлення Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вихідними речовинами були оксид хрому(III) кваліфікації ЧДА і спектральний графіт.

Дослідження, які проведені в неізотермічному режимі зі швидкістю нагріву зразка ~10К/хв, показали, що вуглецевотермічне відновлення Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> починається трохи вище 1100<sup>0</sup>С. При 1200<sup>0</sup>С процес розвивається зі значною швидкістю – протягом процесу ω досягав ~30%. Відновлення оксиду хрому призвело до утворення стабільного Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. Однак слід зазначити, що рентгеноструктурні дослідження виявили появу невеликих кількостей термодинамічно нестійкого Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Експериментальні дослідження підтвердили висновки термодинамічного аналізу про можливість появи нестійких твердих продуктів при вуглецевотермічному відновленні Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і участі утвореного Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> у видаленні кисню оксидної фази.

Оскільки дана робота спрямована на розробку фізико-хімічних основ твердофазного виробництва ферохромних легуючих матеріалів, необхідно визначити вплив Fe<sub>мет</sub> на кінетику процесу і встановити можливий механізм такого впливу. Було встановлено, що введення заліза гальмує відновлення Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вуглецем при 1200-1300<sup>0</sup>С. Це узгоджується з літературними даними. Негативний ефект стався і мало змінився при варіації ваги добавки в діапазоні від 10 до 100% по відношенню до початкового вмісту хрому в зразку. Ефект інгібування процесу добавками Fe<sub>мет</sub> не може бути пов'язаний з погіршенням контакту оксидної фази зі С<sub>тв</sub>. Цьому висновку суперечить незмінність швидкості відновлення Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при введенні в шихту навіть великих кількостей інертного розчинника Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Пояснення встановленого факту слід шукати з урахуванням неоднозначного впливу заліза на кінетику процесу. З одного боку, Fe<sub>мет</sub> може прискорити відновлення за рахунок каталітичного впливу на реакцію і розчинення в ньому хрому і його карбиду. З іншого боку, можна уповільнити процес за рахунок витрати частини СО на карбюризацию заліза і утворення його карбиду.

УДК 669.162.2.04 : 001.8

УДК 669.162

## ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТКИ ПРИ ПРОНИКНЕННІ ЇЇ РІДКИЙ ЧАВУН

**В.І. Єліссєв<sup>1</sup>, к.ф-м.н., І.О. Маначин<sup>2</sup>, к.т.н., А.П. Шевченко<sup>2</sup>, д.т.н., Л.А. Флєср<sup>3</sup>, к.т.н.**

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки НАН України, м. Дніпро

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

<sup>3</sup>Дніпровський національний університет, м. Дніпро

Технології інжекційної десульфурації чавуну засновані на введенні частинок реагенту (магнію вапна та карбиду кальцію) у рідкий метал за допомогою швидкісних газових струменів. Закономірності поведінки двофазних струменів з рідинами складні, оскільки втрачаються індивідуальні динамічні характеристики окремої частки. Однак залишається важливим питання про співвідношення кількості частинок, що занурилися вглиб металу (у разі застосування

магнію), і частинок, що опинилися у спливаючому пазурі (у разі застосування вапна та карбїду кальцію). Внаслідок цього, цікавим є питання про занурення окремої частинки в метал. З гїдродинамічної точки зору задача проникнення тїл у рїдину вїдноситься до класичного типу гїдродинамічних задач, якї є актуальними в наш час. На основї основних рївнянь Навьє - Стокса розробленї методики для знаходження динамічних характеристик тїла, що входить у рїдину з урахуванням каверни, що за нею утворюється. Для оцїнки динаміки частки приймемо, що кульове тїло нерухоме, а на нього набїгає шар рїдини, рух квазїстаціонарно, і тиск вздовж утворює поверхнї кулі, що входить в рїдину, пїдпорядковується закону Лагранжа - Коші.

З розрахунків випливає, що глибина занурення частки магнію радіусом 0.5 мм за наявності каверни за часткою становить кїлька калїбрів. Для початкової швидкості 20 м/с це близько 6 калїбрів, а для швидкості 140 м/с – приблизно 10 калїбрів. Далї частка починає виштовхуватися силою Архімеда. Таким чином, частка практично не йде далеко від основної поверхнї пазуря, що утворюється струменем газу. Подальшї стадїї процесу пов'язанї, як із дрібномасштабною турбулентністю, що утворюється в результатї коливань кінчика газового струменя, так і від поведінки самого мїхура, від його відриву від сопла, спливання та дроблення.

Найважливішою стороною процесу рафїнування чавуну магнієм є його розплавлення, випаровування, а потїм завдяки високому парціальному тиску пари подальше розчинення в масї металу. Це забезпечує досить швидко об'ємне споживання магнію при десульфуратїї, що є основною перевагою технологїї його використання. Для вапна або карбїду кальцію, для яких десульфуратїя йде на поверхнї частинок основним питанням є розосередження частинок та вїддалення їх від основного мїхура, що повинно призводити до збїльшення реакційної поверхнї. Результати розрахунків для частинок вапна (карбїду кальцію) для двох випадків: малих діаметрів ( 0.1 мм) і великих ( 2 мм), показують, що питома ступїнь десульфуратїї значною мїрою залежить від діаметра частинок вапна (карбїду кальцію), що вدمеться в рїдкий чавун. Для великих частинок глибина занурення може бути достатньою, щоб завдяки локальним коливанням і випадковим імпульсам частка, яка опинилася на вїдстанї близько 10 – 15 мм від поверхнї мїхура не повернеться до нього. Дрібнї ж частинки, практично не пробивають поверхню, тому вони комкуватимуться в її околицї і спливатимуть у вигляді згустків. Такї згустки в залежності від їх розмірів можуть розбиватися імпульсними потоками і, потрапляючи у великі гїдродинамічні вихровї потоки, розноситися по всьому об'єму і пїсля закінчення основної стадїї процесу довго спливати вгору.

Слїд зазначити, з розрахунків з математичної моделї, швидкостї частинок швидко падають, що призводить до змїни структури течїї, тобто. у разї існування каверни за тїлом, значну роль гратимуть капїлярнї сили. У моделї вони врахованї, але як додатковий чинник.

УДК 669.184

## **ВПЛИВ ЯКОСТІ ЗАЛІЗОВМІЩУЮЧИХ БРИКЕТІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ**

**Єськов Д.В., аспїрант, Сїгарьов Є.М., д.т.н., Похвалїтїй А.А., к.т.н.**

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

Використання залїзовміщуючих вїдходів у киснево-конвертерній плавцї з пїдвищеною часткою металобрухту в металошихтї потребує додаткового дослїдження впливу їх якостї на енерго-економічнї показники.

Збїльшення частки металобрухту у металошихтї на 1 % супроводжується зменшенням надходження фізичного тепла переробного чавуну на 0,11 ГДж/т. В той же час забезпечується надходження тепла за рахунок переокислення залїза і зменшення енергоємності виплавленої сталї. Коригування теплового балансу плавки здїйснюється як за рахунок пїдвищення ступеня

допалювання CO відхідних газів, так і попереднім підігрівом металошихти в робочому просторі агрегату. Технологією конвертерної плавки з підвищеною до 32-36% витратою металобрухту в умовах ПрАТ «Камет-Сталь» передбачений попередній його підігрів за рахунок тепла окислення присадженого кускового вугілля газоподібним киснем.

Загальні витрати енергії на переробку металобрухту залежать від ступеня його окисленості та забрудненості неметалевими включеннями (НВ) і складають за різними оцінками від 1,4 до 1,7 ГДж/т. Нижня межа відповідає використанню «чистого» брухту (т. зв. «інтегральна» забрудненість НВ ( $K_{зи}$ ) не перевищує 2% від маси брухту), а верхня – брухту з  $K_{зи} > 5\%$ .

В умовах обмежених ресурсів якісного металобрухту до складу металошихти конвертерної плавки вводять брикети зі сталеві стружки (в умовах ПрАТ «Камет-Сталь» 8-12% від маси металобрухту). Вигар заліза брикетів по ходу плавки зазвичай складає 3-5%. Відсоток виходу рідкого металу з брикетів та ефективність їх застосування у якості замітника сталевого брухту залежать від вмісту мастильно-охолоджуючих речовин (МОР) на поверхні стружки, ступеня її окисленості, складу й вмісту НВ.

Досліджені процеси нагріву та плавлення брикетів сталеві стружки з різним вихідним вмістом НВ, фракційним складом та кількістю МОР, динаміка утворення оксидів заліза на поверхні стружки під час попереднього їх підігріву. Використано методики високотемпературного експерименту.

Встановлено, що у досліджених зразках брикетів значення  $K_{зи} = 2,1-7,8\%$ . Швидкість окислення заліза брикетів (без створення газового захисного середовища над їх поверхнею) максимізується при досягненні температур 460-580 °С та у подальшому зменшується внаслідок гальмівної дії утвореного на поверхні стружки шару оксидів. При високих градієнтах температур за товщиною оксидного шару, коефіцієнти теплопровідності приблизно 0,2 Вт/м·К та об'ємному коефіцієнті передачі тепла 35-40 Вт/м<sup>3</sup>·К нагрів брикетів стружки проходить повільніше ніж «чистого» сталевого брухту.

Визначили середній хімічний склад отриманого зі стружки металу та дослідили макроструктуру шлаків, відібраних з поверхні ванни по ходу розплавлення брикетів, з метою визначення їх впливу на хімічний склад первинного конвертерного шлаку та встановлення характеру взаємодії з футерівкою конвертера у перший період плавки.

Охолоджуюча дія оксидів заліза приблизно у три рази вища, ніж неокисленого сталевого брухту. Зростання вмісту оксидів заліза на поверхні металобрухту під час підігріву його підігріву ( $\Delta K_{нагр}$ , %) дещо обмежує можливості переробки підвищеної його кількості у конвертері. Енергоефективна межа нагріву, що визначена на основі підвищення ентальпії брухту (кДж/кг) під час його нагріву на  $\Delta T_{\sigma}$ , °С орієнтовно може бути визначена за емпіричним виразом:

$$\Delta K_{нагр} = (0,5 \cdot \Delta T_{\sigma} + 26 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T_{\sigma}^2) / 52,1$$

Отримані дані використані для розробки раціональних режимів попереднього підігріву металошихти з використанням у їх складі брикетів у 250-т конвертерах. Показана недоцільність нагріву брухту до температури нижче 410 °С.

Енергоефективність застосування брикетів з сталеві стружки визначали з врахуванням питомих витрат енергії на їх виготовлення (0,231 ГДж/т), збирання стружки та логістики (0,24-0,30 ГДж/т). При розрахунку впливу якості брикетів при попередньому підігріві металобрухту враховували і хімічний тепловміст брикетів. Встановлено діапазон змін енергоємності металошихти при її попередньому підігріві, з врахуванням ентальпій відповідних реакцій та рівня  $K_{зи}$  брикетів. Енергоємність запропоновано визначати з врахуванням виразу:

$$E_{II} = C_{ТВ} \cdot \Delta T_{\sigma} + \left(1 - \frac{K_{ЗИ}}{100}\right) \cdot (7345 + 274,5 \cdot \%C + 196,5 \cdot \%Si + 21,4 \cdot \%Mn + 124,5 \cdot \%P)$$

де  $C_{ТВ}$  – питома теплоємність металобрухту, МДж/кг °С.

## АНАЛІЗ КОМПОНЕНТІВ ШЛАКОУТВОРЮЮЧОЇ СУМІШІ ДЛЯ ОДНОСТАДІЙНОГО ВИДАЛЕННЯ ДОМІШОК ІЗ ЧАВУНУ

В.Г. Кисляков<sup>1</sup>, Л.С. Молчанов<sup>1</sup>, О.Л. Руденко<sup>1</sup>, В.П. Петруша<sup>1</sup> М.В. Пушкаренко<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Український державний університет науки та технології, Дніпро

Киснево-конверторний спосіб виробництва сталі, що займає в даний час провідне місце за обсягом сталі, що виплавляється, являє собою швидкоплинний процес, в якому операції з рафінування металу від деяких домішок обмежені. Тому перспективним є винесення операцій рафінування металу з основних агрегатів (доменна піч, кисневий конвертер) у проміжні ємності (чавуновозні ковші) [1-3].

Після вирішення проблеми видалення сірки з чавуну в металошихті залишаються два елементи - кремній і фосфор, надлишковий вміст їх створює ряд незручностей при використанні такого чавуну в конвертерній плавці: додаткова витрата шлакоутворюючих матеріалів, збільшення кількості конвертерного шлаку, збільшення втрат металу з цим шлаком.

В силу різних термодинамічних і кінетичних умов протікання цих процесів (окисних – кремній та фосфор, відновлювальних – сірка) необхідно використовувати рафінуючий шлак, що володіє високою сорбційною здатністю до сірки та фосфору, а також має низьку температуру плавлення та в'язкість.

Виходячи з вище викладеного цікавить розробка варіанта компонентного складу шлакоутворюючої суміші, яка певною мірою нівелює ці недоліки.

Численними дослідженнями встановлено, що вапняні шлаки при температурі обробки чавуну 1350-1400<sup>0</sup>С є твердим конгломератом зі шлакової та металеві фази. Додаток до вихідної суміші розріджуючого компонента (наприклад Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) знизить температуру плавлення та в'язкість шлаку, що дозволить здійснити не тільки знекремлювання та десульфуріацію чавуну, але і його дефосфоруацію.

При цьому стоїть питання пошуку раціонального співвідношення CaO, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> та O<sub>2</sub>, зумовлене летючістю карбонату натрію при взаємодії з рідким чавуном.

Для виявлення оптимальних співвідношень компонентів суміші проведено експериментальні обробки, деякі результати з яких наведені на рис. 1 та 2, де основність  $B = (CaO + Na_2CO_3) / (SiO_2 + Al_2O_3)$ , в'язкість  $\eta = f(\Delta e, \rho)$ .  $\Delta e, \rho$  - параметри міжатомної взаємодії [4].

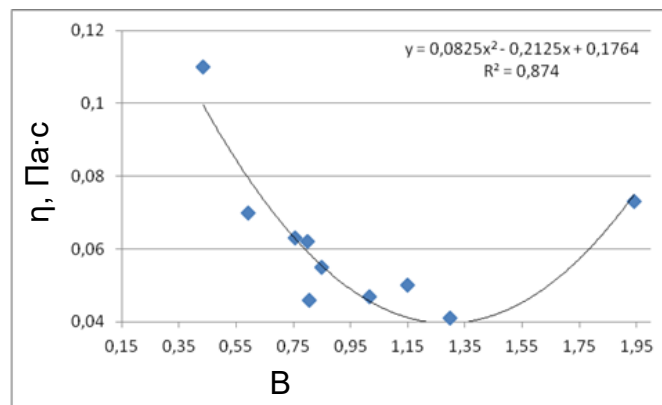


Рис. 1 – Вплив основності содовмісного шлаку на його в'язкість.

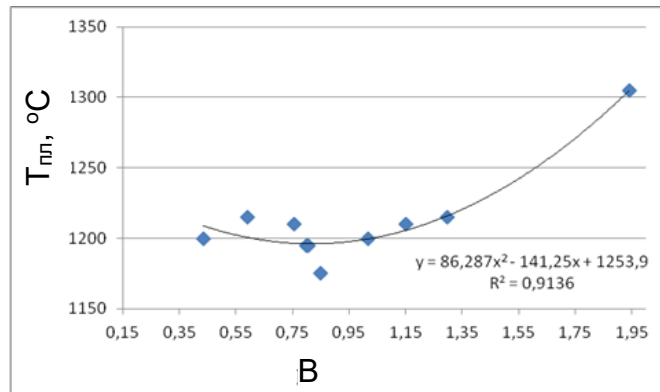


Рис. 2 – Вплив основності содовмісного шлаку на його температуру плавлення.

**Висновок.** З використанням теорії спрямованого хімічного зв'язку вивчено вплив основності содовмісного шлаку на його фізико-хімічні властивості та виявлено оптимальні співвідношення компонентів рафінуючого шлаку.

### Список літератури

1. Чернятевич А.Г. Разработка технологии одновременного обескремнивания и десульфурации чугуна в заливочном ковше / А.Г. Чернятевич, А.С. Вергун, А.Н. Кравец, В.Н. Селищев // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 2000. - №10. – С.14-18.
2. Эффективность комплексной обработки чугуна /Зотов А.В., Гулыга Д.В., Вергун А.С., Шевченко А.Ф., Вяткин Ю.Ф., Руденко А.Л., Коваль В.А., Бельман Л.М. //Сталь. - 1993.- №7.- С.18-20.
3. Вергун А.С. Опробование комплексной обработки чугуна натрийсодержащим шлаком // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. - №1. – С.11-15.
4. Приходько Э. В. Металлохимия многокомпонентных систем.- М.: Металлургия,- 1995,- 320 с.

УДК 621.785.6.669.14.018.252.3

## ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ

С. Є. Кондратюк д. т. н., проф., Ж. В. Пархомчук к. т. н., В. І. Вейс

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

Досліджено вплив перегрівів розплаву перед розливкою на формування структури та характеристик руйнування по перерізу виливків на прикладі сталей 25Л та 30ХГСЛ. Температури розливки для обох сталей становили 1570 °С, 1620 °С та 1670 °С, при цьому були різні швидкості охолодження при кристалізації – звичайне 2-5 °С/с та швидке, що становило близько 300-350 °С/с. Звичайні умови охолодження – розливка металу у піщані форми, а швидке – у мідні водоохолоджувані форми за умов переважаючого одностороннього тепловідбору від торцевої частини виливків під час кристалізації. При цьому, для забезпечення спрямованого тверднення, бокові поверхні форми, окрім тепловідвідної, були теплоізоляовані. Зразки для досліджень виготовляли з металу центральних частин виливків по довжині.

Металографічні дослідження показали формування у виливках сталей по перерізу основних структурних зон: поверхневої дрібних рівноосних кристалів, зони транскристалізації з утворенням стовпчастих кристалів, перехідної зони розгалужених і зони великих рівноосних кристалів. При цьому протяжність цих зон змінюється залежно від термодинамічних умов

кристалізації виливків, а саме збільшення протяжності зони приповерхневих дрібних кристалів і зони транскристалізації при швидкісному охолодженні розплаву. Градієнтність досліджуваної структури по перерізу виливків чітко демонструє зміна розміру зерна (ДСТУ 8972:2019) залежно від температурно-часових умов кристалізації сталей. Максимальна дисперсність зерна досягається в поверхневих об'ємах виливків за умов швидкого охолодження і значного перегріву розплаву до 1670 С. По мірі приближення до центру виливків розмір зерна збільшується в середньому на 4-5 номерів для сталі 25Л та на 6-8 номерів для сталі 30ХГСЛ. За умов звичайного охолодження і перегріву розплаву до 1670 °С спостерігається значне збільшення розміру зерна у виливках сталей в цілому, а також по глибині виливків в середньому на 4 номери (сталь 25Л) і на 6 номерів (сталь 30ХГСЛ). Подібна диференційованість структури створює передумови значних відмінностей щодо їх опору крихкому руйнуванню залежно в різних структурних зонах литих виробів залежно від інтенсивності тепловідбору та ступеню перегріву розплаву.

Результати визначення ударної в'язкості на стандартних зразках з надрізом Менаже по перерізу виливків сталей показали, що швидке охолодження розплаву при цьому зумовлює значне підвищення значень ударної в'язкості по перерізу виливків і складає 50-35 Дж/см<sup>2</sup> для сталі 25Л та 40-20 Дж/см<sup>2</sup> для сталі 30ХГСЛ, навіть за умов перегріву розплаву до 1670 °С. За умов звичайного охолодження відбувається значне зниження значень ударної в'язкості по перерізу виливків від 30 до 15 Дж/см<sup>2</sup>.

Описані умови кристалізації, тверднення і структуроутворення створюють значну кількість фазово-структурних неоднорідностей в дослідженому металі, що може відігравати визначальну роль у забезпеченні певного ресурсу і надійності в експлуатації литих сталевих виробів. Досліджено зв'язок температурно-часових параметрів кристалізації і структуроутворення виливків з градієнтною структурою на характеристики їх руйнування в температурному інтервалі в'язко-крихкого переходу. Встановлено, що підвищення температури перегріву розплаву в межах 1570 °С – 1670 °С зумовлює, в разі його швидкого охолодження при кристалізації, суттєве підвищення показників ударної в'язкості сталей по перерізу виливків у всьому інтервалі температур випробування (+20 °С... –60 °С) від 6-21 Дж/см<sup>2</sup> до 46-56 Дж/см<sup>2</sup> для сталі 25Л та від 14-19 Дж/см<sup>2</sup> до 42-43 Дж/см<sup>2</sup> для сталі 30ХГСЛ. При звичайному охолодження і за нормального перегріву розплаву до 1570 °С максимальні значення ударної в'язкості в різних об'ємах виливків за тих же температурних умов випробування змінюються в межах 34-4 Дж/см<sup>2</sup> для сталі 25Л та 38-13 Дж/см<sup>2</sup> для сталі 30ХГСЛ. Таким чином встановлено, що на значні зміни характеристик руйнування (КСУ) у різних макрооб'ємах виливків сталей чинить вже швидкість тепловідбору під час кристалізації.

## **АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ, СПРЯМОВАНИХ НА ДЕКАРБОНІЗАЦІЮ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА**

**Б.В. Корнілов, к.т.н., О.Л. Чайка, к.т.н., А.О. Москалина, к.т.н.,  
О.Є. Меркулов, д.т.н., М.М. Ізюмський**

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

У доповіді обговорюються результати теплоенергетичного та ексергетичного аналізу потенціалу нових та існуючих технологій скорочення викидів діоксиду вуглецю та витрати коксу, можливості збільшення виробництва чавуну за рахунок вдування в горн водню та водневмісних паливних добавок, застосування металодобавок, збільшення температури дуття, зменшення теплових втрат та поліпшення газоросподілу в доменній печі.

З використанням розробленої в ІЧМ НАНУ математичної моделі повного енергетичного балансу доменної плавки виконано оцінку впливу потенціалу нових та існуючих технологій на зменшення викидів CO<sub>2</sub> та техніко-економічні показники доменної плавки.



Викиди CO<sub>2</sub> в доменному виробництві можна знизити на 25-30% за рахунок внесення змін до технології доменної плавки і залежать вони від інвестицій, сировинної та енергетичної бази металургійного підприємства, рівня існуючої технології доменної плавки. Однак таке зменшення викидів CO<sub>2</sub> за рахунок застосування водню та водневмісних паливних добавок може бути економічно не вигідним з точки зору подорожчання металопродукції. На сьогоднішній день застосування пиловугільного палива є основним фактором зменшення собівартості виробництва чавуну у передовій практиці.

Тому в доповіді наводяться розрахунки зменшення викидів CO<sub>2</sub> та зміни витрати коксу та виробництва чавуну при зменшенні витрати пиловугільного палива та збільшення витрати водню та водневмісних паливних добавок, та їх комбінацій.

Обмежувачими чинниками вдування водню та водневмісних паливних добавок в горно доменної печі є ступінь прямого відновлення заліза, теоретична температура, наявність кисню і температура колошникового газу. На підставі цих обмежень визначено граничні значення вдування водню та водневмісних паливних добавок.

Збільшення температури дуття є потужним резервом зменшення викидів CO<sub>2</sub> до 10% і більше та, в цілому, покращення техніко-економічних показників плавки.

Застосування чистих металодобавок дає суттєвий ефект щодо зменшення викидів CO<sub>2</sub>, який можна порівняти з вдуванням чистого водню, але лімітований їх наявністю та ціною. Якщо при отриманні чистої металодобавки застосовується вуглець, кількість викидів CO<sub>2</sub> на металургійному підприємстві не зменшиться.

УДК 669.162

## **РЕЖИМНІ ПАРАМЕТРИ ВИПУСКУ ПРОДУКТІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ**

**Крячко Г.Ю., к.т.н., Сігарьов Є.М., д.т.н., Кузнецов М.С.**

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

На основі критичного аналізу робіт, спрямованих на удосконалення режимних параметрів випускної системи доменних печей, виконано оцінку в першому наближенні впливу зміни режиму випусків продуктів плавки на стан коксової насадки в горні (більш точно на відстань між рівнями повітряних фурм і чавунних льоток), а також на стабільність температури чавуну на випуску. Кожен з параметрів випускного режиму – кількість і тривалість випусків, інтервал між ними, геометрія каналу чавунної льотки та розміщення льоток по окружності горна пов'язані між собою, однак по різному можуть впливати на роботу доменної печі.

Показано, що прогрес в доменному виробництві пов'язаний з певними змінами в конструкції, параметрах і роботі випускної системи печей. До останніх віднесені збільшення рівномірності розміщення чавунних льоток по окружності горна; тенденція до зменшення кута нахилу каналу чавунної льотки зі збільшенням абсолютної і відносної глибини зумпфу й перехід від тимчасової зміни діаметру буру і відповідно каналу льотки до алгоритмізації вибору і постійного коректування цього діаметру у відповідності зі зміною властивостей продуктів плавки і режиму випуску.

Показано, що підтримання максимально можливої відстані від зони повітряних фурм до поверхні розділу «газ – шлак» в коксовій насадці перед відкриттям чавунної льотки досягається за рахунок зближення масових швидкостей накопичення і випуску розплавів. Тому раціональною технологією випуску слід вважати не таку, за якою збільшення тривалості випуску досягається за рахунок зменшення його масової швидкості, а таку, за якою підтримується тривалий випуск зі зближеними швидкостями накопичення і видачі продуктів плавки.

Якщо кількість чавунних льоток і їх розміщення по окружності горна пов'язані з будівництвом нових або модернізацією існуючих печей, то геометричні параметри самої чавунної льотки можуть змінюватися в період кампанії печі в залежності від вибраного режиму

випусків продуктів плавки. Сучасному погляду на геометрію каналу чавунної льотки відповідає схема за якою довжина і форма каналу льотки залежить від способу подавання запірної льоточної маси. «Коротка» льотка виникає при обмеженій кількості запірної маси і сприяє пришвидшенню випуску, подовжена з грибоподібним наростом сповільнює випуск.

Зроблено висновок на користь напряму, за яким збільшення продуктивності доменних печей пов'язане з намаганням зблизити швидкості накопичення і випуску продуктів плавки, оскільки за цим напрямом створюються умови для підтримання рівного ходу печей і стабілізації якості чавуну.

На основі аналізу вітчизняного і зарубіжного досвіду сформульовано вимоги до конструктивного оформлення випускної системи доменних печей. Для забезпечення дренажу в коксовій насадці при будівництві нових і модернізації існуючих печей відстань в плані між чавунними льотками повинна бути максимальною. Довжина і кут нахилу каналу для формування чавунної льотки в огорожі горна повинні бути узгоджені з об'ємом і профілем печі, а також умовами її експлуатації.

Показано, що при зростанні продуктивності печі і збільшенні числа випусків збереження їх тривалості і швидкості видачі продуктів плавки нівелює додаткові збурення доменного процесу і супроводжується зменшенням коливань температури чавуну.

Зміна режиму випусків шляхом зближення масових швидкостей накопичення і випуску продуктів плавки створює умови для одночасного зменшення вмісту кремнію і сірки в чавуні, тоді як у звичайних умовах реалізації доменного процесу поведінка вказаних домішок протилежна – при зростанні температури вміст кремнію в чавуні зростає, а сірки – зменшується.

УДК 669.18.046.5:669.013.083.133

## **АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ МЕХАНІЗМІВ РУЙНУВАННЯ ПЕРИКЛАЗО-ВУГЛЕЦЕВИХ ПЛАВЛЕНИХ ВОГНЕТРИВІВ ПІД ВПЛИВОМ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**Л. С. Молчанов, к.т.н., Т.С. Голуб, к.т.н.**

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

В сучасних умовах експлуатація значної кількості металургійного технологічного обладнання та певних його конструкційних елементів, особливо тих, що використовуються при екстремальному впливі агресивних середовищ і температурних режимів, наближається до граничної межі проєкційної міцності. Особливе значення зазначений аспект має в Україні по відношенню до металургійних підприємств з огляду на їх складне економічне становище та відсутності можливості глибокої модернізації існуючого технологічного обладнання. Найбільш критичним, з позицій тривалості експлуатації, конструкційним елементом для металургійних агрегатів є вогнетривка футерівка. Таким чином в сучасних умовах актуальним є питання розробки комплексних методів моніторингу та своєчасного виявлення ділянок локального руйнування вогнетривких елементів технологічного обладнання, що виникають через вплив агресивного робочого середовища і додаткового впливу високих температур.

Відповідно до проведених досліджень уточнені механізми руйнування периклазо-вуглецевих плавлених вогнетривів (ПВП), що використовуються у кисневих конвертерах та іншому металургійному устаткуванні. Підтверджено, що механізми руйнування є різними для різних ділянок футерівки, що зумовлено різною природою фізико-хімічного впливу середовища, з яким контактує вогнетрив. Відповідно до встановленої макрокартин руйнування вогнетривів визначено, що найбільш агресивним є вплив металургійних шлаків, який зумовлює утворення в об'ємі вогнетрива зневуглецьованої перехідної зони. Таким чином відбувається

погіршення контакту вуглецевої зв'язки з зернами периклазу та спостерігається структурне руйнування. Це виражається в утворенні тріщин та порожнин, що спричиняють руйнування вогнетривкого матеріалу по межі контакту зі шлаковим розплавом.

З огляду на фізико-хімічну структуру ПВП вогнетриву (наявність вуглецевої зв'язки), у якості параметру для визначення глибини руйнування було обрано електричний опір ділянки вогнетривкого матеріалу, що досліджується. На підставі відомостей про зміну опору ПВП вогнетривів з залежності від температури та вмісту вуглецю були розроблені аналітичні вирази для перерахунку величини електричного опору ділянки, що досліджувалася, на зміну її профілю. За результатами отриманих залежностей було створено методику «Оперативної оцінки ступеня руйнування вогнетривких вуглецевмісних матеріалів, що використовуються для виробництва рідкої сталі». Розроблена методика передбачає вимірювання показників електричного опору ділянки вогнетривкої футерівки відповідно до нормованих методик з використанням стандартизованих вимірювальних приладів та розрахунок профілю її руйнування за допомогою аналітичних виразів. Характерною особливістю методики є можливість визначення реальної глибини руйнування футерівки без врахування товщини шлакового гарнісажу. Застосування методики може сприяти збільшенню строку експлуатації вогнетривкої футеровки на 3-5 %, що складає 0,3-0,5 грн/т рідкої сталі (у цінах на 01.12.21).

УДК 669.168.046.6 : 669.74.003.12

## **ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПО ПРЯМОМУ ПРИЗНАЧЕННЮ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА З ВІДХИЛЕННЯМИ ПО ХІМІЧНОМУ СКЛАДУ**

**В.П. Піптюк, к.т.н., Д.О. Степаненко, к.т.н., С.В. Греков, Н.Є. Ходотова**

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

Функціонування вітчизняної феросплавної промисловості в умовах військового стану та обмеження поставок якісної імпортованої сировини обумовлюють необхідність вирішення питань щодо виробництва марганцевих феросплавів відповідно до нормативних вимог та можливості використання по прямому призначенню певної кількості такої продукції з відхиленнями по хімічному складу. В свою чергу забезпечення конкурентоспроможності металопродукції, що виробляють підприємства України в теперішній час, поряд з вдосконаленням процесів виплавки та позапічної обробки сталі викликають додаткову увагу до відповідних параметрів матеріалів, які застосовуються, зокрема феросплавів. Тому оцінки якості і використання вітчизняних марганцевих феросплавів набувають актуального значення.

В якості об'єктів дослідження обрали найбільш масові по об'ємам виробництва на вітчизняних феросплавних заводах і використання на металургійних підприємствах марганцеві феросплави (феросілікомарганець марки МнС17 та феромарганець марки ФМн78).

З метою вдосконаленої теоретичної оцінки в дослідженнях використовували задалегідь створену, під керівництвом проф. Тогобицької Д.М., комп'ютерну базу даних «Феросплав», до якої увійшли промислові дані феросплавного виробництва, а також інформація про фізичні, теплофізичні та інші технологічні властивості різних марок феросплавів.

Дослідження проводили з застосуванням статистичного методу для групи МнС17 (загальна кількість плавок - більше декількох тис.) та групи ФМн78 (близько тис. плавок) по даним їх фактичного промислового виробництва і з подальшим узагальненням результатів.

Аналізували кожен марку досліджуваних феросплавів окремо за вмістом марганцю, вуглецю, кремнію, фосфору та сірки і оцінювали відхилення цих елементів від нормативного (по ДСТУ 3547 - 97 і ДСТУ 3548 - 97) їх вмісту. Дослідженнями виявили ненормований вміст марганцю, кремнію та фосфору (кожного з елементів окремо) у менш ніж 1% плавок, а

одночасно двох елементів (кремнію з марганцем, вуглецем чи фосфором) – у приблизно 0,1% плавок (для марки МнС17). Для марки ФМн78 ненормоване відхилення за вмістом кремнію та фосфору (кожного елемента окремо) встановлено у менш ніж 1% плавок. За вмістом сірки обидві марки феросплавів не мали відхилень від вимог відповідних стандартів.

Проведено також розрахункову оцінку можливості використання досліджуваних марок феросплавів з ненормованим вмістом перелічених елементів в умовах Дніпровського меткомбінату при виробництві сталі поточного марочного сортаменту. Встановлено, що при дотриманні прийнятих на підприємстві технологічних регламентів виробництва використання таких феросплавів, в переважній більшості випадків, можливо і не викликає труднощів. Виняток стосувався лише окремих плавок, де (з урахуванням хімічного складу сталі) знадобилось не передбачуване технологією використання додаткових матеріалів. Тому такі феросплави, як виключення, можуть бути застосовані при виплавці сталі масового призначення.

В той же час встановлено, що при формуванні на феросплавному заводі вагонних норм поставок відбувається змішування різних плавок окремо кожної з марок феросплавів, а при розвантаженні на підприємстві-споживачі не виключається іще додаткове усереднення по хімічному складу. Тому виявлення заздалегідь в таких умовах феросплаву з ненормованим вмістом елементів не можливим.

УДК 669.184

## **ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОДУВНИХ ПРИСТРОЇВ 250-Т КИСНЕВИХ КОНВЕРТЕРІВ В УМОВАХ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДГРІВУ МЕТАЛОБРУХТУ**

**А.А. Похвалітій, к.т.н., Є.М. Сігарьов, д.т.н., Г.О. Носенко**

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

У сучасних сировинних умовах і технології ведення плавки, що склалися, одним з основних напрямів удосконалення наконечників кисневих фурм для 250—т конвертерів слід вважати розробку 5-соплових наконечників фурм з конфігурацією та розташуванням сопел Лавалля, що відповідають вимогам попереднього підігріву брухту та оптимізації шлакоутворення по ходу продування за умови зниження окислення ванни.

При розробці конструкції 5-соплових наконечників ПАТ «ДМК» (теперішній ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ») за методикою [1] враховувалась необхідність попереднього підігріву брухту. При такому режимі витрата кисню складає 650—750 м<sup>3</sup>/хв. В основний період окиснювального рафінування витрата кисню становить 950—1000 (1100) м<sup>3</sup>/хв. Слід зазначити, що без використання парку фурм, призначених для різного роду процедур (нагрівання брухту, рафінування чавуну тощо) дослідникам доводиться йти на компромісні рішення, оскільки робота фурми в розрахунковому режимі (коефіцієнт нерозрахунковості  $n = 1$ ) при значних коливаннях витрати кисню неможлива.

На рисунку 1 представлені дані про зміну коефіцієнту нерозрахунковості в залежності від витрати кисню для 5—соплової фурми. Показано, що штатна фурма працює в розрахунковому режимі при витраті кисню вище 1100 м<sup>3</sup>/хв. З одного боку така конструкція дозволяє більш повно використовувати потенційну енергію кисневого струменю при окислювальному рафінуванні, а з іншого боку, при необхідності попереднього підігріву брухту, продувка відбувається з перерозширенням кисневого струменю ( $n = 0,60—0,65$ ), що може призводити до розгару сопла. Питання перерозширення і нині залишається дискусійним, оскільки існує думка, що робота сопла з коефіцієнтом нерозрахунковості менше 1 є припустимою [2].

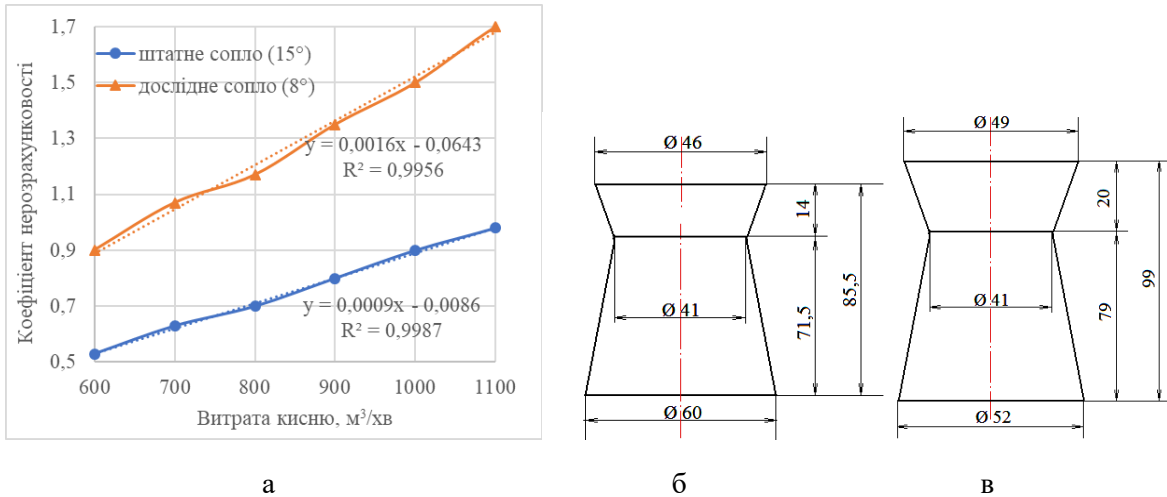


Рисунок 1 – Значення коефіцієнту нерозрахунковості (а) в робочому діапазоні витрат кисню для 5-соплового наконечника зі штатними (б) і дослідними (в) соплами

Запропонована конструкція наконечника фурми ефективно працює в режимі підігріву брухту при 650—750 м³/хв. і має  $n = 1-1,1$ . При витраті кисню 900-1000 м³/хв. коефіцієнт нерозрахунковості знаходиться в межах 1,3-1,5, що є цілком припустимою величиною [3]. Форма сопла штатного і дослідного 5-соплового наконечника представлена на рисунку 1б,в. Сопло дослідного наконечника має менший кут розкриття дифузору і дещо подовжено в порівнянні зі штатною конструкцією. На рисунку 2 представлено розрахункові параметри закритичної частини сопла 5-соплового наконечника для досліджуваного діапазону витрати кисню при куті розкриття 15° і 8°.

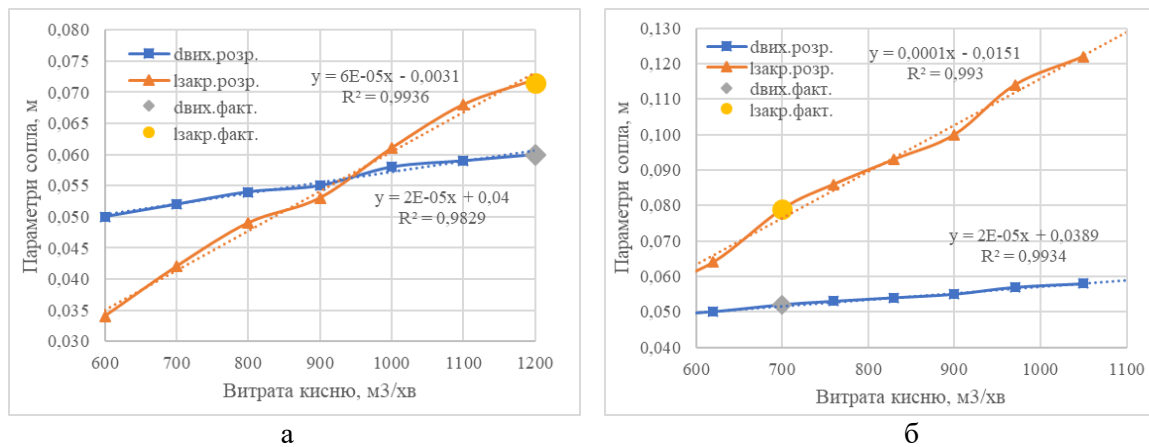


Рисунок 2 – Розрахункові значення закритичної частини сопла з кутом розкриття 15° (а) і 8° (б)

На рисунку 2 показано, що зменшення витрати кисню потребує скорочення довжини закритичної частини сопла, що цілком корелюється з літературними даними [4, 5]. Для штатного наконечника (рис. 2а) через надмірний кут розкриття сопла для режиму підігріву брухту  $l_{закр}$  має становити 40-45 мм, що може ускладнити існуючу технологія виготовлення 5-соплового наконечника. Менш радикальним було рішення зменшити кут розкриття сопла (рис. 1б), що дозволило дещо збільшити довжину сопла і підвищити жорсткість дуття.

Таким чином, фурми з дослідними наконечниками, при наявному в цеху тиску, надійно працюють в діапазоні витрат кисню 650-950 м³/хв і дозволяють збільшувати витрати кисню на початку продування до 1000-1100 м³/хв і більше, за необхідності.

#### Список літератури

1. Горбик А.С. К вопросу о проектировании дутьевых сопел кислородных фурм / А.С. Горбик, В.С. Бобошко, Л.М. Гревцев и др. // *Сталь*, № 12, 1971, С. 1077-1079.
2. Разработка и внедрение парка кислородных фурм и дифференцированной технологии ведения конвертерной плавки в кислородно-конвертерном цехе ОАО "МУ «Азовсталь» /

А.В. Сущенко И.Д. Буга, А.В. Воробьев [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*, 2005, №1, С. 47–50.

- Сущенко А.В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров / А.В. Сущенко // *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 2009, № 19, С. 36–41.
- К вопросу о проектировании дутьевых сопел кислородных фурм / А.С. Горбик, В.С. Бобошко, Л.М. Гревцев и др. // *Сталь*. – 1971. – № 12. – С. 1077–1079.
- Старов Р.В. Производство стали в конвертерах / Р.В. Старов, В.А. Нагорских. – К: Техника, 1987, 165 с.

УДК 669.184

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАСМІЧЕНОСТІ БРИКЕТІВ ЗІ СТАЛЕВОЇ СТРУЖКИ

А.А. Похвалітій, к.т.н., Є.М. Сігарьов, д.т.н., П.А. Якунін

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Металургійна цінність металобрухту, які використовують у якості складової металошихти сталеплавильних процесів, у першу чергу, визначається виходом рідкого металу. Останній, у свою чергу, залежить від ступеня засміченості (забрудненості) підготовленого до переплаву металобрухту різними типами включень та домішок.

Для визначення засміченості брикетів співробітниками Дніпровського державного технічного університету розроблена методика, якою передбачається переплав партії брикетів в індукційній печі в контрольованому захищеному інертним газом середовищі з наступним визначенням хімічного складу сталі і шлаку. У результаті проведення балансових плавок одержують інтегральний індекс засміченості, який враховує наявність у брикетах вологи, ЗОР, шкідливих і нешкідливих домішок.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів за методикою ДДТУ була проведена серія експериментів, яка полягала у відборі усереднених проб по різних партіях брикетів, розсві проб по фракціях і перепаві в печі Таммана наважок, скорочених до 200 г. Дані по фракційному складу представлені на рис. 1.

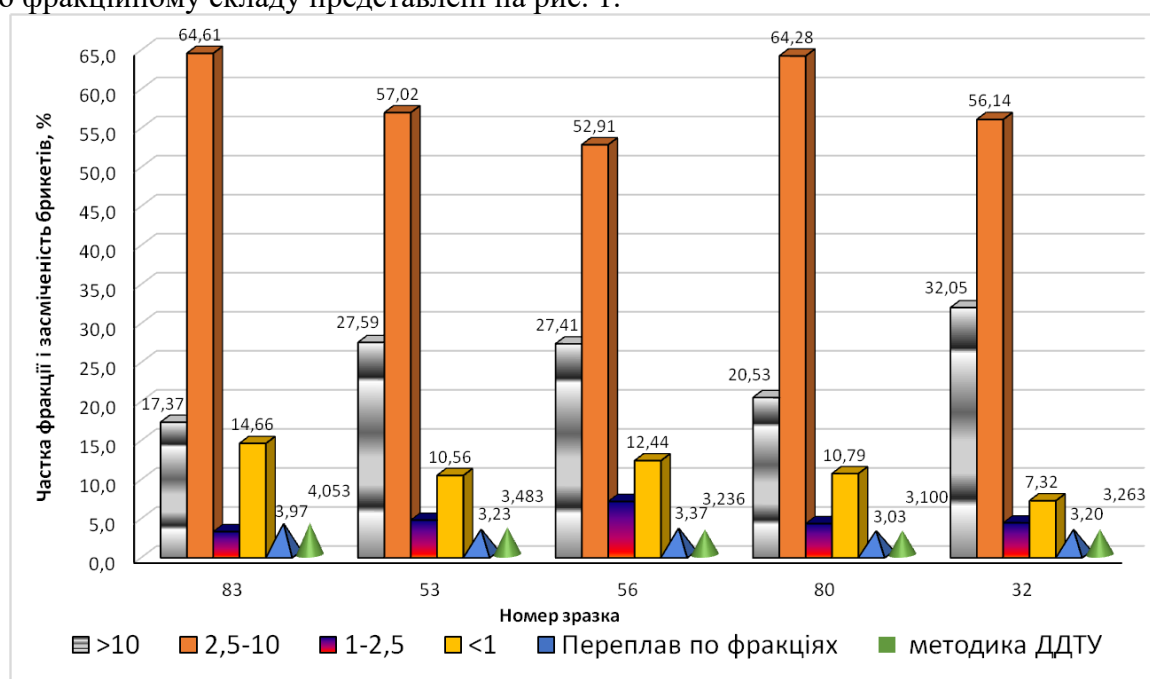


Рис. 1 - Співвідношення фракційного складу й засміченість у різних зразках брикетів

На рисунку 1 показано, що переважною є стружка фракції 2,5...10 мм (52,91...64,61%). При цьому частка фракції менш 1 мм знаходиться в межах 7,32...14,66 %. Показано, що показник засміченості за методикою ДДТУ досить добре корелюється з результатами переплаву по фракціях.

Результати визначення частки засміченості по фракціях представлені на рис.2.

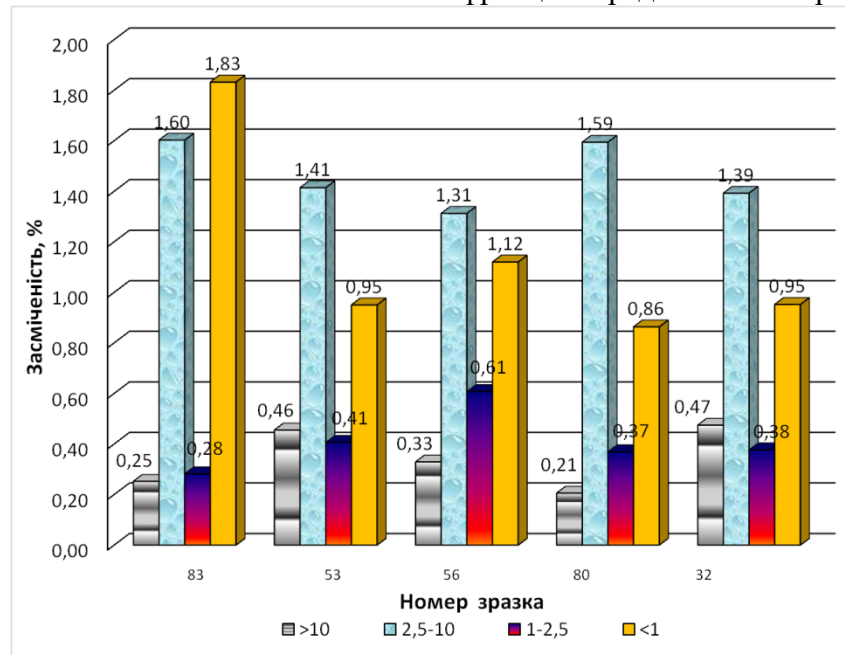


Рис. 2 – Частка засміченості брикетів по фракціям

На рисунку 2 показано, що основна частка засміченості припадає на фракції 2,5...10 мм і <1 мм та становить 72-86% від загальної кількості забруднювачів. Варто зазначити, що частка засміченості від фракції <1 мм наближається, а в деяких випадках перевищує відповідний показник для фракції 2,5...10 мм, кількість якої в 4...8 раз більше.

Таким чином, одним з визначальних факторів, що впливають на показник засміченості брикетів можна вважати наявність фракції <1 мм, яка, за результатами лабораторних досліджень, здебільшого складається з оксидів заліза. Однак неоднорідність брикетів не тільки в різних партіях, а і в межах однієї партії, вимагає проведення подальших досліджень з метою отримання різнопланової інформації стосовно джерел забрудненості брикетів і можливих шляхів її зменшення.

УДК669.09.26

## ПЕРЕХІД МЕТАЛУРГІЇ НА ВОДНЕВУ ТЕХНОЛОГІЮ

**В. П. Руських<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, Ю. В. Хавалиць<sup>1</sup>, Р. Ю. Кирсанов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (Маріуполь, Україна)

Значна кількість CO<sub>2</sub> надходить в атмосферу внаслідок виробництва чавуну та сталі. Розглянемо це на прикладі. 2021 року в Україні було виплавлено 21,165 млн. т чавуну. На виплавку тонни чавуну загалом витрачається 500 кг умовного палива, що містить 80% вуглецю, тобто. 400 кг вуглецю. На виплавку всього річного виробництва чавуну в Україні витрата вуглецю становитиме  $21,165 \times 0,4 = 8,466$  млн. т. Весь цей вуглець при виробництві чавуну та сталі надходить в атмосферу у вигляді CO<sub>2</sub>.

При окисленні вуглецю за реакцією  $C + O_2 = CO_2$  на тонну вуглецю, що окислюється, утворюється 3,67 т вуглекислого газу. За річного виробництва чавуну в Україні 21,165 млн. т в атмосферу викидається 31,07 млн. т  $CO_2$ .

Д.К. Чернов виконав глибокий аналіз процесу первинного одержання заліза та дійшов висновку про можливість виплавки сталі у самій доменній печі без використання для цього коксу. Проте розвиток безкоксолової металургії пішло іншим шляхом.

Однією з напрямів було виробництво губчастого заліза, тобто. відновлення у твердій фазі.

Іншим напрямком безкоксолової металургії є високотемпературні процеси одержання рідкого металу, що здійснюються в одну стадію

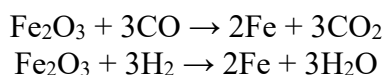
Таким чином, розвиток безкоксолової металургії пішов шляхом поділу твердофазного і рідкофазного відновлення в окремі процеси,

Під час розробки цих процесів основним стимулом було прагнення отримувати залізо (сталь) без застосування коксу.

У 2020 році Група Метінвест розпочала розробку довгострокової технологічної стратегії з урахуванням екологічних викликів. Компанія бачить технологічне майбутнє за електросталеплавильними процесами та використання водню. Планируется будівництво єдиного комплексу, що складається з технології прямого відновлення заліза (DRI) та електрометалургійного виробництва для переробки гарячого DRI.

Планується підготовка залізорудної сировини, кінцевим продуктом якої будуть окатиші DRI, металізація окатишів у шахтних печах з використанням гарячих відновлювальних газів, плавка металізованих окатишів в електросталеплавильних печах.

Теоретично необхідна кількість відновника при відновленні заліза оксидом вуглецю та воднем визначається з реакцій:



Звідси впливає, що відновлення тонни заліза потрібно 0,75 т оксиду вуглецю чи 0,05 т водню. При ступеня використання  $CO$  та  $H_2$  у відновлювальному агрегаті на рівні 45%, маса відновників відповідно збільшується до 1,67 та 0,11 т/т заліза. Маса водню більш ніж у 15 разів менша за масу оксиду вуглецю. Отже, економічно доцільно як відновник використовувати водень, якщо його ціна буде не більш ніж у 15 разів вище за ціну оксиду вуглецю.

З метою зменшення вуглецевого сліду в атмосфері перехід чорної металургії на водневу технологію є обов'язковим.

Найбільш раціональною водневою технологією є підготовка залізорудної сировини з отриманням окатишів DRI, їх металізація в шахтних печах, виплавка сталі в електрпечах.

## **ШЛЯХИ ВІДНОВЛЕННЯ ПОВНОЦІННОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА УКРАЇНИ У ВОЄННИЙ ТА ПОВОЄННИЙ ЧАС**

**Ю.С. Семенов, к.т.н.**

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

На сьогоднішній день доменні печі є основним виробником чавуну в Україні і в світі, оскільки доменне виробництво є найбільш ефективним та економічно вигідним способом виробництва чавуну.

При підготовці залізорудної сировини для виробництва чавуну слід в найближчому майбутньому скоротити експортну складову концентрату, необхідного для виробництва окатишів на ГЗК Полтавської та Дніпропетровської областей. При виробництві агломерату на підприємствах «Камет-сталь», «Запоріжсталь» та «АрселорМіттал Кривий Ріг» необхідно розвивати заходи щодо екологізації виробництва – модернізація з оснащенням обладнання сухого газоочищення та підвищення якості готового агломерату, в першу чергу, це стосується



підприємства «Камет-сталь» (м. Кам'янське) з огляду на технічний стан діючої аглофабрики. З урахуванням наявних теоретичних та дослідно-промислових напрацювань при виплавці чавуну доцільно використовувати 30% окатишів і 70% агломерату. Перспективним напрямком є також розвиток технологій безвипального окускування вторинної сировини – холодного брикетування і гранулювання дрібнофракційних залізовмісних відходів при інтенсивному їх утворенні системами газоочищення.

До коксозамінних енергоносіїв при виробництві чавуну у доменних печах належать пиловугільне паливо та природний газ. Вартість природного газу, який постачався реверсним засобом з Європи до українських підприємств, суттєво змінювалася в залежності від пори року, так, наприклад, у 2021–2022 рр. природний газ при виробництві чавуну використовувався лише у червні та липні. При цьому, при спільному застосуванні в доменному виробництві пиловугільного палива та природного газу необхідно покращувати ефективність заміни вартісного коксу цими паливними добавками. Такі заходи були реалізовані спеціалістами Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова на підприємстві «Камет-сталь» у 2021 р., вони полягали у виготовленні та впровадженні принципово нової для України конструкції підведення паливних добавок до дуття, яка містить підведення пиловугільного палива та природного газу на відокремлені списи фурменого пристрою [1].

Пиловугільне паливо, як основний замітник коксу, у період до 24.02.2022 вироблялося здебільшого з вугілля піснувато-спікливої марки російського походження. З 24.02.2022 під час воєнного стану і повної відмови від російських енергоносіїв актуальною проблемою для металургійних підприємств України, зокрема для діючих в даний час: "Камет-сталь", "Запоріжсталь" та "АрселорМіттал Кривий Ріг" (при тимчасовій втраті комбінатів "Азовсталь" та "ММКІ", м. Маріуполь у 2022 р. та тимчасовій втраті контролю над комбінатами "АМК" (м. Алчевськ), "ЄМЗ" (м. Єнакієве) та «ДМЗ» (м. Донецьк) у 2017 р.) став пошук альтернативних видів палива в доменному виробництві. В особливо кризові періоди роботи металургійних комбінатів, таких як на початку повномасштабної російської агресії, у доменному виробництві застосовувалася технологія без вдування паливних добавок у горн доменних печей із застосуванням зволоженого дуття.

Тому актуальність виконання досліджень у цьому аспекті обумовлена як роботою підприємств України в умовах, що склалися у воєнний час, так і з точки зору повоєнного відновлення металургійної галузі. Такі дослідження мають передбачувати, насамперед, пошук альтернативних марок вугілля та (або) їх суміші для виробництва пиловугільного палива, зокрема – вітчизняного довгополуменевого газового вугілля та піснувато-спікливого вугілля північноамериканського та австралійського походження. Так, у червні 2022 р. на комбінаті «Камет-сталь» пройшла успішна дослідна плавка із застосуванням пиловугільного палива з суміші довгополуменевого газового вугілля та коксового меленого дріб'язку при спільному з пиловугільним паливом застосуванні природного газу. А з вересня 2022 р. здійснюється дослідне вдування піснувато-спікливого вугілля австралійського походження на комбінатах «Камет-сталь» та «Запоріжсталь».

Крім вищезгаданого, дослідження у воєнний та повоєнний час мають передбачати: вдосконалення способів підведення природного газу при сезонному його використанні до фурменого приладу та при сумісному застосуванні природного газу та пиловугільного палива; вдосконалення режимів завантаження доменних печей та дуттєвого режиму при роботі на коксі погіршеної якості [2] (суттєве зниження якості коксу спостерігається на підприємствах України з 24.02.2022 р. – зниження на 10–12% показника гарячої міцності); для умов «Камет-сталь» – вдосконалення методів та систем підтримки прийняття рішень щодо управління розподілом дуття по окружності доменних печей шляхом створення спрямованої окружної нерівномірності витрат паливних добавок з метою забезпечення рівномірного теплового стану фурменої зони [3, 4]; дослідження сумісного вдування в горн доменних печей колошникового пилу та пиловугільного палива з метою підвищення газопроникності шихти за рахунок зменшення кількості залізовмісних матеріалів у сухій зоні доменної печі та інтенсифікації створення в горні печі окислених шлаків для промивання горна та фурменої зони [5, 6]; розвиток напрямків, пов'язаних з вдуванням в доменні печі коксового газу, з урахуванням наявних теоретичних та дослідно-промислових напрацювань Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова [7, 8].

## Література

1. Патент України на винахід. Пристрій для введення паливних добавок у доменну піч / Семенов Ю.С., Семіон І.Ю., Горупаха В.В., Ващенко С.В., Худяков О.Ю., Шумельчик Є.І., Кузьмичов В.М. – заявл. № а202203463 від 19.09.2022.
2. Семенов Ю.С., Шумельчик Є.І., Горупаха В.В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. – Дніпро: Домінанта Прінт, – 2018. – 260 с. ISBN: 978-617-7371-45-7.
3. Semenov Y.S., Shumelchyk Y.I., Horupakha V.V. et al. Development and Implementation of Decision Support Systems for Blast Smelting Control in the Condition of PrJSC "Kamet-steel" // MDPI, Metals, Special Issue "Mathematical Modelling of the Ironmaking Blast Furnace". – 2022. – 12(6). – 985. <https://doi.org/10.3390/met12060985>.
4. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik E.I., Alter M.A. Blast Furnace Operation Improvement by Forming Uniform Circular Distribution of Raceway's Thermal Mode // AISTech 2021 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 29 June–1 July 2021, Nashville, Tenn., USA. – P. 184–192. <https://doi.org/10.33313/382/018>.
5. Gudenau G.V., Vippermann Sh., Moskvochuk V.P., Research on injection of fine iron ore into a blast furnace // Stal', 1996, no. 2, pp. 9–11.
6. Moskalina A.A., Chaika A.L., Kornilov B.V. et al. Improvement of Blast Furnace Energy Efficiency by Injection of Preheated Pulverized Coal Fuel with Iron Oxides // Steel Transl. 51, 468–474 (2021). <https://doi.org/10.3103/S0967091221070056>.
7. Товаровский И.Г. Коксозамещающие энергосберегающие технологии доменной плавки // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України, 2007. – Вип. 14. – С. 19–30.
8. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Лялюк В.П. Альтернативные коксоберегающие технологии – перспектива развития доменного производства // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 2. – С. 10–13.

УДК 669.184

## АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМЕНІВ, ЩО ВИТІКАЮТЬ ІЗ СОПЕЛ РІЗНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

С.І. Семикін, к.т.н., Т.С. Голуб, к.т.н., Л. С. Молчанов, к.т.н.

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

Киснево-конверторний спосіб виробництва рідкого напівпродукту є досить складним й багато етапним, та характеризується екстремально високими температурами, що ускладнюють його пряме дослідження. З погляду на це доступним й досить розповсюдженим залишається метод проведення натурного фізичне моделювання окремих операцій процесу.

Основним засобом, що здійснює та дозволяє керувати процесом кисневого конвертування є верхня продувка. Вона здійснюється за допомогою продувної фурми, що оснащено соплами. Залежно від підприємства, кількість та тип сопел можуть варіюватися, а їх параметри залежать від ємності конвертера та технології виробництва сталі. При цьому, у досить складних шихтових умовах роботи українських підприємств актуальним залишається завдання вдосконалення конструкцій сопел, що дозволяють інтенсифікувати процеси у ванні. З цієї причини, за умов збереження витрати кисню на сталому рівні, необхідно використовувати такі конструкції сопел, що дозволять досягти умов збільшення імпульсу струменя, який діє на металеву ванну. У зв'язку з цим було проведено аналіз можливості використання для зазначених умов сопел когерентного типу (включає коаксіально розташовані центральний та периферійний канали). З класичної фізики відомо, що імпульс залежить від ваги та швидкості:

$$l = m\omega, \text{ кг}\cdot\text{м/с} \quad (1)$$

де  $m$  – маса струменя, кг;  $\omega$  – швидкість струменя, м/с.

При забезпеченні еквівалентних умов продування (швидкість 2 М на виході з сопла) маса струменя є змінною у рівнянні (1). В зазначених умовах, вона залежить від діаметра сопла, положення фурми й приєднання додаткової маси навколишнього газу до струменя (залежить від конструкції сопел).

За результатами проведених лабораторних досліджень зі зважування струменів, що витікають із сопел (циліндричних діаметром від 1 мм до 3,2 мм; сопел когерентного типу із різним діаметром центрального сопла 1,6 – 2,8 мм) було розроблено аналітичний вираз залежності ваги струменя від технологічних параметрів продувки: положення фурми, тиску подачі газу та геометричних параметрів сопла. Також важливою компонентою аналітичного виразу стали встановлені емпірично коефіцієнти втрати імпульсу струменя, що залежать від геометричних параметрів сопла. Розроблений аналітичний вираз має наступний вигляд:

$$G = 0,0034 \cdot P \cdot h_{\phi} \cdot (K_{\text{центр}} \cdot d_{\text{центр}}^{K_{\text{вит\_центр}}} + K_{\text{кільце}} (d_{\text{зовн}}^{K_{\text{вит\_кільце}}} - d_{\text{внутр}}^{K_{\text{вит\_кільце}}}), R^2 = 0,9 \quad (2)$$

де  $P$  – тиск продувального газу перед соплом, кПа;  $h_{\phi}$  – положення фурми відносно ванни у спокійному стані;  $K_{\text{центр}}$  - коефіцієнт втрат імпульсу при продуванні через центральну частину сопла;  $K_{\text{кільце}}$  - коефіцієнт втрат імпульсу при продуванні через зовнішню кільцеву частину сопла;  $K_{\text{вит\_центр}}$  та  $K_{\text{вит\_кільце}}$  відповідно коефіцієнти витікання через центральну та кільцеву частини;  $d_{\text{центр}}$ ,  $d_{\text{зовн}}$ ,  $d_{\text{внутр}}$  - відповідно діаметри центральної частини та зовнішній й внутрішній діаметри кільцевої частини сопла когерентного типу. Вирази для розрахунку коефіцієнтів втрати імпульсу струменя в різних частинах сопла:

$$K_{\text{центр}} = 0,8103 \cdot d_{\text{центр}}^{0,1092} \quad (3)$$

$$K_{\text{кільце}} = 0,75 \cdot (d_{\text{зовн}} - d_{\text{внутр}})^{0,1092} \quad (4)$$

$$K_{\text{вит\_центр}} = 0,5439 \cdot d_{\text{центр}}^{0,18} \quad (5)$$

$$K_{\text{вит\_кільце}} = K_{\text{вит\_центр}} \frac{K_{\text{кільце}}}{K_{\text{центр}}} \quad (6)$$

УДК 669.02/09 : 669.18.046.58

## ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО СКЛАДУ РАФІНУВАЛЬНОГО ШЛАКУ ДЛЯ ОБРОБКИ СТАЛІ НА УКП

Д.О. Степаненко к.т.н.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Процеси рафінування та доведення сталі на установці «ківш-піч» (УКП) характеризуються високою інтенсивністю, що вимагає високої швидкості шлакоутворення та дифузійних процесів в системі «метал-шлак-газ», оскільки при серійному литті тривалість позапічної обробки обмежена часом подачі плавок на машину безперервного лиття злитків (МБЛЗ).

У відповідності до існуючих на вітчизняних металургійних підприємствах нормативних вимог, склад твердих шлакових сумішей (ТШС) зазвичай представлено сумішню вапна і плавикового шпату у співвідношенні 3:1 або 4:1. Проте, як слідує з результатів робіт [1, 2], використання плавикового шпату в суміші з вапном при зазначеному їх співвідношенні для рафінування металу на УКП, науково не обґрунтоване.

З метою зменшення використання  $\text{CaF}_2$  в складі ТШС виконано аналіз в'язкості, електропровідності та відповідних значень енергій активації для системи: 14÷41%  $\text{CaO}$  –

42÷48% SiO<sub>2</sub> – 9÷11% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,01÷12,5% Na<sub>2</sub>O – 6÷24% CaF<sub>2</sub> за даними [3]. З аналізу даних слідує, що CaF<sub>2</sub>, порівняно з Na<sub>2</sub>O, більш суттєво впливає на в'язкість розплавів даної системи ніж на їх електропровідність, що може свідчити про деполімеризацію аніонів Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub><sup>Z-</sup>, за схемою

$$(-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-) + 2\text{F}^- = 2(-\text{Si}-\text{F}) + \text{O}^{2-}.$$

На відміну від CaF<sub>2</sub> оксид натрію суттєво впливає на електропровідність ніж на в'язкість, що може свідчити про утворення у розплаві додаткової кількості рухливих катіонів Na<sup>+</sup>, які можуть брати участь у процесі десульфурзації металу з утворенням сполуки Na<sub>2</sub>S.

За результатами розрахунку енергій активації в'язкості ( $E_\eta$ ) та електропровідності ( $E_\chi$ ) для зазначеної вище оксидної системи встановлено, оптимальний її склад (мас. %) CaO≈30%; SiO<sub>2</sub>≈42%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≈9%; Na<sub>2</sub>O≈11% CaF<sub>2</sub>≈6%, який забезпечує гомогенний стан розплаву при температурі 1450°C, в'язкість 0,38 Па·с та електропровідність 0,4 Ω<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

Отримані результати можуть бути використані у якості рекомендацій по заміні та зменшенню використання імпортованого плавикового шпату в складі ТШС для сталеплавильного виробництва.

### Посилання

1. Чуйко Н.М. Новая технология выплавки шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 под белым шлаком / Н.М. Чуйко, В.Б. Рутковский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия - 1960. - № 6. - С. 14-16.
2. Phase Diagram Study of the CaO–CaF<sub>2</sub> System /Dong-Geun KIM, Corrie van HOEK, Christian LIEBSKE, Sieger van der LAAN, Pierre HUDON and In-Ho JUNG // ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 11, pp. 1945–1950.
3. Като, Минова. Физические свойства шлаков при высоких температурах. Ч.2. Влияние добавок окиси натрия и кремний фторида натрия на вязкость и электропроводность шлака CaO (41)– SiO<sub>2</sub> (48)– Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11) // Нагоя когегидзю цусикэ нсехоккоку. – 1972. – т.21. – №11. – С.314– 321.

УДК 669.162.275.2:669.162.212

## ОЦІНКА КОРОЗІЙНОЇ АКТИВНОСТІ ЛУГОВМІСНИХ ДОМЕННИХ ШЛАКІВ ПО ВІДНОШЕННЮ ДО ВОГНЕТРИВІВ

Н.О. Цюпа к.т.н., Д.М. Тогобицька д.т.н., проф.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Проведені дослідження показали, що взаємодія первинних та кінцевих домених шлаків, що містять значну кількість лужних оксидів, з вогнетривом при високих температурах приводить до руйнування їх через утворення легкоплавких з'єднань та розчинення вогнетривів. Обумовлена хімічним складом і властивостями шлакових розплавів корозійна активність шлаків по відношенню до вогнетривів може бути оцінена за допомогою критерію корозійної стійкості вогнетривів до шлакових розплавів, в якості якого обрано константу швидкості просочення вогнетриву шлаком (1), що дозволяє здійснити вибір вогнетривкового матеріалу для різних зон печі в залежності від температурних умов її роботи і шлакового режиму, а також здійснити оцінку впливу хімічного складу шлаку, зокрема оксидів лужних металів, на стійкість вогнетривів.

$$\lg K(\times 10^7, \text{см}^2 / \text{с}) = -5.126 + 2.234 \cdot \Delta d + 4.059 \cdot \Delta Z^Y + 73.443 \cdot \Delta t g \alpha + 0.0356 \cdot \Pi + 0.0042 \cdot T \quad (1)$$

де,  $\Delta Z^Y$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta t g \alpha$  - різниці параметри вогнетриву і шлаку;  $\Pi$  - пористість вогнетриву, %;  $T$  - температура експлуатації вогнетриву, °C.

Аналіз отриманих даних показав, що кожний 1% оксидів лужних металів у шлаку збільшує константу швидкості просочення вогнетриву шлаком в середньому на 7%, при цьому збільшення температури шлаку на 10°C призводить до росту константи просочення вогнетриву на 12%. Вплив лужних сполук на величину шлакороз'їдання вогнетривів буде найбільш високим у первинних шлаках, де вміст оксидів лужних металів може бути більше 10%, що призведе до збільшення константи швидкості просочення вогнетриву на 70%, тобто майже вдвічі. З ростом температури та зміною хімічного складу шлаку вміст оксидів калію та натрію зменшується, а отже і їх вплив на знос футерівки стає незначним. Основним чинником, що впливає на константу просочення вогнетриву в зоні горну є температура. Тому, виведення лужних сполук з доменної печі з кінцевим шлаком, а отже збільшення їх вмісту в ньому, не приведе до суттєвого збільшення зносу вогнетривів в зоні горну.

УДК 669.162.27.012.34 : 51.001.57.001.86

## **ДОСВІД РОЗРОБКИ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРІАЛЬНОГО ТА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ В УМОВАХ ПРАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

**О.Л. Чайка, к.т.н., Б.В. Корнілов, к.т.н., А.О. Москалина, к.т.н., В.В. Лебідь, к.т.н., М.Г. Джигота**

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

Застосування балансових моделей у доменному виробництві дозволяє визначити резерви підвищення енергоефективності доменної плавки та оцінити вплив зміни технологічних параметрів роботи печі на її техніко-економічні показники. Контроль матеріальних і теплових потоків при виплавці чавуну є важливим завданням з погляду раціональності обраного режиму та його економічності, оскільки фізико-механічні процеси доменної плавки, хімічні перетворення шихти та взаємодія з навколишнім середовищем, зрештою, відображаються матеріальними та тепловими балансами.

На основі зібраних даних роботи доменних печей ПрАТ «МК «Азовсталь» розроблено програмне забезпечення, які базуються на розроблених в ІЧМ НАНУ математичних моделях матеріального та теплового балансів доменної плавки. Розрахунок матеріального балансу ведеться за «системою обліку» В.П. Іжевського, що отримала позитивну оцінку вчених-доменщиків, наприклад, Н.А. Костильова, М.А. Павлова та ін. Для розрахунку теплового балансу використовується теплоенергетична модель І.Д. Семікіна, яка для використання в доменному виробництві була розвинута А.В. Бородуліним. Основна відмінність балансової теплоенергетичної моделі І.Д. Семікіна від інших моделей полягає в обліку теплових втрат ДП та розрахунку ступеня прямого та непрямого відновлення. Програмне забезпечення дозволяє розрахувати баланси в автоматичному режимі (збір даних з системи АСУ ТП та розрахунок матеріального, теплового балансів за обраний період) і в ручному (розрахунок прогнозних періодів для визначення резервів підвищення енергоефективності доменної плавки).

Для адаптації моделей, встановлених в АСУ ТП доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь», виконано помісячні розрахунки матеріального та теплового балансів доменних печей.

Визначено нев'язки загальних матеріальних балансів печей (різниця між сумарним приходом матеріалів у піч та продуктами плавки) та по компонентам (залізо, вуглець та ін.). Загальна нев'язка матеріальних балансів визначалася в 2-х варіантах: з використанням даних виходу колошникового пилу та шламу по технічним звітам (фактичний вихід) та розрахунку – за балансом заліза. Встановлено, що при використанні розрахункової величини виходу колошникового пилу на всіх доменних печах ПрАТ «МК «Азовсталь» величина нев'язки між приходом та витратою матеріалів лежить у довірливому діапазоні похибки (<1,5%). Найбільша та найменша величина нев'язки по балансу заліза склала -6% та +2% відповідно. По балансу вуглецю величина нев'язки в окремий період склала від -9,0% до +2,5%, що може бути

пов'язано, в тому числі, з неточністю обліку виносу колошникового пилю, хімічного складу палива, визначення хімічного складу колошникового газу і, як наслідок, урахування ступеня використання CO. Ступінь використання CO є одним із найважливіших вхідних параметрів моделей матеріального та теплового балансів і недостатня адекватність її вимірювань несе ризику отримання недостатньо достовірних результатів розрахунків. Слід зазначити, що для розрахунків використовувалися лабораторні значення вимірів ступеня використання CO, так як спостерігалися суттєві відмінності (до 1,5%) лабораторних та автоматизованих вимірів хімічного складу колошникового газу, що можуть бути пов'язані з особливостями встановлення газоаналізаторів та іншими технічними причинами.

З використанням результатів розрахунку теплових балансів виконано співставлення нев'язок доменних печей (співвідношення розрахункових показників до фактичних). За результатами розрахунків визначено середні втрати дуття для кожної печі (6%, 9% та 11% відповідно), які використано для адаптації моделі теплового балансу на доменних печах. Встановлено межі зміни нев'язки розрахункової величини продуктивності порівняно до фактичної величини (у межах 0,90-1,05 від фактичної величини), витрати коксу (0,95-1,06) та інших показників.

Математичні моделі балансів були здані в дослідну експлуатацію в складі АСУ ТП доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь» та використовувалась для оцінки відхилень від норм виробництва, витрати коксу та умовного палива, а також прогнозу можливості поліпшення техніко-економічних показників плавки.

УДК 669.162

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ, ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ТА ПОДАЧІ РІДКОГО ЧАВУНУ ДЛЯ КОНВЕРТЕРНОГО ПЕРЕДІЛУ**

**А.П. Шевченко, д.т.н., І.О. Маначин к.т.н., Б.В. Двоскін, к.т.н.,  
В.Г. Кисляков, к.т.н., В.П. Петруша**

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

Сучасний етап виробництва металопродукції у чорній металургії, що вимагає підвищення продуктивності, ефективності та зниження витрат на кожному з металургійних переділів, особливо при виробництві високоякісних марок сталі, визначає необхідність серйозного підходу до вдосконалення процесів та складових технологічної схеми підготовки та подачі рідкого чавуну для конвертерного переділу. Процес підготовки та подачі рідкого чавуну для конвертерного переділу можна розділити на такі технологічні зони:

- наповнення ковшів чавуном у доменному цеху та їх транспортування до наступної технологічної зони;
- позапічна десульфурація чавуну;
- очищення чавуну від ковшового шлаку;
- зберігання чавуну в конвертерному цеху, підготовка та заливання знесірченого чавуну в конвертер.

З метою виключення негативного впливу ковшових шлаків на ефективність та стабільність процесу десульфурації чавуну рекомендується перед початком наповнення ковшів чавуном подавати на дно ковша добавки у вигляді відходів виробництва металургійного вапна, що підвищують основність та сульфідну ємність ковшового шлаку . у кількості 80 – 170 кг/т шлаку (1,5 – 2,5 кг/т чавуну).

Для скорочення втрат температури чавуну при наповненні ковшів рекомендується під налив не подавати холодні ковші, скорочувати до мінімуму час оборотності ковшів використовувати кришки, що встановлюються на горловину ковшів після зливу чавуну, а також застосовувати підігрів чавуну та ковшів доменним газом. Найбільш переважною (з точки зору

втрат температури чавуну, скорочення циклу та організації подачі чавуну з необхідним вмістом сірки на кожну конвертерну плавку) схемою організації подачі чавуну з доменного в конвертерний цех є технологічна схема, при якій чавун вже в доменному цеху наливають у залівні ковши.

За проведеним аналізом найбільш ефективною технологією десульфурації чавуну є моноінжекція магнію, яка забезпечує з високою стабільністю отримання чавуну з необхідним вмістом сірки, аж до  $\leq 0,001\%$ .

Промисловий досвід реалізації процесу десульфурації чавуну моноінжекцією магнію в ківшах різного типорозміру показав, що зі збільшенням маси чавуну, що обробляється, зростає ефективність десульфурації, знижуються необхідні питомі витрати магнію і втрати температури чавуну в період вдування магнію. Встановлені закономірності обґрунтовуються збільшенням глибини вдування магнію та створенням більш сприятливих умов його розчинення і засвоєння.

Для підвищення ефективності очищення чавуну від високосірчастого ковшового шлаку, зниження втрат чавуну при скачуванні шлаку і скорочення тривалості операції очищення чавуну рекомендується продувати чавун азотом в процесі скачування шлаку або використовувати баблери, що забезпечують переміщення масиву шлаку в зону видалення загущаючими та ущільнюючими добавками та застосовувати для скачування шлаку високопродуктивні машини скребкового типу.

УДК 621.7

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ БЕЗШОВНИХ ТРУБ У КОКІЛЬ ГРАВІТАЦІЙНИМ МЕТОДОМ**

**В.П. Школярєнко, к.т.н., А.С. Нурадинов, д.т.н., К.А. Сіренко**

**Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ**

Метод гравітаційного лиття у кокіль для виготовлення безшовних труб у ливарному виробництві не знайшов масового застосування через проблеми утворення дефектів, у тому числі і гарячих тріщин, що потребує подальших наукових досліджень. У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України розроблено ДСТУ 9051:2020 [1], згідно визначень якого гарячі тріщини є одним з дефектів у розділі несущільностей у тілі виливка. Схильність до утворення гарячих тріщин називається гарячеламкістю. Відомо, що гарячеламкість сплавів залежить від піддатливої чи не піддатливої форми, температур прогріву форми та розплаву перед заливанням та від його хімічного складу. В даній роботі шляхом оптимізації вищенаведених технологічних процесів лиття на прикладі сплаву АМг6М було запропоновано такі шляхи вирішення проблеми гарячеламкості:

1. Виявлено, що для повного проливання форми, заливання сплаву АМг6М у кокіль необхідно проводити при температурі розплаву  $\sim 740^{\circ}\text{C}$ ;
2. Встановлено, що для уникнення тріщин, внутрішню форму необхідно прогрівати до температури не вище  $500^{\circ}\text{C}$ ;
3. Виявлено, що недоливи виникають при недостатній температурі розплаву і кокілю перед заливанням або при малій швидкості заливки;
4. Встановлено, що тріщини виникають через високий перегрів розплаву та тривале охолодження виливка в кокілі;
5. Виявлено, що вібраційна обробка під час заливки призводить до покращення проливання форми, ущільнення структури металу, але ускладнює роз'єднувальну здатність при роз'єднанні виливка від форми;
6. Визначено, що усадочні дефекти (раковини, стягання, пори) виникають через порушення спрямованого твердіння і недостатнього живлення виливка, через перегрів кокілю.

Література

1. ДСТУ 9051:2020 «Виливки із чавуну та сталі. Дефекти. Терміни та визначення понять». 15с. URL: <http://ptima.kiev.ua/images/stories/Standart/IRONSTEEL/dstu19200-80.pdf>.  
УДК 669.184

## **ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СТІЙКІСТЬ ОСНОВНИХ СКЛЕПІНЬ ПЕЧЕЙ ВІДДЗЕРКАЛЬНОГО ТИПУ: МАРТЕНІВСЬКА ПІЧ ТА ДВОВАННИЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИЙ АГРЕГАТ**

**Юшкевич П.О. к.т.н., Л. С. Молчанов к.т.н., Т. С. Голуб к.т.н.**

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

Футерування робочого простору печей віддзеркального типу (мартенівська піч та двованний сталеплавильний агрегат), особливо склепінь, працює в дуже важких умовах. Механічні удари та стирання, хімічна взаємодія плавильного пилю та шлаків, високі температури стали причинами використання для вогнетривкої кладки високоякісних матеріалів. Стійкість печей віддзеркального типу садкою від 100 до 300 т може становити від 400 до 1000 плавок, понад 300 т від 200 до 500 плавок. На печах з інтенсивним продуванням ванни киснем стійкість склепіння становить від 150 до 300 плавок. З літературних даних відомо, що стійкість склепіння змінюється від заводу до заводу і залежить не тільки від конструкції печі (переважно впливає висота склепіння), умов експлуатації та обслуговування, а й від професійного рівня та якості будівельної структури склепіння. Занадто щільне і нерівномірне укладання цегли може викликати концентрацію напруг та стиснення в секції арки склепіння. Відхилення від оптимальних режимів роботи печі та якості будівельної структури призводить до скорочення стійкості склепіння, що негативно впливає на виробничі показники, якість залізобетонного напівпродукту, підвищене споживання вогнетривів та погіршення техніко-економічних показників виробництва у цілому.

У ряді наукових робіт зазначається, що найбільшого поширення на печах віддзеркального типу отримали основні склепіння з магнезитохроміту або хромомагнезиту, тому одним з головних факторів, що впливає на стійкість основних склепіння є температурний режим ведення плавки. Основна цегла характеризується не тільки досить високою вогнетривкістю але і значною чутливістю до коливань темперами (температурних перепадів), так за температурних умов в межі від 300 до 400 °С, вогнетриви склепіння печі починають постійно відчувати змінну напруги. Ступінь прояву впливу буде залежати від температури склепіння і тривалості плавки. Окрім цього основні вогнетриви мають достатньо високий коефіцієнт розширення цегли, у результаті при розігріві арки склепіння, зовнішні шви розкриваються, а у внутрішньому боці виникають високі напруги стиску, що призводять до сколу внутрішньої частини цегли.

Загалом можливо відзначити, що в умовах експлуатації склепіння з основних вогнетривів (магнезитохромітові або хромомагнезитові) може спостерігатися наступне:

1. Цеглини погано зварюються одна з одною, через це не утворюють моноліт;
2. Підвищена теплопровідність і великі нещільності кладки (розкриті шви) зумовлюють вищі (майже удвічі) втрати тепла з 1 м<sup>2</sup> площі склепіння;
3. Об'ємна маса магнезитохромітової цеглини в 1,5 рази більша, ніж аналогічної динасової.

Треба відзначити, що наведені фактори та чинники можуть надавати як самостійний так і спільний комплексний вплив, за якого вони взаємно посилюють один одного у різних поєднаннях, що і призводить до зміни характеру зношування та варіації показників стійкості вогнетривкого футерування склепіння у широких межах на кожному металургійному підприємстві.



## Електрометалургія

УДК620.046 : 669.15 : 620.17

### ВПЛИВ ЗМІНИ ШОРСТКОСТІ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 316L, ВИГОТОВЛЕНОЇ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ

Ph.ДАджамський С.В., д.т.н. Кононенко Г.А., Подольський Р.В.

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**  
**ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

Селективне лазерне плавлення (СЛП) - один із сучасних методів виготовлення деталей і вузлів складної геометрії, які складно або неможливо відтворити в умовах традиційного виробництва. Технологія СЛП дозволяє в кілька разів скоротити час і кількість технологічних операцій, а число необхідного основного обладнання, чисельність якого вимірюється в десятках - зменшити до декількох одиниць. Одними з відповідальних завдань СЛП-технології є забезпечення точності геометрії виробів та певної шорсткості поверхні, оскільки зазвичай не передбачається подальша їх механічна обробка.

Виготовлення зразків для випробувань на розтягування проводилося на 3D принтері Alfa-280 виробництва компанії ТОВ «АЛТ України». Матеріалом, використаним в цьому дослідженні, була нержавіюча сталь аустенітного класу 316L з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку 316L в % по масі: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016. Металографічні дослідження показали, що середня щільність зразків складає 99,83%, мікроструктура являє собою дисперсні дендритні і комірчасті структури  $\gamma$ -фази в межах ванн розплаву одиничних треків, в результаті перекриття яких пошарово створюється деталь.

В робочій частині зразків для випробувань на розтяг контролювано створювався дефект шляхом збільшення робочої потужності лазера при побудові кількох шарів, чим досягали підвищення шорсткості бічної поверхні. Одна група зразків підлягала електрохімічному поліруванню. Після проведення випробувань на розтягування в результаті дослідження встановлено, що у групи зразків без додаткового оброблення руйнування починалось з поверхні зразків у місці зміни її шорсткості. Місця руйнування зразків, які зазнавали електрохімічного полірування, були різними та непов'язаними з місцями створеного дефекту. Значення показників міцності двох груп зразків відрізнялися на 3-5 %, пластичності – на ~ 10%.

В результаті досліджень встановлено вплив зміни шорсткості поверхні на механічні властивості сталі 316L, виготовленої за СЛП-технологією.

УДК669.046 : 621.375

### ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ СЛП-ТЕХНОЛОГІЇ

Ph.ДАджамський С.В., д.т.н. Кононенко Г.А., Подольський Р.В.

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**  
**ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

Сучасний метод адитивного виробництва, званий селективний лазерне плавлення (СЛП), дозволяє виготовляти об'ємні металеві вироби пошарово. Дана технологія дозволяє забезпечувати високу якість виробів (точність і унікальність геометрії, високий комплекс

механічних властивостей, висока щільність, однорідність мікроструктури і хімічного складу), і широкий спектр використовуваних матеріалів дозволяє їй знайти застосування в таких галузях як медична і стоматологічна, машинобудівна, автомобільна і аерокосмічна. Разом з тим особливістю СЛП-технології те, що якість продукції залежить від кількох тисяч факторів, які можна розділити на основні групи: обладнання, матеріал, процес, деталь, фінішна обробка. Основними підходами до вибору раціональних режимів є забезпечення достатньої якості виробів та продуктивності процесу. Необхідність системного підходу до управління якістю продукції впливає з різноманіття і взаємозв'язку зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на якість, з безперервності його формування та забезпечення.

На якість кінцевих виробів найбільш істотно впливають параметри самого процесу SLM. До основних з них відносяться потужність лазера, швидкості траєкторія сканування лазерного променя, відстань між треками сканування, товщина шару порошкового матеріалу. В роботі досліджували вплив питомої енергії сканування жароміцного сплаву Inconel 718 на 3D-принтері українського виробництва Alfa-150 (ТОВ «АЛТУУкраїни»). Встановлено вплив параметрів SLM-технології на якість кінцевої продукції та виконано аналіз впливу факторів технології на якість готової продукції. Конфігурація ванни розплаву однієї доріжки являє собою дугу, така форма є наслідком розподілу енергії лазерного променя по Гаусу. Між глибиною одиничного треку і питомою лінійною енергією встановлено залежність, яка описується лінійним рівнянням з коефіцієнтом апроксимації 0,93. В результаті металографічних досліджень встановлено, що при перекритті треків 25% створюються умови глибокого проплавлення, утворюються великі витягнуті пори в корені треку, що формуються при схлопуванні лунки (так звана «замкова щілина»). При перекритті 17% утворюється невелика кількість дрібних округлих пор, при перекритті 0 ... 8% формується структура з мінімальною кількістю пор. При відстані між треками, що перевищує ширину одиничного треку при даному поєднанні потужності і швидкості сканування лазера, спостерігаються випадки неповного сплаву сусідніх треків, утворюються пори з гострими краями, які є концентраторами напружень - найбільш небезпечними з точки зору надійності виробу. Таким чином рекомендоване перекриття треків при вибіркового лазерного плавленні, яке становить від 0 до 8% від ширини одиничного треку при раціональних параметрах процесу:  $P = 180 \text{ Вт}$ ,  $V = 800 \text{ мм/с}$ .

УДК669.295 : 616.31.001.86

## **ДОСВІД ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕНТАЛЬНИХ ІМПЛАНТІВ ЗА 3-D ТЕХНОЛОГІЄЮ ЗІ СПЛАВУ НА ОСНОВІ ТИТАНУ**

**Ph.D Аджамський С.В., д.т.н. Кононенко Г.А., Подольський Р.В.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро  
ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

На сьогоднішній день 3-D технологія селективного лазерного плавлення (СЛП) знайшла застосування в різних галузях, в тому числі й в стоматологічній. Традиційне виготовлення зубних протезів, коронок, мостів, яке виконується по зліпкам зубів, відходить в минуле. Воно займає багато часу, пов'язане з неприємними відчуттями і дискомфортом при знятті зліпків традиційним шляхом. Робота зубних техніків вельми трудомістка і займає багато часу, щоб отримати хороший результат та пов'язана з значними витратами матеріалу, який йде у стружку. Виготовлення дентальних імплантів за технологією СЛП має значні переваги: забезпечення оптимальної пористості поверхні у вигляді губчастої структури з рекомендованими параметрами для інтенсивного остеосинтезу і остеointegraції; формування перехідних поверхонь з заданою геометрією і шорсткістю, тим самим створюючи всі умови, що перешкоджають проникненню інфекції в зоні контакту з м'якими тканинами і шкірою пацієнта; формування всередині імплантату каналів складної форми для внутрішньої доставки лікарських

препаратів, а також тонкостінних елементів; формування різьби з будь-яким профілем, в тому числі зі змінним діаметром і кроком; створення приєднувальних поверхней для швидкозмінних абатментів. Для отримання моделі імплантату в цифровому варіанті, потрібно провести лише 3D сканування зубної порожнини пацієнта. А створення самого виробу при адитивному виробництві відбувається шар за шаром, шляхом додавання порції матеріалу відповідно до заданої моделі. Використання сучасних технологій дозволяє збільшити обсяги виробництва без збільшення кількості персоналу.

Компанією ТОВ «АЛТ України» розроблено та виготовлено надкомпактний 3D-принтер Alfa-150D з розміром робочого поля 150×150×180 мм, який оснащений високоточним ітербієвим лазером з повітряним охолодженням з потужністю 200 Вт. Точність позиціонування лазерного променя – 0,15 мкм. Товщина робочого шару – 20...100 мкм. В роботі використовували титановий сплав Ti-6Al-4V хімічного складу, % ваг.: Al=6,21; V=4,03; Fe=0,04; C=0,1; O=0,7; N =0,02; Ti - база. Виготовлені зразки імплантів з Ti-6Al-4V за попередньо встановленими рекомендованими режимами: постійна потужність лазера - 195Вт, швидкість сканування променя лазера – 1000...1200 мм/с з кроком 50 мм/с, відстань між проходами променя - 0,09...0,12 мм з кроком 0,01мм при постійній швидкості сканування. За цих режимів щільність металу зразків - більше 99,95%. На імплантах, виготовлених за рекомендованими режимами дослідили вплив сили струму (0,5...2,5 А), напруги (12...20 В) та тривалості (3...6 хвилин) на втрату маси при електрохімічному поліруванні. За результатами виконаних досліджень виготовлене обладнання для застосування СЛП-технології в стоматології, встановлено можливість виготовлення дентальних імплантів з поверхнею у вигляді губчастої структури, встановлені рекомендовані режими виготовлення та електрохімполірування дентальних імплантів.

УДК669.046 : 621.575 : 620.17

## **ВПЛИВ НАПРЯМКУ ПОБУДОВИ ТА ТОВЩИНИ РОБОЧОГО ШАРУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ**

**Ph.Даджамський С.В., д.т.н. Кононенко Г.А., Подольський Р.В.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро  
ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

Технологія адитивного виробництва, також відома як 3D-друк, останнім часом розповсюджується, а також розширює кількість матеріалів і методів, які можна використовувати.

Робота стосується технології селективного лазерного плавлення (СЛП), яке являє собою ітеративний процес, що складається з трьох основних етапів: (1) нанесення шару порошку товщиною від 20 до 50 мкм на будівельну платформу; (2) локальне плавлення шару порошку лазерним джерелом на основі раніше імпортованих даних 3D-CAD; (3) опускання будівельної платформи і повторний запуск в точці (1). Порошок зазвичай наноситься полімерним або гумовим скребком.

Дослідження авторів останніх двох років в основному були зосереджені на управлінні процесом, включаючи вплив різних параметрів на стабільність процесу і результуючу мікроструктуру і властивості матеріалів .

Метою даної роботи є дослідження впливу різного орієнтування побудови в напрямку осей X, Y, Z, та товщини друку шару (40 мкм та 20 мкм) на механічні властивості кобальт-хромового сплаву (Co-Cr-Mo) виготовлених методом СЛП.

Матеріалом, використаним в цьому дослідженні, був кобальт-хромовий сплав Co-Cr-Mo з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку Co-Cr-Mo в % ваг.: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016

За результатами досліджень механічних властивостей було встановлено залежності щільності матеріалу від параметрів процесу, визначено раціональні режими виготовлення зразків. Досліджено механічні властивості зразків, виготовлених за однаковими режимами з різними напрямками побудови для кожної з досліджуваних товщин робочого шару. Показано, що горизонтальні зразки мають на 10-12% вище значення показників міцності і на 25-30% нижче значення показників пластичності, ніж вертикальні. Встановлено, що зразки з товщиною робочого шару 20 мкм мають більші значення тимчасового опору в 1,12 рази та пластичності в 1,8 рази.

УДК 621.791

## **ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ СТАЛЬ-МІДЬ ВЕЛИКИХ РОЗМІРІВ**

**Ф.К. Біктагіров д.т.н., В.О. Шаповалов чл.-кор., О.В. Гнатушенко к.т.н.,  
А.П. Ігнатов к.т.н., В.В. Барабаш асп., В.В. Степаненко м.н.с.**

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

Сталемідні біметали досить широко використовуються в різних галузях промисловості. Основне призначення міді в таких біметалах – це покращення електротехнічних характеристик виробів. Отримання якісного та надійного з'єднання сталь-мідь ускладнюється через суттєві відмінності в фізичних та хімічних властивостях цих матеріалів. У такому біметалі однією з основних вимог є обмеження області проникнення заліза в мідь, внаслідок суттєвого, в цьому випадку, зниження її електро- та теплопровідності. Крім того, існує небезпека утворення перитектичних з'єднань заліза з міддю, що призводять до погіршення механічних властивостей металу в місцях їх розташування.

Не вдаючись до подробиць різних способів та методів отримання біметалів сталь-мідь можна відзначити, що найбільш якісне з'єднання цих металів досягається при вакуумно-дифузійному зварюванні. При цьому забезпечується мінімальне (10-30 мкм) проникнення, за рахунок дифузії, міді в сталь та ще менше заліза в мідь. Однак дана технологія високовартісна та використовується для отримання порівняно невеликих за габаритами виробів.

При необхідності отримання великих за поверхнею контакту та вазі сталемідних заготовок використовуються інші технології. Для забезпечення протікання струму через под дугових печей постійного струму, добре зарекомендувала себе конструкція донного струмопідводу, яка являє собою сталевий стрижень діаметром 200-300 мм, що нижнім торцем з'єднується (зварюється) з масивним (до 500 кг) охолоджуваним мідним корпусом. Для отримання такого струмопідводу найбільш підходящою, на нашу думку, є технологія електрошлакової наплавки. Відомі різні її види, які відрізняються між собою обладнанням та технологією. Наприклад, освоєна в ІЕЗ ім. Є.О. Патона наплавкана сталеву заготовку міді шляхом електрошлакового переплаву мідного електроду в струмопідвідному кристалізаторі.

Нами проведені дослідження та відпрацьована технологія електрошлакової наплавки в вогнетривкій формі з використанням невитратних електродів для здійснення електрошлакового процесу. Попередньо торцева поверхня заготовки нагрівається шлаком до температури близької температурі плавлення сталі. Потім додається мідь, яка плавиться в шлаковій ванні та потрапляє на поверхню сталеві заготовки. В подальшому на вже отримане з'єднання сталь-мідь продовжується перепад міді в шлаку до отримання мідної частини потрібного розміру. Основними параметрами, які необхідно забезпечити при такій наплавці, є склад шлаку і його

температура в період нагрівання та наплавки, температура попереднього нагріву поверхні сталеві заготовки та швидкість наплавки.

Проведені дослідження макро та мікроструктури макету донного струмопідводу в натуральну величину показали, що при такій наплавці відбувається чітке розділення двох металів за лінією їх дотику практично без взаємного перемішування. Під час механічних випробовувань металу з зони з'єднання, руйнування зразків на розтягування відбувається в мідній їх частині. Вміст заліза в мідній, на відстані більше 30-50 мм від лінії з'єднання, відповідає значенням у початковій міді. Крім того, мідь рафінується шлаком від металевих включень та небажаних домішок, що покращує її електро- та теплопровідність. Розроблений спосіб дозволяє отримувати міцне з'єднання міді зі сталю та може використовуватись при виготовленні великорозмірних сталемідних виробів.

УДК 669.15-198:669.162

## **ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛКОМАРГАНЦЮ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ЗАЛІЗА**

**В.А. Гладких (д.т.н., проф.), А.В. Рубан (к.т.н., доц.),  
О.Ю. Блуденко (ст. гр МЕ 04-20)**

**Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро**

Виробництво феросплавів характеризується різними технологічними процесами, вибір яких визначається хімічним складом сплаву і залежить від властивостей і вартості вихідної сировини, відновника та теплоносія. Феросилкомарганець виробляється вуглецевотермічним методом в закритих або герметичних рудовідновлювальних електропечах максимальної потужності 81 МВА. З практики існуючого виробництва відомо, що на стадії виплавки феросилкомарганцю вилучення марганцю і кремнію не перевищує 82% і 45% відповідно. Крім того, більше 90% марганцевих феросплавів піддається фракціонуванню, що значно зменшує вихід придатного продукту в наслідок утворення значної кількості некондиційного за фракцією сплаву, який при виробництві феросилкомарганцю становить 10-18%. Крім того, під час транспортування феросплаву залізницею або іншими видами транспорту, а також при перевантаженні з транспорту на склади замовника, відбувається процес стирання кусків сплаву. Це значно зменшує кількість гідного за фракцією феросплаву кінцевому споживачу на 8-10%. З огляду на це, питання підвищення міцності феросилкомарганцю без зміни хімічного складу в межах ДСТУ 3548-97 наразі є актуальним.

Авторами досліджено термодинамічну перевагу сумісного відновлення марганцю і кремнію вуглецем з утворенням сплавів системи Mn-Fe-Si з підвищеним вмістом заліза, а також поліпшення механічних властивостей, що дало обґрунтування для подальшого проведення промислової компанії з виплавки феросилкомарганцю з підвищеним вмістом заліза.

Процес вели в рудовідновній електропечі безперервним вуглецевотермічним процесом. Промислова компанія проводилася протягом 16 діб. У складі вихідної шихти варіювали кількістю залізородних обкотишів для забезпечення отримання базової суми (Mn + Si) в металі, яка згідно ДСТУ 3548-97 повинна бути не менше 82% при мінімальній концентрації марганцю 65%. Корегування шихти для переходу на сплав з вмістом марганцю відповідно до стандарту (65% Mn) здійснювали шляхом додаткового введення до складу шихти залізородних обкотишів. Це дозволило спланувати і провести активний експеримент з визначення часу зміни властивостей отриманого металу і шлаку від складу шихти. Для збільшення заліза в феросилкомарганцю було скориговано співвідношення заліза до марганцю в шихті з 0,01 ÷ 0,02 до 0,12 ÷ 0,16 за рахунок додавання в шихту залізородних обкотишів з вмістом заліза понад 62%. Витрата обкотишів коливалась в залежності від продуктивності печі від 3 до 14 т за зміну.

Промислове опробування процесу виплавки феросилікомарганцю з підвищеним вмістом заліза показало наступне: 1) можливість отримання феросилікомарганцю, в якому вміст марганцю та кремнію відповідає вимогам ДСТУ 3548-97; 2) застосування залізородної сировини з малим вмістом порожньої породи сприяло зниженню кратності шлаку і питомої витрати електроенергії; 3) вихід придатного феросилікомарганцю вигляді товарної фракції (10-100) зростає на 4-6%, що пов'язано з підвищенням міцнісних характеристик сплаву і зниженням кількості некондиційної фракції; 4) більш рання поява металевої фази під час присадки залізородних обкотишів сприяє покращенню умовам відновлення марганцю і кремнію.

УДК 669.18

## **ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ РАФІНУВАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕРКЕРНИХ СТАЛЕВИПУСКНИХ КАНАЛІВ В ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧАХ**

**А.А. Похвалітій, к.т.н., К.І. Чубін, к.т.н., А.В. Круть**

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

В теперішній час переважає концепція побудови технології на металургійних заводах, що передбачає максимальну інтенсифікацію всіх сталеплавильних процесів. Сучасні дугові сталеплавильні печі (ДСП) за продуктивністю наблизилися до кисневих конвертерів. Такий підхід неминуче супроводжується, по-перше, підвищенням витрати кисню як основного інтенсифікатора плавки, а по-друге, розкислювачів, за допомогою яких згодом знімається надлишкова окисленість металу. За такої схеми виробництва утворюється підвищена кількість продуктів розкислення - неметалевих включень, які потім видаляють із розплаву при позаагрегатній обробці. Це означає значний перекид у технології з перенесенням тяжкості вирішення проблеми отримання якісного металу на стадію позаагрегатної обробки сталі. Як наслідок, позаагрегатна обробка стає надмірно ускладненою, енерго- та матеріаломісткою, що веде до підвищення витрат по переділу.

Зниженню забрудненості розплаву неметалевими включеннями може сприяти реалізація вуглецевого розкислення розплаву, продукти реакції якого видаляються в газову фазу. Варто відзначити, що в сучасних ДСП замість класичних жолобів все більше прагнуть використовувати еркерні пристрої, обладнані сталевипускними каналами за своєю функціональністю, схожими зі сталевипускними каналами кисневих конвертерів. Це дає можливість поряд з відсіканням шлаку виконувати рафінувальні та захисні функції, що сприяють зниженню забрудненості розплаву неметалевими включеннями та підвищенню економії розкислювачів.

В роботах [1, 2] показано можливість реалізації рафінувальних і захисних операцій шляхом вдування інертного газу в робочий простір сталевипускного каналу кисневого конвертера за зменшенням витрати розкислювачів на 10-30%. До того ж огляд наявних літературних джерел вказує на те, що відомості щодо розширення функцій еркерних сталевипускних каналів вкрай обмежені і потребують подальшого дослідження з використанням сучасних методів математичного і фізичного моделювання.

Список літератури

1. Кулик А.Д. Совершенствование выпуска стали из конвертера / А.Д. Кулик, М.А. Кашеев, А.А. Похвалитый // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №1. – С. 18-20.

2. Высокотемпературное моделирование выпуска плавки из конвертера с подачей аргона в полость летки / А.А. Похвалитый, А.Д. Кулик, Е.Н. Сигарев, К.И. Чубин, М.А. Кашеев, А.Н. Стоянов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – №2. – С. 52-57.

УДК 669.187.56

## **КЕРУВАННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ ЗЛИВКІВ ЕШП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ**

**І.В. Протоковілов к.т.н., В.О. Шаповалов д.т.н., В.Б. Порохонько к.т.н.**

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

Досліджені способи керування кристалізацією зливків електрошлакового переплаву (ЕШП) через примусову періодичну зміну теплового і гідродинамічного стану металеві ванни шляхом нестационарних режимів електричного живлення.

Експериментальні дослідження проводили на електрошлаковій установці камерного типу при виплавці зливків діаметром 80...220 мм з вуглецевої сталі, прецизійного сплаву 29НК та титану ВТ1. Використовували різні варіанти нестационарного живлення, які полягали у періодичній зміні потужності процесу ЕШП, від робочих значень, до деяких мінімальних значень, з різною скважністю імпульсів і рівнем модуляції.

Показана можливість реалізації двох, принципово відмінних процесів. Якщо тривалість пауз електроживлення невелика (від десятої долі секунди до декількох секунд), тобто її нижнє значення порівняно з періодом краплеутворення, а верхнє не перевищує постійну часу шлакової ванни, або під час пауз виділяється достатня для плавлення металу тепла потужність, то тоді періодичність живлення не викликає періодичності процесів плавлення електроду і кристалізації металу зливка. В цьому випадку нестационарне електроживлення впливає на гідродинамічний стан ванни викликаючи її механічні коливання і вібрації, а також на процеси краплеутворення металу на торці електроду.

В другому випадку, якщо тривалість пауз електроживлення достатньо велика (від десятків секунд до десятків хвилин) і потужність, яка виділяється в період пауз недостатня для плавлення металу, то такий характер живлення призводить до періодичності процесів плавлення витратного електроду і кристалізації металу, викликаючи, тим самим, пошарове формування зливка по його висоті. В цьому випадку з'являється можливість керувати суттєво зменшувати об'ємом металеві ванни, що позитивно впливає на умови кристалізації металу і сприяє придушенню ліквацийних процесів.

Показано, що параметри нестационарного живлення визначаються ступенем інерційності теплових режимів витратного електроду, металеві і шлакової ванн, та гарнісажної кірки. При цьому, обмежуючим чинником є процес утворення гарнісажної кірки, який є більш чутливим до зміни режимів живлення.

Встановлено, що нестационарне живлення електричною енергією дає можливість керувати техніко-економічними характеристиками процесу ЕШП і структурою отриманого металу. Встановлено факти зменшення на 7...10% питомої витрати електроенергії, та подрібнення і гомогенізації структури металу титанових зливків, у порівнянні з металом традиційного ЕШП.

Експериментально доведена ефективність керування структуроутворенням зливків ЕШП шляхом пошарового їх формування. Показано, що зливки, отримані способом пошарового формування мають щільну структуру, без пористості та неметалевих включень, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони зустрічної кристалізації по вісі зливка. При цьому, максимальна довжина кристалів обмежується висотою окремого наплавленого шару, а дисперсність структури значно вище ніж у аналогічних зливків традиційного ЕШП.

Встановлено, що для реалізації пошарового формування зливка періоди плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, коли електрод не плавиться і не подається але в шлаковій ванні підтримується електричний струм і заданий тепловий режим. Показано,

що висоту окремих порцій наплавленого металу доцільно обирати в межах  $(0,1...0,5) \times d_{зл}$ , а тривалість пауз плавлення електроду розраховувати виходячи з умов твердіння за цей час 75...95 % об'єму рідкої металеві ванни.

УДК: 621.74.046

## **НОВІТНІЙ ЛИВАРНО-ІНДУКЦІЙНИЙ МЕТОД ОДЕРЖАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ТА ТРИШАРОВИХ ВИРОБІВ**

**А.М. Тимошенко к.т.н., В.Пліхощад.т.н., О. В. Шматко**

**Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ**

Можливості існуючих процесів виготовлення монометалевих виливків у питанні подовження терміну експлуатації деталей, які швидко зношуються, практично вичерпано. Найбільш перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є застосування біметалевих та багатошарових виробів з диференційованим комплексом властивостей.

Тому актуальним питанням є створення нових гібридних методів одержання біметалевих та багатошарових виробів, як на основі традиційних ливарних технологій, так і принципово нових схем з використанням електромагнітного впливу на метал, що забезпечить суттєвий техніко-економічний ефект.

Метою досліджень є створення високоефективного методу одержання зносостійких біметалевих та тришарових виробів на основі ливарних процесів при дії електромагнітних полів.

Зазначений метод заснований на принципі заливання розплаву зносостійкого чавуну на тверду тонкостінну сталю заготовку, попередньо нагріту під шаром кисневонепроникного покриття при дії електромагнітного поля. Встановлено, що надійне з'єднання досягається в інтервалі температур нагріву заготовки від 800 до 1200 °С при температурі розплаву 1410-1450 °С, що і є початковими умовами досліджень. При цьому індукційний нагрів пластини не повинен перевищувати максимальної температури 1350 °С.

При реалізації даного методу для отримання надійного зв'язку на границі розділу двох матеріалів особливу увагу приділено рівномірному нагріву плоскої заготовки, що досягається правильним вибором конфігурації індуктора та режимів обробки. З цією метою в роботі розглянуто дві конфігурації індуктора: плоского еліпсоїдного типу, який діє тільки на одну поверхню заготовки і спірального індуктора соленоїдного типу, який охоплює чотири поверхні заготовки. В роботі використовували блок живлення потужністю до 40кВт з частотою 60 кГц.

Дослідження проводилися за допомогою методів комп'ютерного моделювання та натурних експериментів.

Технологічний процес з використанням індуктора соленоїдного типу передбачає транспортування і розміщення нагрітої заготовки у ливарну форму, внаслідок чого відбувається її охолодження до температури 820 - 1200 °С. Мінімальний час на транспортування і розміщення нагрітої пластини складає 8с, а максимальний – обмежується нижньою температурною границею одержання дифузійного зв'язку, що відповідає 40 с.

Процес виготовлення біметалевих виробів з використанням плоского індуктора супроводжується збільшенням часу нагрівання, проте не вимагає транспортування самої сталеві заготовки, що є більш технологічно доцільніше.

В результаті імітаційного моделювання для двох конфігурацій індукторів встановлено закономірності розподілу енергії від сили струму і часу нагрівання. Розглянуто розподіл полів температури в сталевій заготовці. Встановлено, гідродинамічні особливості заповнення розплавом ливарної форми та кристалізації виливка.

Розроблений ливарно-індукційний метод відкриває нові можливості отримання тришарових виробів з різними фізико – механічними властивостями матеріалів наприклад «чавун-сталь-бронза», що досягається при одночасному заливанні двох розплавів на сталю заготовку.



За результатами експериментальної апробації підтверджено ефективність застосування розробленого ливарно-індукційного методу для одержання біметалевих і тришарових виробів.

### **Автоматизація та сучасні методи контролю металургійних процесів та якості металургійної продукції**

УДК 669.162.21: 669.162.262: 681.3.083.133

### **АЛГОРИТМІЧНІ ЗАСОБИ СИСТЕМИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ ДОМЕННОЇ ШИХТИ НА ОСНОВІ ЇЇ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЗОНАХ ПЕЧІ**

**Д.М. Тогобицька, д.т.н., А.І. Белькова, к.т.н., Д.О. Степаненко, к.т.н., І.Г. Муравйова, Ю.М. Ліхачов**

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

З метою вирішення стратегічних завдань формування раціонального складу багатокомпонентної доменної шихти цільового призначення та прогнозування негативних наслідків використання вторинних ресурсів, що призводить до нестабільної роботи печі і погіршення якості чавуну, в Інституті чорної металургії НАНУ розроблено новий системний підхід, який базується на розвинутій концепції моделювання процесів спрямованого формування розплавів необхідного складу та властивостей [1].

За допомогою комплексу розроблених математичних та фізико-хімічних моделей, що описують та пов'язують процеси розподілу шихтових матеріалів у різних зонах печі із техніко-економічними показниками плавки, та з використанням методів векторної оптимізації розроблено алгоритмічне забезпечення системи вибору оптимального складу доменної шихти, що дозволяє:

- здійснити розрахунок високотемпературних властивостей залізорудних матеріалів, комплексу фізико-хімічних властивостей первинних та кінцевих шлакових розплавів,
- прогнозувати хімічний склад чавуну та доменних шлаків в залежності від показників завантажувальної шихти з врахуванням параметрів дуттьового режиму;
- виконати оцінку технологічної ситуації за контрольованими показниками плавки та сформованою системою технологічних обмежень;
- розв'язати задачу багатокритеріальної оптимізації складу шихти з урахуванням технологічних вимог, обґрунтованих з позиції раціонального перебігу агрегатних перетворень у печі та спрямованого формування розплавів необхідного складу та властивостей при підвищеній продуктивності в сучасних умовах доменної плавки.

Інформаційною основою для створення прогнозних моделей розрахунку фізико-хімічних властивостей розплавів є інформація, накопичена в базах даних "Залізорудні матеріали", "Шлак" і "Метал-шлак" створеної в ІЧМ інтегрованої Бази Знань «Металургія». Моделювання властивостей металургійних систем доменної плавки та процесів утворення і взаємодії металеві і шлакової фаз здійснюється з використанням інтегральних параметрів на рівні міжатомної взаємодії компонентів в розплавах, що дозволяє описати взаємозв'язки між складом і властивостями сполук в системі «метал-шлак».

Головною особливістю розробленого системного підходу до вирішення задач оптимізації складу доменної шихти є врахування закономірностей фізико-хімічних перетворень залізовмісних матеріалів у високотемпературних зонах печі та спрямованого формування розплавів, що регулюється системою обґрунтованих технологічних обмежень з метою забезпечення необхідних (високих) показників доменної плавки.

Результати тестування алгоритмічних засобів системи вибору оптимального складу доменної шихти на фактичних промислових даних роботи доменної печі в сучасних умовах, що працює з використанням пиловугільного палива та природного газу, дозволили сформулювати

науково обґрунтовані рекомендації по компонентному складу завантажувальної подачі з урахуванням наявних сировинних та енергетичних ресурсів.

1. Тогобицкая Д.Н. Выбор состава доменной шихты, обеспечивающего направленное формирование жидких продуктов доменной плавки / Д. Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, Д. А. Степаненко [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепропетровск. – 2016. – № 3. – С. 11-18.

УДК 621.74.08

## КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗПЛАВІВ

**В.П. Школяренко, к.т.н.**

**Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ**

Здебільшого під контролем температури розплавів мається на увазі процес вимірювання температури, що не зовсім одне й те саме. Такий стан справ викликаний, як недотриманням вимог ДСТУ 3021-95 [1] щодо термінів та визначень, так і відсутністю типової методики контролю температури розплавів, що обумовлює актуальність наукових досліджень.

В умовах війни фактор енергозбереження є одним із визначальних для України. Тому, економія енергоресурсів у металургії є важливим науковим та практичним завданням, які визначені у Енергетичній стратегії України на період до 2035 року [2].

Згідно [1], технічний контроль – це перевірка відповідності об'єкта встановленим технічним вимогам. Відповідно, контроль температури рідких металів та сплавів – це процес визначення відповідності температури розплаву встановленим вимогам чи нормам. Сутність температурного контролю складається з двох основних етапів – вимірювання та порівняння. Перший етап вимірювання температури рідких металів та сплавів називається первинною інформацією. На другому – первинна інформація (температура рідких металів та сплавів) зіставляється із заздалегідь встановленими вимогами, нормами або гранично допустимими значеннями температури рідких металів та сплавів.

За розташуванням зони контрольованого стану розрізняють допусковий контроль станів:

температура рідкого металу нижче допустимого значення;

температура рідкого металу вище допустимого значення;

температура рідкого металу між верхнім і нижнім значеннями, що допускаються.

Результатом контролю є не число, а одне із взаємовиключних тверджень:

контрольована температура рідких металів знаходиться в межах допустимих значень, результат контролю – «метал придатний до розливу»;

контрольована температура рідких металів знаходиться за межами значень, що допускаються, результат контролю – «метал не придатний до розливу».

Висновки.

1. На основі виявлення спільності й відмінності понять контролю та вимірювання температури розплавів обґрунтовано, що вимірювання і контроль не є тотожними поняттями.

2. Встановлено, що контроль температури розплавів безпосередньо пов'язаний з поняттям якості продукції ливарного виробництва.

Література

1. ДСТУ 3021-95 Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. 71 с.

2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: веб-сайт Верховної ради України.  
URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf>.

УДК 669.1:621.7

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗАЦІЇ У МЕТАЛУРГІЇ

В.П. Школяренко, к.т.н.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

У роботі [1] виявлено, що близько 75% нещасних випадків травматизму у ливарних цехах відбувається з організаційних причин (людський фактор), а близько 25% усіх травм відбувається з технічних причин (збій обладнання). Вищенаведене дозволяє стверджувати, що проблема травматизму у металургії та ливарному виробництві не вирішена, в більшості випадків, через наявність людського фактору. Тому, вирішення проблеми мінімізації травматизму шляхом автоматизації ливарного виробництва є актуальним науково-технічним завданням.

У перспективі є прагнення до повного виключення присутності людини на небезпечних ділянках металургійного та ливарного виробництва, що може бути реалізовано шляхом розробки автоматичних, роботизованих систем управління ливарними процесами з різними ступенями автономності. Серед них особлива роль приділяється штучному інтелекту, тобто роботам. Технології, що дозволять забезпечити автономію ливарного обладнання, наразі є пріоритетними згідно Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні [2]. На виконання Концепції розроблено Стратегію розвитку штучного інтелекту в Україні на 2022 – 2030 рр. [3].

У [4] вважається, що перспективними напрямками подальшого розвитку глобальної ливарної промисловості будуть автоматизація та використання комп'ютерних технологій для покращення робочих процесів. Провідні інженери – ливарники китайської компанії ZHY Casting виклали своє бачення подальшого розвитку ливарної промисловості Китаю у тенденції [5], де відзначається про необхідність підвищення рівня механізації та автоматизації сталеливарних підприємств, а також розширення застосування роботів.

Наприклад, після застосування роботів на сталеливарному заводі Eagle Alloy (США), трудомісткість ливарного виробництва скоротилась з 55-60 до 40-48 людино-годин на нетто-тонну ливарної продукції. Економія праці складає близько 15000 годин на рік [6].

Висновки.

1. Встановлено, що штучний інтелект, як система створення нових знань і прийняття на цій основі рішень, у галузі металургії та ливарному виробництві, не розроблена і потребує розробки. У технологіях штучного інтелекту не вирішено проблему розуміння сенсу.

2. Виявлено, що дослідження і розробки у галузі штучного інтелекту здійснюються без прогнозу наперед та не враховують можливі ризики від його застосування у майбутньому.

Література

1. Комплексний підхід щодо збереження здоров'я робітників ливарного виробництва / Н.С. Євтушенко, О.І. Пономаренко, Н.Є. Твердохлебова, Є.Д. Євтушенко // «Литво. Металургія. 2022: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції». Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 61-63.

2. Концепція розвитку штучного інтелекту в Україні: веб-сайт Верховної ради України. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>.

3. Шевченко А.І. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні (2022 – 2030). Штучний інтелект. Науковий журнал. 2022. №1. URL:<https://jai.in.ua/archive/2022/2022-1-1.pdf>.

4. Світовий ринок металевих виливків 2019-2020: країни, сплави / В.А. Гнатуш, В.С. Дорошенко // «Литво. Металургія. 2022: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції». Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 44-52.

5. Future development trend of China steel casting parts production. ZHY Casting.

URL: <https://www.zhycasting.com/future-development-trend-of-china-steel-casting-parts-production/>.  
6. Robotic grinding in a steel job shop: Modern Casting.  
URL: <https://www.moderncasting.com/node/2173>.

### **Металознавство та термічна обробка сталі**

УДК669.15-194.53 : 629.4.003.12

## **АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПЕРЛІТНОГО КЛАСУ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК**

**д.т.н. Бабаченко О.І., д.т.н. Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Сафронов О.Л.**

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

Рейки українського виробництва за поточною технологією поступаються зарубіжним аналогам по механічним властивостям, та, як наслідок, по експлуатаційній довговічності. Пропускна здатність рейок, вироблених в Україні, становить 0,5 млрд. тонн брутто, в той час як аналогічний показник у Франції, Японії становить 1 млрд. тонн брутто, тобто в 2 рази більше. Показано, що підвищення характеристик міцності сталі за рахунок розробки нового хімічного складу та термічної обробки призводить до підвищення експлуатаційних характеристик.

З літературного аналізу було встановлено, що сталі, які застосовуються в виробництві залізничних рейок для досягнення перлітної структури необхідно охолоджувати зі швидкостями в діапазонах 0,63...18,2°C/с. Показано, що для сталі 75ХГСМ необхідна швидкість охолодження складає від 0,63...0,14°C/с, оскільки застосування легуючих елементів Cr, Mn, Si, Mo збільшує інкубаційний період. Таким чином, область перлітного перетворення стає більш схильна до переміщення в бік менш інтенсивних швидкостей охолодження. У сталі М76Т відбувається формування перлітної структури при швидкості охолодження в діапазоні 9,2...18,2°C/с, в сталі R350LHT - при швидкості охолодження близько 5°C/с. У сталях Е76ХФ та Е76ХАФ, до складу яких введено хром, після охолодження зі швидкостями 1 °C/с і менше, внаслідок розпаду переохолодженого аустеніту крім ферито-карбідної суміші перлітного типу спостерігається утворення надлишкового фериту. У сталі Е76Ф швидкість охолодження для утворення структури перліт необхідна швидкість охолодження складала до 10°C/с.

Були проведені розрахункові дослідження впливу хімічних елементів на кінцеву структуру та механічні властивості сталі. На підставі даних досліджень було рекомендовано 3 дослідних хімічних складу сталей для лабораторної виплавки та проведення подальших досліджень.

УДК 669.14.018.294.3 : 620.184.2.001.8

## **АНАЛІЗ ЗВОРОТНЬОЇ ЛІКВАЦІЇ В ЛАБОРАТОРНИХ ЗЛИВКАХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ**

**Т.В. Балаханова к.т.н., с.н.с., О.А. Сафронова м.н.с.**

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

Локальні варіації хімічного складу, тобто композиційні неоднорідності, відіграють важливу роль у термодинамічній стійкості й просторовому розподілі фаз у багатофазних сталях. Обмежена розчинність легувальних елементів у твердому стані в сталі призводить до ліквідації при затвердінні. Під час кристалізації розчинена речовина розподіляється між твердим тілом і рідиною, щоб збагачувати або виснажувати міждендритні області. Морфологія дендритної

структури і ступінь ліквідації залежать не тільки від ступеня переохолодження, градієнту температурного поля і умов течії рідкого металу, а також від хімічного складу, а саме від градієнту концентрації розплаву.

В рамках даної роботи були виготовлені і проаналізовані наступні дослідні зливки зі сталей, які використовуються для виготовлення залізничних осей – сталей марок ОС за ДСТУ 31334, F за ААР М 101 і EA1N за EN 13261.

Розташування пористості і неметалевих включень дозволяє стверджувати, що ці місця відповідають міждендритним просторам. Крім цього видно, що в центральній зоні зливку присутній розсип найдрібніших неметалевих включень. Звичайно, виплавка осьової сталі в тиглях в лабораторних умовах дещо відрізняється від промислового виготовлення безперервною заготовкою, при виготовленні яких проводиться додаткове очищення сталі, проте деякі закономірності все ж були виявлені.

Було зроблено наступне припущення – утворення знеуглецюваних ділянок, в тому числі і без змісту Si, може бути пов'язано якраз з більш інтенсивним ступенем ліквідації хімічних елементів, в тому числі і сильною загазованістю цих зон. Однак далі за текстом утворення такої ділянки аномальної структури будемо називати «зона зворотньої ліквідації».

Формування так званої зони «зворотньої ліквідації» в досліджуваних зливках, швидше за все пов'язані саме із забрудненістю і загазованістю сталі.

При цьому найбільш яскраво даний дефект помітний в сталі EA1N, яка характеризується підвищеним вмістом Mn і зниженим вмістом C в порівнянні з марками осьової сталі ОС і F. Зв'язку розмірів цього дефекту з геометричними розмірами зливку, а також вмістом шкідливих домішок (S і P), а також Al не виявлено.

Таким чином, на формування зони «зворотньої ліквідації» у стаціонарному зливку з вуглецевої сталі суттєво впливає вміст C та співвідношення вмісту Mn та Si.

Показано, що збільшення значення відношення вмісту Mn до Si в осьових сталях марок EA1N, ОС і F сприяє збільшенню газонасиченості сталі і виникненню аномальних структур. При цьому чим нижче в сталі вміст C, тим при меншому значенні співвідношення Mn до Si відбувається утворення дефекту. Показано істотний вплив загальної розкисненості і вмісту S в сталі на формування неоднорідності за перерізом зливка осьової сталі і мікронеоднорідність структури окремих ділянок.

УДК 621.762.2

## **ОСОБЛИВОСТІ ФАЗОУТВОРЕННЯ СПЕЧЕНОГО БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО КОМПОЗИТУ ІЗ ПОРОШКОВОЇ СУМІШІ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ $TiH_2$ -Fe-Si-C**

**О.В. Барановська, м.н.с.**

**Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ**

В роботі наведено результати досліджень особливостей фазоутворення при термічному синтезі багатокомпонентного композиційного матеріалу із порошкової шихти системи  $TiH_2$ - $Fe_2Si_5$ -C.

Для виготовлення багатокомпонентного композиційного матеріалу використовували методи порошкової металургії. В якості вихідних матеріалів використовували порошок гідриду титану ( $TiH_2$ ), порошок феросиліцію (ФС-65) і технічний вуглець (C). Використання порошку гідриду титану забезпечує активацію дифузійних процесів під час спікання, а також дає можливість додатково очистити міжфазні межі через утворення атомарного водню.

Застосування феросплавів при легуванні порошкових шихт на основі титану може вирішити завдання підвищення фізико-механічних властивостей виробів, що отримуються, і зниження вартості кінцевого виробу.

Термічний синтез проводили у вакуумі після високоенергетичного розмелу у млині типу «п'яна бочка» двома послідовними стадіями: нагрівання до 600 °С, з ізотермічною витримкою 30 хвилин і до 1250 °С, з витримкою година.

Згідно діаграми стану Fe-Si, залізо з кремнієм можуть утворювати три типи сполук: моносиліцид - FeSi (33,3% Si);  $\eta$ -фаза Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> (25% Si);  $\varepsilon$ -фаза Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub> (55,68% Si). При температурах вище 1100 °С з'єднання Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> та Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub> розкладаються, утворюючи Fe та Si. Внаслідок високої спорідненості титану до вуглецю і кремнію відбувається взаємодія цих елементів з утворенням фаз карбиду титану TiC та силіциду титану Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, які є основними фазами. Також відбувається впорядкування кристалічних ґраток і утворення більш стабільного FeSi інтерметаліду.

Використання в якості легууючої добавки феросиліцію призводить до його активної взаємодії з гідридом титану, яке супроводжується дисоціацією лігатури з утворенням складної гетерофазної системи, переважаючими фазами якої є карбід титану TiC, силіцид Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> та моносиліциду FeSi.

УДК 669.14.017:620.18:669.15-194

## ПРО ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПІД ЧАС ІЗОТЕРМІЧНОГО ГАРТУВАННЯ ТА КРІОГЕННОГО ОБРОБЛЕННЯ СТАЛІ 38ХНЗМФА

С. В. Бобирь д.т.н., Е. В. Парусов д.т.н., Т. М. Голубенко к.т.н., О. Є. Барановська к.т.н.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Наведено результати досліджень впливу ізотермічного охолодження та наступного кріогенного оброблення на формування структури, твердості та зносостійкості сталі 38ХНЗМФА. З метою підвищення показників міцності сталі 38ХНЗМФА запропоновано ізотермічне гартування з двофазної ( $\gamma+\alpha$ )-області та подальшим отриманням багатофазної структури. Запропонований режим термічного оброблення передбачав нагрівання до 750 °С та охолодження до різних температур ізотермічного витримування.

За даними металографічного аналізу кількість трооститу в структурі сталі підвищується зі зниженням температури ізотермічного витримування. Сталь набуває необхідної твердості за температур витримування 450–400 °С. Структура зразків сталі 38ХНЗМФА, оброблених за експериментальним режимом складалася переважно з трооститу, ділянок бейніту та залишкового аустеніту. Бейнітна складова сталі 38ХНЗМФА містила частинки легованих карбідів, імовірно, цементитного типу. Витримування зразків у двофазній ( $\gamma+\alpha$ )-області та подальше охолодження до температур ізотермічного витримування сприяє виділенню зазначених карбідів та стабілізації залишкового аустеніту, який є складовою частиною бейніто-аустенітних ділянок.

Застосування кріогенного оброблення для експериментального режиму ізотермічного гартування сталі 38ХНЗМФА обумовлює перетворенню залишкового аустеніту в мартенсит з істотним збільшенням мікротвердості структурних складових ~ на 22 %. Перетворення залишкового аустеніту в мартенсит під час кріогенного оброблення підтверджено електронно-мікроскопічними дослідженнями структури зразків сталі 38ХНЗМФА: залишковий аустеніт у вигляді глобулів, голок та пакетів перетворюється у мартенсит подібної морфології.

На різних ділянках структури дослідних зразків проведено мікрорентгеноспектральний аналіз розподілу хімічних елементів (залізо, хром, марганець, нікель, молібден, ванадій). Встановлено, що квазіевтектоїдні ділянки структури характеризуються підвищеною концентрацією нікелю, хрому та молібдену, в яких утворюється залишковий аустеніт, а після кріогенного оброблення – мартенсит. Ванадій, як легувальний елемент, було виявлено тільки в окремих ділянках структури сталі, що свідчить про неоднорідність його розподілення та скупчення в окремих включеннях.

Випробування зразків, що були оброблені за експериментальним режимом, продемонстрували більш високу ~ на 50 % поверхневу зносостійкість сталі 38ХНЗМФА у порівнянні з базовою технологією. Розроблений режим може бути рекомендований для промислової реалізації технології зміцнення зі сталі 38ХНЗМФА для виробів відповідального призначення.

УДК 669.112.227.3: 669.15-194

## НОВА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ТА СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ВУГЛЕЦЕВИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЯХ

С. В. Бобирь д.т.н., Е. В. Парусов д.т.н., Т. М. Голубенко к.т.н., Д. В. Лошкаръов

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Проведено комплексні дослідження особливостей перебігу фазово-структурних перетворень у процесі охолодження легованих сталей 25Х2М1Ф та 38ХНЗМФА з урахуванням утворення залишкового аустеніту та адаптування наявних аналітичних моделей для проведення відповідних розрахунків. На засадах розробленої математичної моделі створено методологічний підхід, який застосовано для аналізу структури дослідних сталей. Побудовано ізотермічні, термокінетичні та структурні діаграми розпаду аустеніту легованих сталей 25Х2М1Ф та 38ХНЗМФА. Для сталі 38ХНЗМФА розраховано швидкості утворення перліту і бейніту, а також визначено зміну частки структурних складових залежно від фактичної температури за безперервного охолодженні з різними швидкостями.

Відповідно до розробленої методики визначено критичні точки: для сталі 25Х2М1Ф –  $A_{C3} = 895$  °С,  $A_{C1} = 810$  °С,  $M_n = 350$  °С; для сталі 38ХНЗМФА –  $A_{C3} = 765$  °С,  $A_{C1} = 710$  °С,  $M_n = 285$  °С. Виявлено, що у сталі 25Х2М1Ф між перлітною і бейнітною складовими існує область підвищеної стабільності аустеніту за температури ~ 600 °С. У сталі 38ХНЗМФА спостерігається температурний інтервал стійкості аустеніту між перлітною і бейнітною складовими, а утворення бейніту й фериту починається пізніше та за більш низьких температур, у порівнянні зі сталлю 25Х2М1Ф. Відмінності в елементах хімічного складу цих сталей обумовлюють зовнішній вигляд структурних діаграм, а кількість залишкового аустеніту врахована за розробленою методикою уперше.

Створена аналітична модель була застосована для аналізу структури сталі 38ХНЗМФА та її зміни протягом охолодження з різними швидкостями. За результатами моделювання встановлено зміну значень твердості при нагріванні та відпуску сталі 38ХНЗМФА. Встановлено, що під час безперервного охолодження сталі 38ХНЗМФА за температури ~ 450 °С присутній перетин бейнітної та перлітної областей, в якому зазначені структурні складові формуються одночасно. Области феритного і перлітного перетворень для сталі 38ХНЗМФА зміщені порівняно зі сталлю 25Х2М1Ф, а розпад аустеніту починається за більш низьких температур.

За результатами моделювання встановлено, що для сталі 25Х2М1Ф можливо отримати переважно бейнітну структуру в широкому діапазоні швидкостей безперервного охолодження. За аналогічних швидкостей охолодження сталь 38ХНЗМФА складається із мартенсито-бейнітної структури, а отже повинна характеризуватися більш високими показниками міцності та поверхневої зносостійкості. Одержані результати засвідчують достовірність розробленої аналітичної моделі, що підтверджується високою відповідністю розрахункових структурних складових сталі 38ХНЗМФА фактичним параметрам структури, які формуються у промислових умовах після термічного оброблення.

УДК 621.774.35

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МЕЗОСТРУКТУРИ В СТАЛЕВІЙ МАТРИЦІ ПОБЛИЗУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ

С. І. Губенко<sup>1, 2</sup> д.т.н.

<sup>1</sup>Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

<sup>2</sup>Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро

Досліджено особливості локалізації деформації в сталевій матриці поблизу неметалевих включень за різних умов навантаження з точки зору фізичної мезомеханіки пластичного деформування середовища з неоднорідною структурою.

Останні десятиліття розвивається релаксаційний багаторівневий підхід до проблеми пластичності твердих тіл, оскільки опис макромеханічних характеристик твердих тіл лише з урахуванням теорії дислокацій є недостатнім. Тому проводяться дослідження процесів пластичної деформації на мезомасштабному рівні, використовуючи також і традиційні уявлення про деформаційну поведінку металевих матеріалів, у тому числі з гетерофазною структурою. Метою даної роботи було вивчення впливу неметалевих включень на локалізацію деформації та формування фрагментованої мезоструктури у сталевій матриці в рамках уявлень фізичної мезомеханіки гетерофазних сплавів.

Пластичність сталей із неметалевими включеннями, тобто, деформація як єдиного структурного цілого визначається здатністю до інтенсифікації пластичної деформації та ефективною дисипацією енергії. Це передбачає механічну взаємодію елементів структури сталі (сталева матриця та включення) через міжфазні межі включення-матриця. Кожен вид сталі характеризується своїми закономірностями деформаційних процесів, що визначаються мікроструктурою сталеві матриці, деформаційною здатністю включень, когезивною міцністю міжфазних межі включення-матриця. При цьому сталева матриця несе основне навантаження, а частинки включень перешкоджають руху дислокацій та дисклінацій незалежно від рівня їхньої пластичності.

Дослідження деформаційної поведінки сталей з неметалевими включеннями з погляду фізичної мезомеханіки структурно-неоднорідних середовищ показало активну роль включень та міжфазних межі включення-матриця у розвитку локалізації деформації та формуванні фрагментованої мезоструктури за різних умов навантаження. Встановлено, що основними процесами і факторами, що визначають характер локалізації деформації поблизу включень, є далекодіючі поля напружень поблизу включень, поява моментних напружень, рівень пластичності неметалевих включень, формування мезосмуг локалізованої деформації поблизу включень, розвиток низькотемпературного та високотемпературного просковзування уздовж межі включення-матриця, що характеризує рівень пластичності цих межі.

УДК621.774.35

## ПРО ПРИЧИНИ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ У КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЯХ

С. І. Губенко<sup>1, 2</sup> д.т.н., Е. В. Парусов<sup>1</sup> д. т. н., І. М. Чуйко<sup>1</sup> к.т.н.

<sup>1</sup>Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

<sup>2</sup>Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро



Досліджено розвиток порожнин навколо крихких неметалевих включень і крихке розтріскування включень у сталях. Однією з можливих причин такої поведінки включень є різноманітність матеріалів сталеві матриці та включень. Критичні параметри мікротріщиноутворення залежать від температури. Визначено критичні параметри порожнин і крихких тріщин та стадії розвитку мікроруйнувань за температур 25–1250 °С.

Неметалеві включення є природним структурними складовими сталей. Досліджено сталі з різними неметалевими включеннями після багаторазової гарячої та холодної пластичної деформації. Зразки піддавали навантаженню у вакуумі за температур 25–1250 °С і досліджували мікротріщини після певних деформацій при кожній заданій температурі.

Відмінності пружних і пластичних властивостей фаз із наявністю включень призводять до появи концентрацій напружень на границі розділу матриця-включення. Тип включень впливає на механізм утворення мікротріщин. Порожнини утворюються навколо включень, які погано змочуються рідкою сталлю: оксиди, шпінелі, деякі силікати та сульфідні. Критичні параметри утворення порожнин залежать від температури і визначаються ступенем пластичності сталеві матриці. За підвищенням температури також зростають критичні розміри включень і ступінь критичної деформації, але зменшується інтервал ступеня деформації, в якому включення контролюють процес руйнування сталі та швидкість росту порожнин.

Біля неметалевих включень – нітридів і оксидів титану, деяких силікатів та сульфідів пустоти не утворюються. Ці включення є крихкими, також вони добре змочуються рідкою сталлю. Критичні параметри тріщиноутворення залежать від температури. За підвищення температури критичні розміри включень і ступінь критичної деформації також збільшуються, але зменшується інтервал ступеня деформації, в якому включення контролюють процес руйнування сталі. Швидкість зростання крихких тріщин у включенні більша, ніж швидкість росту порожнин (в'язких тріщин) при усіх температурах, але інші параметри залежать від типу включень.

Відмінності в механізмі утворення мікротріщин пов'язані зі структурою границі включення-матриця, змочуванням включень рідким металом і зв'язком між модулем зсуву включення, матриці та границі включення-матриця.

УДК 621.74.02:669.01

## **ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ РОЗПЛАВІВ КАРБІДОМ КРЕМНІЮ ПРИ ВИПЛАВЦІ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ**

**Є.О. Заболотських асп., І.В. Дерев'янка к.т.н., О.В. Жаданос к.т.н.**

**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

Високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧКГ) використовується у багатьох галузях промисловості, все більше замінюючи вироби з литої або кованої сталі, а також сірого і ковкого чавуну [1]. Особливістю високоміцного чавуну є куляста форма включень графіту, відносно рівномірно розосередженого в структурі.

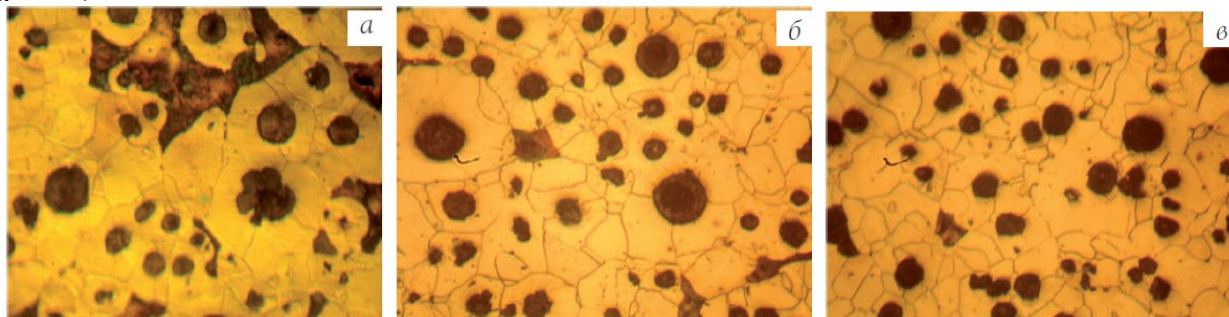
Кафедрою електрометалургії розроблена технологія виплавки залізовуглецевих сплавів різного функціонального призначення з використанням в шихті карбиду кремнію [2-5], що дозволяє не лише легувати розплав кремнієм і вуглецем але і задавати певний модифікуючий ефект.

Технологія дозволяє виплавляти в індукційних печах залізовуглецеві сплави різного функціонального призначення.

В ході проведення серії дослідно-промислових плавок на середньо частотних печах (INDUCTOTHERM) і печах промислової частоти (компанія-виробник ВВС) було відзначено, що дослідні плавки проходили відповідно до науково-технічної документації підприємств.

Хімічний склад і структура отриманого металу відповідає заданим технічним показникам, ТУ і ДСТУ.

Металографічний аналіз металу дослідних плавок показав, що структура металу у відливках, що містять 3,6-3,9%, С і 2,4-2,6% Si представлена ферито-перлітною П6(Ф94) структурою з дрібнодисперсними рівномірно розподіленими включеннями графіту з розмірами і формою зерна, що відповідає показникам ШГд 15,25 і ШГф 4,5, що підтверджує вплив карбіду кремнію (SiC) на утворення в чавуні дрібнодисперсного графіту, схильного до глобуляризації (рис. 1).



Плавки: *a* - порівняльна, *б*, *в* - дослідні

Рисунок 1 – Мікроструктура чавуну з кулястим графітом

Механічні властивості отриманих відливок відповідають вимогам ДСТУ.

Використання при виплавці чавунів вуглецькарбідокремнієвих матеріалів дозволяє отримувати відливки по структурі і механічним властивостям, що не поступаються зарубіжним аналогам [6].

#### Література

1. Лякишев Н.П. Чугун с шаровидным графитом уникальный конструкционный материал для изделий ответственного назначения / Н.П. Лякишев, Н.И. Бех, Н.Н. Александров // Литейное производство.- 2002.- №10.- С. 6-7.
2. Пат. України. 47979 МКИ 7 С21 С5/00. Шихта для виплавки сталі //М.І. Гасик, В.В. Сербин, О.О. Дерюгін, І.В. Деревянко та інш., опубл. 15.07.02., Бюл. № 7.
3. Пат. України. 40175 МКИ 7 С22 С33/06, 35/00, С21В3/02. Брикет для виробництва синтетичного чавуну (його варіанти) // М.І. Гасик., А.М. Овчарук, Г.О. Білай, І.В. Деревянко та інш., опубл. 16.07.01., Бюл. № 6.
4. Выплавка стали в дуговых печах машиностроительного комплекса с заменой чугуна углеродкарбидкремниевыми брикетами / М.И. Гасик, А.Н. Овчарук, И.В. Деревянко, А.Д. Подольчук, А.В. Новиков, Н.Ф. Гимадеев, О.Н. Рахматулина, Н.П. Рябинкин // Электromеталлургия. – 2006. - №9. С. 2 – 14.
5. Деревянко И.В. Кинетическая модель взаимодействия карбида кремния с железоуглеродистым расплавом / И.В. Деревянко, А.В. Жаданос, М.И. Гасик // Metallurgicheskaya и горнорудная промышленность. – 2006. – № 3. – С.30-32.
6. Karl Immekus. Kosteneinsparungen beim Einsatz von SiC Formlingen im Kupolofen unter Einbeziehung des Einflusses auf die Eisengualitat / Immekus Karl // Giesserei-Erfahrungsaustausch-1992.- 36, №2. С. 51-54, 57-60, 65.

УДК 620.22: 691.73: 669.046.516

### ОПТИМІЗАЦІЯ ПРИПУСТИМОЇ КІЛЬКОСТІ ДОМШОК В АНТИФРИКЦІЙНІЙ БРОНЗИ БрОЗАЗ

Т.В. Кімстач<sup>1,2</sup> ст. викл., С.І. Реп'ях<sup>1</sup> д.т.н., проф, К.І. Узлов<sup>1</sup> д.т.н, проф,  
Р.В. Усенко<sup>1</sup> к.т.н, доц.

<sup>1</sup>Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро

<sup>2</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Наведені результати дослідження впливу домішок кремнію, заліза, цинку та свинцю на механічні властивості ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ , КСУ) бронзи БрО3А3 в литому стані та встановлено припустимі їх концентрації.

Вплив домішок на механічні властивості оцінювали за експериментальними даними, припускаючи, що в межах масового вмісту кожної з домішок з 0 до 0,6% за масою такі залежності мають лінійний характер і, отже, можуть бути описані рівнянням лінійного типу наступного виду :

$$y_i = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 + A_4 \cdot x_4 + A_5 \cdot x_5 + A_6 \cdot x_6 + A_7 \cdot x_7, \quad (1)$$

де  $A_1 \dots A_7$  - коефіцієнти регресії;  $x_1 \dots x_7$  - масова частка компонента бронзи (Cu, Al, Sn, Pb, Zn, Si, Fe), %.

Оцінкою ступеня впливу кожної з домішок на механічні властивості бронзи були величини коефіцієнтів регресії у рівнянні (1), які розраховували внаслідок вирішення системи відповідних лінійних рівнянь методом Крамера.

За результатами досліджень встановлено, що вміст кремнію та заліза в досліджуваній бронзі, з 3-4% Al і Sn (кожного) слід обмежити 0,2 % (мас.) кожного. В той же час свинець та цинк у будь якій кількості неприпустимі.

Негативний вплив домішок на механічні властивості досліджуваної бронзи БрО3А3, вочевидь, пояснюється підвищенням ступеню легованості  $\alpha$ -Cu твердого розчину та збільшенням частки хімічного з'єднання  $\beta$ -Cu<sub>5</sub>Sn у якості її другої структурної складової за наявності вказаних вище домішкових елементів у складі бронзи.

УДК 621.771.23 : 669.1.017

## ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМ ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

Т.В. Кімстач м.н.с., О.А.Сафронова м.н.с

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Проблема отримання якісного товстолистого прокату високої (30-40 мм) та надвисокої (100-200 мм) товщини диктує особливий підхід до його виготовлення, а якість прокату визначається економічними та технічними можливостями виробництва.

Основним шляхом підвищення службових властивостей товстолистого прокату для виготовлення металовиробів відповідального призначення є створення високоміцних сталей, що мають вищі характеристики міцності при збереженні достатнього рівня пластичності і в'язкості порівняно з існуючими сталями серійного виробництва.

На підставі аналітичних досліджень встановлено, що для виготовлення листів товщиною більше 40 мм вітчизняні виробники використовують зварювані поліпшувачі високоміцні леговані сталі, що містять до 0,38 мас.% вуглецю. Обмеження за вмістом вуглецю пов'язане з необхідністю забезпечення задовільної зварюваності. Основними легуючими елементами даних сталей є марганець, хром, нікель, молібден та кремній.

Для отримання високих характеристик пластичності і достатнього запасу в'язкості матеріалу листи, зазвичай, піддаються гартуванню з високим відпуском. При цьому рівень характеристик міцності ( $\sigma_B$  - тимчасовий опір руйнуванню при розтягуванні) знаходиться, як

правило, в межах 850-1100 МПа. Разом з тим, значення тимчасового опору руйнуванню металу листового прокату для металовиробів відповідального призначення закордонних виробників досягає 1200 МПа і вище, в залежності від товщини листа, при достатньо високих значеннях показників плинності та ударної в'язкості.

Перспективним напрямом отримання високого комплексу міцності та в'язкості конструкційних сталей є формування структури дрібнодисперсного бейнітного фериту без виділення карбідів цементитного типу у поєднанні зі стабільним залишковим аустенітом [1-3]. Формування такої структури досягається завдяки комплексному легуванню сталі певними хімічними елементами, які дозволяють практично повністю пригнічити утворення карбідів у бейнітному фериті (кремній, алюміній, кобальт, нікель) [2,4,5], та/або відповідної термічної обробки.

Таким чином, дослідження, що направлені на розробку технологічних засад отримання високоміцного листового прокату з економнолегованої сталі для виготовлення металовиробів відповідального призначення є перспективними та актуальними.

Список посилань:

1. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2004, №. 8, pp. 251-257.

2. Kaletin Iu.M., Ryzhkov A.G., Kaletin A.Iu. Vliianie kremniia i aliuminiia na svoistva konstruktsionnykh khromonikelevykh stali s beinitnoi strukturoi [Influence of silicon and aluminum on the structural properties of chromium-nickel steels with bainitic]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii*, 1989, no. 6, pp. 96-99.

3. Georgiev M.N., Kaletin A.Iu., Simonov Iu.N., Schastlivtsev V.M. Vliianie stabil'nosti ostatochnogo austenita na treshchinostoikost' konstruktsionnoi stali [Influence of retained austenite stability at fracture of structural steel]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1990, no. 1, pp. 113-121.

4. Kaletin Iu.M., Ryzhkov A.G., Kaletin A.Iu. Legirovanie i termicheskaia obrabotka stali s beinitnoi strukturoi [The alloying and heat treatment of steels with bainitic]. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov*, 1987, no. 10, pp. 13-16.

5. Navarro-Lopez A., Sietsma J., Santofimia M.J. Effect of prior athermal martensite on the isothermal transformation kinetics below Ms in a low-C High-Si steel. *Metallurgical and materials transactions*, 2016, vol. 47A, pp. 1028-1039.

УДК 669.13.017:620.18

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ЛЕГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА СТРУКТУРНИМИ СКЛАДОВИМИНОВИХ ХРОМОМАРГАНЦЕВИХ СПЛАВІВ У ЛИТОМУ СТАНІ

**М. А. Ковзель к.т.н., О. І. Бабаченко д.т.н., Е. В. Парусов д.т.н., О. В. Парусов к.т.н.,  
Е. В. Олійник, аспірант**

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

Під час дослідження впливу хімічного складу на формування структури та властивостей нових економнолегованих сплавів (С = 2,2–3,1 % С, 5,7–15,8 % Мn, 12,6–15,9 % Cr, 0,83–1,15 % Ni, ≤ 0,25 % V) встановлено, що їхня кристалізація починається із виділення дендритів первинного аустеніту та завершується утворенням евтектичних колоній аустеніту та карбідів. За даними рентгеноструктурного аналізу у структурі дослідних сплавів виявлено карбіди типу  $Me_7C_3$ -(Cr, Mn, Fe) $_7C_3$ , цементит, аустеніт та  $\alpha$ -фазу. Кількість аустеніту в матриці дослідних сплавів зростає від 87 % до 94 % із збільшенням вмісту вуглецю, марганцю та легувальних елементів. Разом із збільшенням кількості аустеніту зростає й мікротвердість дослідних сплавів, що може бути обумовлено процесами ліквідації, які відбуваються під час кристалізації й остаточного охолодження дослідних сплавів.

Розподіл легувальних елементів у литій структурі дослідних сплавів визначали за допомогою локального рентгеноспектрального аналізуза точками, в яких визначили вміст

основних (С, Мп, Si), легувальних (Cr, Ni, V) та домішкових (Cu) елементів матриці, а також евтектичних карбідів.

Визначено мінімальні ( $k_{min}$ ) та максимальні ( $k_{max}$ ) коефіцієнти ліквідації (відношення мінімального та максимального вмісту елемента до його середнього значення у відповідній структурній складовій). Встановлено, що в структурі дослідних сплавів спостерігаються ділянки, як за від'ємною, так і позитивною ліквідацією основних, легувальних та домішкових хімічних елементів. При цьому найбільші значення коефіцієнтів позитивної ліквідації зафіксовані для нікелю, ванадію та міді.

Результати аналізу розподілу хімічних елементів між структурними складовими дослідних сплавів у литому стані свідчать про те, що з підвищенням вмісту вуглецю, хрому і марганцю ступінь легованості металевої матриці та евтектичних карбідів зростає, що забезпечує підвищення їхньої мікротвердості, загальної твердості матеріалу й відповідно його зносостійкості. Зокрема останнє підтверджено випробуваннями на зношування тертя поверхні дослідних зразків хромомарганцевих сплавів за температури 950 °С при навантаженні 500 Н.

УДК 621.771.23.09

## **ДРЕСИРУВАННЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ХОЛОДНОЇ ШТАМПОВКИ**

**М.А. Ковзель к.т.н.**

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

**Т.В. Котова к.т.н., Т.А. Аюпова к.т.н., Ю.О. Кушнір**

**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

Досліджено зразки дресированих гарячекатаних штаб із сталей 08кп, 08ЮА, які призначені для холодної штамповки. Встановлено, що зі збільшенням обтискування при дресированні в лінії безперервного травильного агрегату пластичність гарячекатаного металу із киплячої сталі знижується. Визначено, що за допомогою оптимально підібраної технології обробки гарячекатаної товстолистової сталі можна мінімізувати погіршення механічних властивостей та знизити несприятливий вплив процесу старіння. З метою підвищення пластичності гарячекатаних штаб та отримання якісної листової сталі, призначеної для холодної штамповки, доцільно здійснити вибір параметрів дресировання із врахуванням складу сталі, стану поверхні прокатних валків, швидкості дресировання, температури штаби та інших факторів.

Аналіз механічних властивостей показав, що у стабілізованій алюмінієм сталі нерівномірність пластичної деформації нижче, ніж у киплячій. Крім цього, розкислена алюмінієм сталь, в зрівнянні з киплячою, характеризується більш сприятливим для штамповки відношенням  $\sigma_T / \sigma_B$ . Фрактографічний аналіз підтверджує кращий рівень в'язкості дресированого гарячекатаного металу: в'язкий і змішаний вид зламу спостерігається у сталі 08ЮА на 80-85% розглянутих ділянок, а у сталі 08 кп – тільки на 35-45% ділянок. Таким чином, характер зламів гарячекатаної листової сталі 08ЮА є гарантією службової надійності при експлуатації виготовлених з неї деталей.

УДК 621.771.23.09

## **ВПЛИВ ДРЕСИРУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКОГО ЛИСТА**

**М.А. Ковзель к.т.н.**

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

**Т.В. Котова к.т.н., Т.А. Аюпова к.т.н., Ю.О.Кушнір**

**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

Досліджено вплив дресировання на механічні властивості і структуру попередньо термооброблених гарячекатаних травлених в безперервному травильному агрегаті рулонних штаб товщиною 2,0 мм із сталі 08пс. В ковпакових печах рулони тонколистової сталі піддавали світлому відпалу при температурі 680–710°C, час нагріву 40–48 год, час охолодження 60-75 год. Дресировали відпалені в ковпакових печах рулонні штаби на окремо розташованому дресировальному стані з обтискуванням 1,5 %.

Встановлено, що термообробка в ковпакових печах суттєво підвищує пластичність гарячекатаної тонколистової сталі. Результати мікроструктурних досліджень показали, що в тонколистовому прокаті утворюється рівномірна по перерізу штаби структура із зерном фериту 25-30 мкм відповідно до ДСТУ 2834-94. Механічні властивості дресированих травлених штаб повністю відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 групи міцності К270В не тільки для гарячекатаного, але і для холоднокатаного прокату:  $\sigma_b = 340$  МПа,  $\sigma_T = 215$  МПа,  $\delta = 41$  %, HRB 38.

Оскільки гарячекатаний дресирований тонколистовий прокат за показниками якості відповідає вимогам до холоднокатаного, то можлива заміна дорогокоштуючого холоднокатаного листа більш дешевим, але такої ж якості гарячекатаним. Це дозволить знизити витратний коефіцієнт металу, зекономити електроенергію та природний газ.

УДК 669.13.017:620.18

## **ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА**

**М. А. Ковзель к.т.н., Е. В. Парусов д.т.н., І. Р. Снігура к.т.н., О. В. Кукса к.т.н.**

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

Важливий внесок в економіку нашої держави становить експорт прокату та напівфабрикатів. Вимоги до показників якості прокату зростають з кожним роком, а зменшення його собівартості стає все більш актуальною проблемою. Прокатні валки, направляючі лінійки та прошивні оправки прокатних станів належать до змінного інструменту гарячого деформування, експлуатаційні характеристики якого впливають на продуктивність технологічного процесу, якість товарної продукції та її собівартість.

У залежності від умов експлуатації, прокатні валки передчистових та чистових клітей виготовляють з легованих чавунів типу ИЧХ16НМФТ, 280Х19ГНМ, 300Х21ГНМ, а прошивні

оправки з чавуну типу 300X32НЗФЛ або хромонікелевого сплаву «нікорин» (36,0–38,0 % Cr, 57,0–59,0 % Ni). В останньому випадку, прокатний інструмент характеризується значною собівартістю та незважаючи на різноманітні способи оброблення володіє недостатньою експлуатаційною стійкістю, яка складає десятки годин відпрацювання.

Сучасні тенденції отримання зносостійких матеріалів замість високохромистих чавунів свідчать на користь застосування хромомарганцевих сплавів, які додатково містять мідь, титан, алюміній. У зв'язку з цим, хромомарганцеві сплави обрано в якості базового матеріалу, що повинно обумовити зниження собівартості виготовлення зносостійких виробів за рахунок зменшення вмісту хрому, нікелю та ванадію у порівнянні із чавуном 300X32НЗФЛ та сплавом типу «нікорин» (36,0–38,0 % Cr, 57,0–59,0 % Ni).

Досліджено поелементний вплив на формування комплексу властивостей чавунів у литому стані для вибірки статистичних даних, до якої увійшли 77 відомих складів литих чавунів та три дослідні сплави. На засадах теорії спрямованого хімічного зв'язку та комп'ютерної програми «Метал» виявлено неоднозначний вплив вуглецю, хрому, кремнію, ванадію та міді на формування твердості, границі міцності та ударної в'язкості чавунів у литому стані. Показано, що у якості найбільш інформативних показників прогнозування комплексу механічних властивостей чавунів слід застосовувати параметри  $\rho_l$  (зарядова щільність) та  $tga$  (градієнт зміни радіуса іона від його заряду), які враховують загальний вплив хімічного складу сплавів.

За результатами проведеного моделювання встановлено раціональні композиції хімічного складу хромомарганцевих сплавів на основі заліза у наступних діапазонах: C = 2,6–3,0 %; Cr = 10,0–20,0 %; Mn = 10,0–15,0 %; Ni = 0,5–1,7 %; Si  $\leq$  1,3 %; V  $\leq$  0,3 %; Cu  $\leq$  0,3.

При необхідності, в якості додаткового резерву підвищення механічних властивостей хромомарганцевих сплавів на основі заліза, ефективним виявляється застосування молібдену (0,95–1,2 %), барію ( $\leq$  0,01 %) або титану ( $\leq$  0,02 %). При цьому ефективність застосування Ca в якості модифікуючого елемента впливає на морфологію неметалевих включень й обумовлює ефективність його застосування при одночасному введенні Ba, оскільки просліджується їхній синергетичний вплив на якість сплаву.

УДК669.017 :669.14.018.294.2

## ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СУЧАСНИХ РЕЙКОВИХ СТАЛЕЙ

д.т.н. Кононенко Г.А., д.т.н. Меркулов О.Є., Подольський Р.В. Сафронова О.А.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Виходячи з досліджень останніх років відомо, що міцність перлітних рейкових сталей досягла межі. Крім того, збільшення вмісту вуглецю може негативно вплинути на ударну в'язкість та зварюваність матеріалів рейок. Наприклад, у порівнянні з доевтектоїдною рейкою R200 подовження заевтектоїдної рейки R400HT знижується на 6% (в абсолютних значеннях). Отже, існує гостра потреба в інших альтернативних матеріалах. Бейнітна сталь, що забезпечує як високу міцність, так і відмінну пластичність, вважається одним з найбільш перспективних матеріалів.

Низьковуглецеві бейнітні сталі відрізняються від звичайних перлітних тим, що в них мало карбідів, якщо вони взагалі є. Бейнітні низьковуглецеві сталі, міцність яких більше 1200 МПа при цьому володіють високим рівнем ударної в'язкості, трибологічними властивостями, сприятливою реакцією на великі швидкості деформації, стійкістю до втоми і відносно дешеві у виробництві. Такий комплекс властивостей досягається за рахунок дуже дрібної і сильно зміцненої рейкової мікроструктури.

Як відомо, в ході бейнітного перетворення формування пакету бейнітних рейок відбувається на гранці аустенітного зерна і подальше зростання пакета відбувається вглиб

зерна. Пакет бейніту складається з рейок фериту, розділених в основному малокутовими границями, в той час як голчастий ферит гетерогенно зароджується на неметалевих включеннях всередині аустенітного зерна і росте в різних напрямках, не утворюючи виражених пакетів, в іншому ж залишаючись подібним з бейнітом.

Встановлено, що найбільш ефективним способом підвищення твердості сталей є управління їх хімічним складом шляхом легування, мікролегування і зменшення кількості шкідливих домішок. Перспективним є підхід до підвищення опору шляхом виготовлення залізничних рейок з бейнітною структурою.

УДК 621.791.92

## **СПАДКОВІСТЬ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВІЙ НАПЛАВЦІ ВИТРАТНИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

**Ю.М. Кусков д.т.н., Ф.К. Біктагіров д.т.н., А.П. Ігнатов к.т.н.,  
А.В. Нетяга інж.**

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

Одним із видів електрошлакових технологій, який досить успішно застосовується в ряді галузей промисловості, є електрошлаковенаплавлення. Найбільшого поширення набула схема з надходженням металу, що наплавляється, від витратногометалевого електрода, який плавиться в шлаці, аналогічно тому, як це відбувається при класичному електрошлаковому переплаві (ЕШП).

Добре відомо, що властивості одержуваного при ЕШПметалу крім технологічних параметрів процесу в тому числі складу флюсу, швидкості плавки, температури шлакової ванни та ін. залежать і від якості електрода, що переплавляється. Чим чистіший за вмістом небажаних домішок і неметалевих включень, більш однорідний і бездефектний матеріал, що піддається переплаву, тим вище якість металу ЕШП.

При електрошлаковому наплавленні через порівняно невеликийоб'єм металу, що наплавляється, і досить швидке його затвердіння крім хімічного складу й чистоти на властивості наплавленого шару може впливати і вихідна структура металу електрода.

Для підтвердження цього фактору були проведені експерименти за наступною методикою. У кристалізаторі діаметром 120 мм з використанням флюсу АНФ-6-1 переплавляли електроди зі сталі Х12МФ двох видів – катані діаметром 70 мм та такого ж діаметра литі. Останні отримували шляхом плавлення в індукційній печі частини тих же катаних заготовок та заливання рідкого металу в металеву форму відповідного діаметра. Товщина наплавленого на сталеву підкладку металу становила 40-50 мм.

Із наплавлених злитків на відстані 10 мм від бічної поверхні та з центральної зони відбиралися зразки для металографічних досліджень. З електродів, що переплавляються, зразки для досліджень відбиралися на відстані  $\frac{1}{2}$  їх радіусу. Як спадкову ознаку було прийнято середній розмір зерен (осередків) структури вихідного металу та переплавленого. Металографічні дослідження виконували на мікроскопі Neophot-32, структуру оцінювали критерієм середнього розміру осередків.

Згідно металографічного аналізу структура металу, яка пройшла обробку тиском, має приблизно в 2 рази менший розмір зерна у порівнянні з литим металом (середній діаметр осередків 40-50 мкм і 90-100 мкм відповідно). Метал, наплавлений з використанням катаного електрода біля бокової поверхні має розмір осередків 50-60 мкм, а в центрі 90-100 мкм. При перепаві литого електрода поблизу бокової поверхні наплавленого шару формується структура з розміром зерна 80-100 мкм, а в центральній зоні – 120-150 мм. Тобто у першому випадку структура одержуваного при наплавленні металу в 1,5-2,0 рази більш дисперсна ніж у другому.



Отримані результати показують можливість передачі при електрошлаковому наплавленні структурних ознак від металу, що переплавляється, до наплавленого металу. Виходячи з цього можна вважати, що для підвищення експлуатаційних властивостей наплавлених зі сталі Х12МФ виробів бажано використання кованих витратних електродів, замість литих.

УДК 621.9.048

## **ОТРИМАННЯ БОРОВМІСНИХ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ ТА ПОКРИТТІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

**О.М. Мисливченко к.т.н., Р.В. Литвин к.т.н., А.А. Бондар д.х.н., О.Б. Згалат-Лозинський д.т.н.**

**Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ**

Такі бориди перехідних металів як  $TiB_2$ ,  $TaB_2$ ,  $NbB_2$ , завдяки свої особливим фізичним і хімічним властивостям, високій температурі плавлення (більше 3 000 °С), жароміцністю та твердістю відомі людству як надвисокотемпературна кераміка. Тому створення композитів та покриттів на основі цих металів є актуальною задачею.

В даній роботі наведено результати по отриманню і дослідженню високоентропійного сплаву  $VNb_2TaCrMoWTi_{0.3}B_{0.6}$  та покриттів на його основі. Сплав отримували методом дугового переплаву, використовуючи як вихідні компоненти метали чистотою більше за 99,5 атомних відсотків та порошок  $TiB_2$ . Плавлення проводили невитратним вольфрамовим електродом на мідній водоохолоджувальній подині. Плавку проводили в два етапи спочатку виплавлялися елементи метали, потім злиток розбивався на шматки до яких додавався  $TiB_2$  і здійснювався повторний переплав.

Рентгеноструктурний аналіз показав що литий сплав  $VNb_2TaCrMoWTi_{0.3}B_{0.6}$  складається з твердого розчину на основі фази з ОЦК-структурою та бориду зі структурою типу  $W_2CoB_2$  в якому позиції вольфраму переважно займають атоми з великим атомним радіусом (Nb, Ta, Mo, W), а позиції кобальту з малим (V, Cr). Вивчення морфології бориду за допомогою електронної мікроскопії показало що він кристалізується евтектично та з останніх порцій розплаву утворюючи при цьому замкнену сітку в матриці з твердого розчину. Згідно даних локального хімічного аналізу борид збагачений ванадієм, танталом та хромом, твердий розчин молібденом та вольфрамом.

З отриманих злитків виготовлено електроди та нанесено електроіскрові покриття з варіюванням енергії електричних розрядів. Режим осадження з більшою енергією одиничних імпульсів (1,1 Дж) забезпечує більший масоперенос матеріалу електроду на підкладку. Приріст маси катоду спостерігається при тривалості процесу осадження до 7-8 хв. При подальшій обробці маса покриття залишається незмінною, а для режиму 0,52 Дж навіть зменшується. Це пов'язано з накопиченням дефектів і напружень у нанесеному шарі та його руйнуванням під дією іскрових імпульсів. Зміна енергії розряду при нанесенні покриття не впливає на твердість (10 ГПа) проте призводить до збільшення товщини від 11-15 до 16-20 мкм для енергій 0,52 і 1,10 Дж відповідно.

Досліджено мікроструктуру та морфологію отриманих покриттів. Звертає на себе увагу той факт що внаслідок перемішування металу основи з електродом в покриття потрапляє залізо. Вміст заліза максимальний біля підкладки і мінімальний на поверхні. Згідно отриманих мікроструктур на межі розділу покриття-підкладка не спостерігається дефектів та перехідного шару. Мікроструктура покриття є однорідною (однофазною) і не схожою на мікроструктуру електроду з якого наносилося покриття. Згідно даних рентгеноструктурного аналізу отримані покриття не є однофазним і в ньому утворюється інтерметалід типу  $Fe_7W_6$  ( $a=0,4960$ ,  $c=2,5901$  нм) та ОЦК твердий розчин період якого складає  $a=0,3030$  нм. Також в наслідок відсутності захисної атмосфери при нанесенні покриттів утворюється оксид типу  $TaO_2$  ( $a=0,4709$ ,  $c=0,3065$  нм). Ці три фазові складові є ультрадисперсними та рівномірно розподіленими в перерізі покриття тому і не проявляються на мікроструктурі. Енергія розряду, при якій відбувалося

нанесення, якісно не впливає на фазовий склад отримуваних покриттів, проте зі збільшенням енергії розряду прослідковується збільшення кількості оксиду.

УДК 620.194.22

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОГО РОЗТРИСКУВАННЯ ТА КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ТРИВАЛОЕКСПЛУАТОВАНОЇ ТРУБНОЇ СТАЛІ Х70

Л.І. Ниркова, д.т.н., С.О. Осадчук, к.т.н., Ю.О. Харченко, аспірант

Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, м. Київ

Проведено порівняльні дослідження корозійного розтріскування основного металу труб зі сталі категорії міцності Х70 – нової та після експлуатації упродовж 20 та 40 років. Звичайно, порівнювати такі труби можна з певною часткою умовності, оскільки сталеві листи, з яких всі вони виготовлені, належать до різних партій та, цілком імовірно, виготовлені різними виробниками, технології яких мають деякі особливості. Але хімічний склад сталей відповідає нормативним документам, виготовлені вони за технологією контрольованої прокатки, мають феритно-перлітну мікроструктуру та відносяться до категорії міцності Х70. Труби виготовлені в Україні за однаковою технологією, їх діаметр 1420 мм, товщина стінки 15,7 мм, застосовані для будівництва магістрального газопроводу підземного прокладання в районі з помірним кліматом. Для захисту від підземної корозії застосовано комплексний протикорозійний захист: пасивний – стрічковим полімерним покритвом та активний – електрохімічний захист.

Мета досліджень – оцінити електрохімічні та корозійно-механічні властивості основного металу труб після впливу експлуатаційних чинників та встановити тенденції до їх зміни.

Визначені показники механічних властивостей (границя міцності  $\sigma_b$ , границя плинності  $\sigma_{0,2}$ , відносне подовження  $\delta_5$  та ударна в'язкість  $KCV^{-15}$  та  $KCU^{-60}$ ), експлуатованих та неексплуатованої труб відповідають вимогам СНиП 2.05.06. Потенціал корозії нової труби -0,71 В, а потенціали корозії експлуатованих упродовж 20 та 40 років труб зміщені до позитивніших значень до -0,624 В та -0,692 В порівняно з новою. Потенціал відновлення водню на металі нової труби -1,07 В. Потенціал відновлення водню експлуатованих упродовж 20 та 40 років труб зміщені до позитивніших значень на 0,11 (до -0,96 В) та 0,17 В (до -0,90 В) порівняно з новою. Граничний дифузійний струм, за значеннями якого можна порівняти швидкість корозії сталей становить для нової труби  $1,82 \cdot 10^{-4}$ , для експлуатованих 20 та 40 років труб –  $1,82 \cdot 10^{-4}$ , та  $2,0 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>, відповідно.

Тобто за електрохімічними властивостями встановлена тенденція до зниження (за абсолютним значенням) потенціалу корозії та потенціалу відновлення водню; швидкість корозії всіх досліджених труб практично однакова.

Схильність до корозійного розтріскування досліджували за мінімального -0,75 В та максимального -1,05 В захисних потенціалів та оцінювали за коефіцієнтом  $K_S$  (який обчислювали, як відношення відносного звуження зразків у повітрі  $\psi_p$  до відносного звуження у розчині  $\psi_r$ ). Встановлено, що у ряду: нова труба → експлуатована 20 років труба → експлуатована 40 років труба за мінімального потенціалу -0,75 В значення  $K_S$  змінюються так 1,57 → 1,03 → 1,95; при збільшенні захисного потенціалу до -1,05 В – 1,53 → 1,6 → 2,44. Отже за мінімального захисного потенціалу для експлуатованих труб  $K_S$  змінюється не монотонно, відмічене деяке зниження схильності до корозійного розтріскування за мінімального захисного потенціалу. За потенціалу -1,05 В – простежується стійка тенденція до підвищення схильності до крихкого руйнування обох експлуатованих труб, яка зростає суттєвіше із збільшенням строку експлуатації газопроводу.

Таким чином, тривала експлуатація підземного газопроводу не спричинила зміни механічних показників основного металу труб, але сприяла зростанню схильності до корозійного розтріскування за максимального захисного потенціалу. Імовірно, що вплив

внутрішніх мікропошкоджень, які накопичуються при тривалій експлуатації газопроводу, впливають саме на корозійно-механічну тривкість сталі.

УДК 669.017.03

## **ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ І ФАЗОВИЙ СКЛАД ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ**

**Погребна Н.Е. проф., к.т.н., Гребенєва А.В. доц., к.т.н.**

**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

Відомо, що властивості чавунних виливків можуть бути покращені за рахунок термічної обробки на бейніт у твердому стані.

В роботі вивчено структуру, фазовий склад, твердість, мікротвердість структурних складових термооброблених зразків високохромистого чавуну 28X32H3Ф.

З аналізу мікроструктури зразків термообробленого чавуну видно, що відбувається укрупнення вторинних надлишкових карбідів, залишковий аустеніт зазнає розпаду на ферит, карбід хрому Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> та цементит Fe<sub>3</sub>C. Найбільшою дисперсністю характеризується структура чавуну після термічної обробки при Тауст=1050°C і тауст=1год, Тізот=350°C (тізот=3год).

Рентгеноструктурний аналіз дозволив виявити у всіх зразках аустеніт та ферит, кількість яких змінюється згідно з режимами термічної обробки, надлишковий карбід Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> і цементит Fe<sub>3</sub>C.

Провівши порівняльний аналіз досліджуваних сплавів можна зробити висновок, що найкращими властивостями досліджуваній сплав має після термічної обробки при Тауст=1050°C і тауст=1год, Тізот=350°C (тізот=3год).

УДК 669.01

## **ВПЛИВ ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ПАРАМЕТРИ ЗЕРНА АУСТЕНІТУ**

**Погребна Н.Е. проф., к.т.н., Гребенєва А.В. доц., к.т.н.**

**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

Відомо, що технологічна пластичність та здатність до деформації конструкційних сталей залежить від розміру аустенітного зерна. В роботі досліджували температурні залежності інтенсивного росту зерна аустеніту сталі ВСт3сп. На поріг інтенсивного росту зерна значний вплив чинить вихідний стан металу у сталях перед прокаткою. Для оцінки розміру зерна аустеніту сталі ВСт3сп використовували загартувальний метод: зразки нагрівали до різних температур в аустенітну область з витримкою 2 хв/мм (850-1250°C через 25°C) та загартували у воді. Використання такого методу дозволило отримати, в зразках 20x20x20 мм, виділення по границях колишніх аустенітних зерен сіток надлишкового нерівновісного фериту. Сталь ВСт3сп схильна до ступінчастого росту аустенітного зерна під час перевищення певних критичних температур внаслідок протікання збиральної кристалізації, яка супроводжується появою суттєвої різнозернистості.

Ступінчастий ріст аустенітного зерна в сталі ВСт3сп до температур 900-950°C обумовлений затримуючим впливом комплексу часток, включаючи нестійкі сульфіди та силікати. Отже, слід вважати, що по мірі розчинення часток проміжних фаз зростає

міжчасткова відстань, що збільшує виригідність та можливість їх огинання границями аустенітних зерен, які переміщуються при досить невисоких значеннях енергії активації (при високих температурах) веде до інтенсивного ступінчастого росту аустенітного зерна. З підвищенням температури і дисоціацією термічно нестійких сульфідів і силікатів по границях аустенітного зерна обумовлює відтискання вуглецю з приграничних ділянок в середину об'ємів аустеніту, внаслідок чого, по границях загартованих зразків виділяється надлишковий ферит.

Немонотонна температурна залежність росту зерна аустеніту повинна обов'язково враховуватися при виборі параметрів нагріву під прокатку при проведенні деформаційно-термічного зміцнення.

УДК 621.762.5

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЗУСИЛЛЯ РУЙНУВАННЯ МІКРОПОРОШКІВ МАРКИ «КИБОР» ТА «КУБОНІТ»**

**Я.М. Романенко; М. П. Беженар, д-р техн. наук**

**Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ**

Композиційний матеріал на основі кубічного нітриду бору (сBN) – це кераміка, що містить у своїй структурі високий вміст сBN (від 45 до 100 %), а поряд з нею металічну або тугоплавку зв'язку. Полікристали з сBN(PCBN) мають високу твердість, тому їх використовують для обробки інших матеріалів методом різання. Це можуть бути сталеві вироби, жароміцні сплави на основі Ni, чи Co.

Одержати надтверді полікристали можливо за допомогою порошкової металургії (спіканням порошоків із застосуванням технологій високого тиску). Для кожної марки полікристала характерний свій сталий фазовий склад, та набір фізико-механічних властивостей, що визначаються технологією одержання PCBN композитів.

На технологію одержання матеріалів суттєво впливає вихідна сировина (порошки - їх зернистість, реальна структура, і склад шихти). Вихідні порошки мають певні технічні вимоги, які повинні відповідати стандартам виробництва. Так, наприклад, показники міцності порошоків марки «кубоніт» (КО, КР) та «кибор» (КТ) визначені для шліфпорошків (до 40 мкм), проте такі дані відсутні для мікропорошків (менше ніж 40 мкм). Причина – обмеження існуючих методик для визначення показників міцності дрібнозернистого порошку.

Відомо, що міцність компоновки залежить від певних факторів порошоків: розвинутості поверхні порошоків, пластичності, міцності руйнування зерен (різке збільшення зруйнованих зерен сприяє наростанню кількості контактних площин між частинками, і як наслідок, збільшення дії міжатомних сил).

Тому *мета роботи* розрахувати та спрогнозувати можливі показники міцності (зусилля руйнування) для мікропорошків кубічного нітриду бору марки «кубоніт» та «кибор».

Вихідні дані для розрахунку брали з шліф порошоків кубічного нітриду бору марки КТ, КР, КО (зернистість 200/160 мкм; 160/125 мкм; 125/100 мкм; 100/80 мкм; 80/63 мкм; 63/50 мкм; 50/40 мкм), та порошки дробленого кибориту (зернистість 125/100 мкм; 100/80 мкм; 80/63 мкм; 63/50 мкм; 50/40 мкм). Після обробки початкових даних функцією поліномної регресії, графічно визначено показники міцності для мікропорошків марки КТ, КР, КО наступних фракцій: 40/28 мкм; 28/20 мкм; 20/14 мкм; 14/10 мкм; 10/7 мкм; 7/5 мкм; 5/3 мкм; 3/2 мкм; 2/1 мкм; 1/0 мкм; 0,5/0 мкм; 0,25/0 мкм; та порошки дробленого кибориту тієї ж фракції.

Встановлено, що чим менше розмір зерна, тим показники міцності закономірно менші. Значення змінюються пропорційно однаково (для дробленого порошку «киборит» міцність зерен у 2-3 рази менше від інших марок). Зусилля руйнування для фракцій з розміром зерен менше ніж 1 мкм становить < 0,1 Н. Вищу міцність повинні мати зерна марки «Кибор» (КТ),

далі –«Кубоніт» (КР, КО),– і дроблений порошок «Киборит». На прикладі фракції 40/28мкм значення наступні:

- КТ – 3,3 Н;
- КР – 2,9 Н;
- КО – 1,7 Н;
- Дроблений порошок «Киборит» – 0,9 Н.

Таким чином, розраховано та спрогнозовано можливі показники міцності для мікропорошків кубічного нітриду бору марок «Кибор», та «Кубоніт». Ці дані дозволять у подальших роботах дослідити залежність початку руйнування порошоків від тиску пресування. Визначити механізми ущільненняпресовок в робочому об'ємі.

УДК 621.7.075

## ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ ТА ХІМІЧНОЇ ПРИРОДИ ДОБАВОК НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ cBN ІЗ ЗВ'ЯЗКОЮ NbN

Румянцева Ю. Ю. (Ph. D), Л. О. Романко, Д. О. Савченко, Д. В. Туркевич

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. Бакуля, Київ

**Анотація** У роботі досліджено вплив морфології (мікропорошків та мікрОВОЛОКОН) та хімічної природи добавок на електропровідність НРНТ-спечених зразків на основі cBN зі зв'язкою NbN (при  $P=7,7$  ГПа,  $T=2000$  °C). Вперше показано вплив морфології домішок на електропровідність спечених зразків. Встановлено, що спечені зразки мають напівпровідниковий характер провідності і перспективні не тільки в якості різальних матеріалів, але й для інших застосувань (наприклад, в атомній промисловості).

**Методи** Для всіх зразків (зразки системи cBN–NbN–Al без добавок та з порошками SiCw, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>w, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>w) вимірювали електричний опір в діапазоні від кімнатної температури до 400 °C. Також була виміряна залежність опору від напруги, прикладеної до зразка до і після нагрівання зразків.

**Результати та обговорення** *Вплив хімічної природи добавок на електричний опір КМ на основі cBN.* Про напівпровідниковий характер електропровідності свідчить зменшення величини електроопору при нагріванні зразків [2]. Додавання мікрОВОЛОКОН із широкозонною напівпровідниковою природою (SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) покращує електро-провідність зразків, незважаючи на меншу електропровідність цих порошоків. Залежність опору від прикладеної до зразка напруги до і після нагрівання зразків практично не залежить від температури. Цей факт свідчить про однорідність структури матеріалу досліджуваних зразків.

*Вплив морфології додатків на електропровідність* було вивчено за допомогою досліджень систем cBN–NbN–Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та cBN–NbN–Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>w. При додаванні мікропо-рошку Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> спостерігається більш значне падіння електроопору, ніж при додаванні мік-рОВОЛОКОН Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (від  $1,85\pm 0,007$  до  $0,72\pm 0,002$  та від  $1,35\pm 0,05$  до  $0,17\pm 0,006$  МОм·см – для зразків з мікрОВОЛОКОНАМИ та мікропорошками відповідно). Це може бути пов'язано з утворенням провідної фази на межі «додаток-матриця» (оскільки площа міжфазних меж значно вища при додаванні мікропорошку, ніж при додаванні мікрОВОЛОКОН), що в свою чергу веде до покращення умов проходження електричного струму через зразок.

### Висновки

Усі досліджувані зразки як за порядком абсолютного значення питомого електричного опору, так і за характером температурної залежності є напівпровідниками. Поєднання таких цікавих властивостей електропровідності з високим рівнем механічних властивостей (HV до 38 ГПа,  $K_{1c}$  – до  $7$  МПа<sup>-1/2</sup>) і хімічного опору (процеси окислення зразків починаються вище 660 °C) [2] вказують на те, що ці матеріали можуть бути перспективними в таких галузях, як ядерна

фізика та атомна промисловість (наприклад, в якості ма-теріалів для рідкокристалічних мішеней для електрон-позитронної конверсії).

### Література

1. Rossiter, PL (1991). Specific electrical resistance of metals and alloys (Vol. 6). Cambridge University Press
- Rumiantseva, Y., Melnichuk, I., Garashchenko, V., Zaporozhets, O., Turkevich, V., & Bushlya, V. (2020). Influence of cBN content, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> additives and their morphology on microstructure, properties, and wear of PCBN with NbN binder. *Ceramics International*, 46(14), 22230-22238

УДК 669.14.018.258

## ОДЕРЖАННЯ ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ 4Х3Н5М3Ф ТА 4Х4Н5М4Ф2 ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ ПЕРЕПЛАВОМ З УРАХУВАННЯМ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Сидорчук О.М.<sup>1,2</sup>, Гогасв К.О.<sup>1</sup>, Лук'янчук В.В.<sup>1</sup>

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича  
НАН України (Україна, м. Київ)

Центр досліджень і технологій ІПМНінбо (Китайська Народна Республіка, м. Нінхай)

Для виготовлення дослідно-промислової партії матриць для гарячого деформування міді марки М1 (ГОСТ 859-2014) використовували установку електрошлакового переплаву на заводі «Спецлітьє» (м. Дніпро, Україна). Отримані зливки (маса одного зливка становило 100 кг) зі сталі 4Х3Н5М3Ф. Під час виплавки електрошлакового переплаву для виготовлення дослідної сталі, було прийняте рішення використовувати лігатуру системи Fe–Ni–Mo–V–Mn і відходи штампової сталі марки 4Х5МФ1С. Лігатуру системи Fe–Ni–Mo–V–Mn виплавляли в індукційній печі і розливали в кокіль в результаті чого були отримані зливки (лігатури) масою 25 кг. Лігатуру виготовляли з урахуванням температури розплаву в печі перед випуском 1550 °С, тривалість рафінування не перевищувала 20 хв. Під час досліджень сталі 4Х3Н5М3Ф було встановлено, що рекомендований для неї режим термомеханічної обробки не є оптимальним. Твердість після повного відпалу сталі по перетину заготовки перевищує 35 HRC. Крім високої твердості матеріал має також несприятливу для механічної обробки структуру з пластинчастою карбідною складовою. На жаль проведення відпалу за температурою 860 °С не забезпечує сфероїзації карбідної складової. Відпуск сталі за температури 680 °С проводити не доцільно, оскільки при відсутності фазових перетворень не змінює структурну карбідну складову. Твердість після повного відпалу сталі по перетину заготовки перевищує 35 HRC.

Для зменшення жорсткості та полегшення механічної обробки різанням, при виготовленні матриць з штампової сталі, було запропоновано провести часткову перекристалізацію, а саме неповний відпал. Оскільки тільки в процесі часткової перекристалізації сталі утворюється сфероїдизована карбідна складова, що спричинить на поліпшення механічної обробки заготовки для виготовлення матриць штампового інструменту. Для встановлення критичних точок А<sub>1</sub> і А<sub>3</sub> штампової сталі 4Х3Н5М3Ф проводився дилатометричний аналіз. За результатами дослідження були встановлені критичні точки сталі: А<sub>1</sub> = 700 °С та А<sub>3</sub> = 850 °С, що дозволяє рекомендувати в проведенні сфероїдизуючого (неповного) відпалу за температурою нагріву 750±20 °С. Якщо провести неповний відпал легваної конструкційної сталі 4Х3Н5М3Ф, її твердість становить 33–34 HRC перлітно-сорбідної структури (α-Fe) з сфероїдизуючої карбідної складової, що дозволило з полегшенням проводити механічну обробку для виготовлення штампового інструменту. Залежно від розміру зразка (заготовки) штампової сталі 4Х3Н5М3Ф вибирається різний час ізотермічної витримки при температурі 750±20 °С. Так для заготовки типу матриці діаметром 170 мм загальна витримка повинна становити близько 5,5 годин. Заготовку отриману електрошлаковим переплавом, піддавали

термічній обробці за режимом 730–770 °С (неповний відпал). Твердість сталі становила 33–34 HRC. Після цього заготовку механічно обробляли різанням, різцями з пластинами сплаву T15K6 з метою отримання матриць штампового інструменту.

Використання технології електрошлакового переплаву при отриманні зливків, дає можливість скоротити енергоємну технологічну операцію – ковку. Експлуатаційні властивості сталі 4X5MФ1С на заводі «Спецлитель» (м. Дніпро, Україна) при гарячій пластичній деформації міді марки М1 (профіль виробу має розміри 6x102 мм) є недостатньо високими. Основними причинами низької експлуатаційної стійкості матриці і кришки утримувача пов'язано з литим станом, а саме відсутність їх пластичного деформування та відсутність оптимальних режимів термічної обробки сталі. Дослідження мікроструктури сталі 4X5MФ1С в литому стані показало її неоднорідність, наявність сітки дендритної структури і ділянок евтектики. Мікроструктура металу з матриці штампового інструменту зі сталі 4X5MФ1С складається з сорбідної структури зі значною карбідною неоднорідністю: присутність ділянок підвищеної травимості (збагачених домішками) у вигляді сітки дендритної структури. Погіршення литої структури сталі 4X5MФ1С пов'язано з отриманням зливків за традиційною технологією ливарного виробництва. Після термічного зміцнення (гартування 1040±10 °С і відпуску за температурою 600 °С) має місце карбідна складова великих розмірів. Використання технології електрошлакового переплаву для отримання зливків при підвищеній швидкості кристалізації дозволить покращити литу структуру і підвищити механічні властивості штампової сталі. Причиною якого, було оцінено рівномірне розподілення легуючих елементів хрому, нікелю та ванадію по тілу зерен дендритної структури з гілками першого порядку. Встановлено наявність лише незначного вмісту крупних включень карбіду ванадію VC.

З розробленої литої сталі 4X3H5M3Ф для якої були встановлені оптимальні режими термічної обробки, був виготовлений штампний інструмент (матриці) для пресування металу міді марки М1. Розміри профілю заготовок прямокутного перетину становило 6x130 мм. Розроблені матриці встановлювалися в стандартне обладнання для волочіння кольорових металів. У порівнянні з матрицями штампового інструменту зі сталі 4X5MФ1С (отриманої за традиційною технологією ливарного виробництва), яка використовується на заводі «Спецлитель» (м. Дніпро, Україна) виготовлені за розробленою технологією матриці зі сталі 4X3H5M3Ф мали велику стійкість. Особливістю волочіння міді з використанням матриці штампового інструменту зі сталі 4X5MФ1С є те, що в разі появи домішок інших металів відбувається різке збільшення температури яке впливає на матеріал матриці штампової сталі, на її поверхні утворюються мікротріщини. Це призводить до передчасного виходу з ладу штампового інструменту. Використовуючи розроблену сталь вдається уникнути появи такого виду браку штампового інструменту, тому що структура матеріалу дозволяє стабільно його використовувати при більш високих температурах. Для литої сталі 4X3H5M3Ф оптимальні режими гартування і відпуску відповідає 1030±10 °С і 590±10 °С, відповідно. Для підвищення теплостійкості дослідженої сталі, було прийняте рішення коригувати хімічний склад, що відповідало марки 4X4H5M4Ф2. А також підвищити температуру гартування дослідженої сталі до первинної рекристалізації. Було встановлено, оптимальну температуру гартування сталі 4X4H5M4Ф2 – 1100±10 °С та відпуску – 590±5 °С. Первинна рекристалізація сталі виникає за температури 1110 °С. Встановлено, що теплостійкість досліджуваної сталі 4X4H5M4Ф2 підвищилася на 30 °С (при 650 °С, HRC 40 за кімнатної температури) у порівнянні зі сталлю 4X3H5M3Ф. В роботі наведені властивості литої сталі 4X4H5M4Ф2 після повного відпалу за розробленим режимом та ступінчастого відпалу за режимом, який був розроблений для сталі 4X2H5M3K5Ф (ЭП – 930). При цьому були одержані достатньо високі характеристики міцності 1390-1400 МПа. При неповному відпалі за температури 750 ± 20 °С поріг міцності та текучості дослідженої литої сталі 4X4H5M4Ф2 становили 900 та 800 МПа, відповідно. Відносне подовження та звуження становили 15 та 12 %, відповідно. Ударна в'язкість (КС) дорівнювала 180 Дж/см<sup>2</sup>. Запропонований режим неповного відпалу за температури 750±20 °С дозволив підвищити у три рази ударну в'язкість, знизити твердість на 5 HRC та знизити поріг міцності на 500 МПа порівняно з властивостями сталі ЭП–930, термічно обробленої за режимом запропонованим професором О. Д. Озерським та його учнями. Проте, властивості кованої сталі 4X4H5M4Ф2 були набагато вищі за властивості литої сталі і, становили: поріг міцності –

1190-1200 МПа, поріг текучості – 1050-1060 МПа, твердість 38-39 HRC при зменшені ударної в'язкості (130 Дж/см<sup>2</sup>). Однак, незважаючи на підвищення міцності та твердості дослідної кованої сталі, заготовки для виготовлення деталей великих розмірів задовільно оброблялись різанням.

УДК 669-154:669.02/09.004.37

## НАУКОВО – ОБҐРУНТОВАНИЙ ВИБІР ЛЕГУЮЧОЇ ДОБАВКИ – ЗАПОРУКА СПРЯМОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ЯКОСТІ МЕТАЛУРГІЙНИХ РОЗПЛАВІВ

Д.М. Тогобицька д.т.н., проф., І.Р. Снігура к.т.н., н.с., В.П. Піптюк к.т.н., с.н.с.,  
Н.Є. Ходотова м.н.с.

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

Сучасні запити металоспоживачів на металургійному ринку концентруються в основному навколо задачі - одержання конкурентоздатних спеціальних сплавів та сталей, що відповідають жорстким зарубіжним вимогам і здатні працювати у перемінних умовах (експлуатаційні чинники, температурні зміни, сировинний фактор впливу). Виплавка сталі необхідної якості є складним багатостадійним процесом, який охоплює різні металургійні переділи та у кінцевому результаті має на меті досягнення затребуваного хімічного складу залізовуглецевого розплаву, іноді у досить вузьких діапазонах зміни концентрації складових елементів, що закладає основу для формування відповідного комплексу фізико-хімічних властивостей. Застосування у технологічній схемі виплавки залізовуглецевого розплаву, етапу доведення на агрегаті «ківш-піч» відкрило перспективу розробки унікальних способів корегування сталі за хімічним складом методами легування, мікролегування, рафінування, розкислення, що розширює номенклатуру сталей і сплавів, а отже й сфери їх використання.

Вибір легируючої добавки здійснюється в залежності від поставленої цільової задачі, наприклад, формування матриці (каркасу) металевого розплаву [C, Mn, Si] чи легируючої [Cr, Ni, Ti] або мікролегиуючої [B, V, Mo] підсистем [1], які спрямовані на підвищення фізико-хімічних, теплофізичних, експлуатаційних характеристик. Першочергового значення для вибору добавки та аналізу процесів її взаємодії у системі «метал-шлак» відіграє обрана модель, концепція чи теорія будови металевого розплаву, оскільки обмеження що закладені у ній у подальшому визначають ефективність її використання та точність розрахованих властивостей.

У якості підґрунтя для наукового обґрунтування вибору добавки, у роботі обрана концепція спрямованого хімічного зв'язку [2], яка розкриває фізико-хімічну сутність багатофазних взаємодій через інтеграцію параметрів міжатомної взаємодії у нерозривний ланцюг «Склад – Технологія - Структура - Властивості». З метою оцінки доцільності використання обраних добавок та ефективності процесів доводки сталі запропоновано показники розподілу елементів в системі «метал-шлак» Лел. При структуроформуванні аналітичних виразів по кількісному вираженню розподілу кремнію та марганцю враховано значимі параметри міжатомної взаємодії шлаку, сталі, добавок у поєднанні з факторами технології при позапічній обробці підшипникових (ШХ-15) та конструкційних (09Г2С) сталей та їх модифікацій, за рахунок чого досягнута висока точністю прогнозу  $R^2 \geq 0,9$ :  $L_{Si} = f(Z_{\text{поч Me}}, T_{\text{плFeMn}}/T_{\text{сталі}}, I_{\text{прод}})$ ;  $L_{Mn} = f(d_{\text{поч Me}}, \text{tg}\alpha_{\text{поч Шл}}, T_{\text{плFeSi}}/T_{\text{сталі}}, T_{\text{поч Me}}, I_{\text{прод}})$ . Експертна оцінка моделей проводилась шляхом зіп'явлення отриманих розрахункових значень з фактичним кінцевим розподілом елементів.

Запропонований підхід демонструє ефективність використання фізико-хімічного апарату концепції спрямованого хімічного зв'язку для опису складних металургійних процесів, зокрема вибору раціональної добавки, що формує підґрунтя для одержання якісного металопродукту затребуваної якості.

Література:



1. А.с. № 70524 Україна. «Методика вибору хімічного складу сталі в рамках діапазонів регламентованих ГОСТом, який забезпечує стабілізацію механічних властивостей металопродукції на раціональному рівні» / Тогобицька Д.М., Козачок О.С., Снігура І.Р. Заявл. № 70012 26.12.2016. Регистр. 20.02.17
2. Приходько Э.В. Эффективность комплексного легирования сталей и сплавов. – К.: Наукова думка, 1995. – 292с.  
УДК 620.186

## **СФЕРОЇДИЗАЦІЯ КАРБІДІВ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ ПРИ ВІДПАЛІ**

**К.О. Черноіваненко к.т.н.**

**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

Виготовлення тонколистової сталі марки Р9 для швидкорізального інструменту за існуючою технологією є трудомістким і малопродуктивним процесом. Тому виникла пропозиція роздробити карбідну сітку лише відпалом, виключаючи багаторазову прокатку. Для цього застосували високотемпературний швидкісний відпал.

Досліджено структурні перетворення, які відбуваються в процесі високотемпературного відпалу при температурах 950 °С, 1000 °С, 1100 °С, 1200 °С і 1250 °С з витримками 25, 50, 75 і 100 хвилин.

Високотемпературний відпал при температурі 950 °С призводить до часткового розчинення евтектичних карбідів. Збільшення часу витримки до 100 хвилин не призводить помітних структурних змін. Відпал при температурі 1000 °С також викликає часткове розчинення сітки евтектичних карбідів в процесі сфероїдизації. Збільшення температури відпалу до 1200 °С сприяє подальшому дробленню сітки евтектичних карбідів та їх розчиненню. Відпал при температурі 1250 °С призводить до повного усунення карбідної неоднорідності.

Подальший низькотемпературний відпал при температурі 750 °С сприяє ще більшому розвитку сфероїдизації карбідів та їх наступній коалесценції. Відпал при температурах 1250 °С + 750 °С призводить до отримання структури сталі з рівномірним розподілом карбідів.

Рушійною силою сфероїдизації є градієнт концентрації легуючих компонентів на вістрії та плоскій границі карбідних включень. Біля плоскої границі розчин збагачується вуглецем та легуючими елементами стає пересиченим. Ділянки з більшою кривизною поверхні розчинятимуться в ненасиченому розчині, а ділянки з меншою кривизною – зростатимуть за рахунок виділення карбідної фази з пересиченого твердого розчину.

Визначено, що сфероїдизація та розчинення карбідів в процесі відпалу призводить до збільшення ступеня легованості твердого розчину, що призводить до покращення теплостійкості швидкорізального інструменту.

## **Прогресивні технології обробки металу тиском**

УДК 629.764

### **РІЗАННЯ МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА КУМУЛЯТИВНИМ СТРУМЕНЕМ ПРОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ В РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ**

**Є.С. Болюбаш**

**Державне підприємство «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, м. Дніпро**

У ракетно-космічній техніці, а також інших галузях народного господарства існують такі системи та конструкції, при експлуатації яких необхідно зробити розріз металевої оболонки. Так наприклад, при розділенні корпусу корисного навантаження ракетносія, розділенні ступенів, вузлів та агрегатів космічних апаратів, вирізки люків в системах аварійного порятунку, викиду та відсіченню парашутних систем, перерізанні трубопроводів, відсіченню тяги ракетних двигунів твердого палива, керованому руйнуванні несучих металевих частин застосовуються спеціальні піротехнічні пристрої.

У цій статті розглянуто різання металевого листа кумулятивним струменем піротехнічного пристрою. Після детонації кумулятивного заряду відбувається швидке обтиснення облицювання, а через різні швидкості руху кожної з точок його конусної частини в напрямку різу формується компактна монолітна маса рухаючихся частин кумулятивного струменя, так званий пест. Швидкість руху песта досягає 10 км/с, а тиск на перешкоду на один-два порядки перевищує межу міцності металів. Розрізання металевого листа конструкції відбувається в результаті дії тиску від песту кумулятивного струменя на металеву перешкоду.

Переваги використання: висока надійність розділення перепони, невелика вартість, невеликі габаритні розміри пристрою, мала вага конструкції, миттєвий поділ перепони, пристрої працюють в режимі очікування без періодичного технічного обслуговування системи, дозволяє забезпечити герметичність відсіків корисного навантаження тощо.

УДК 621.771.01

## ДИНАМІКА ЛІНІЇ ПРИВОДУ ВАЛКІВ У СТАНАХ З БАГАТОНІТКОВОЮ ПРОКАТКОЮ

**В. В. Вереньов, д. т. н.**

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

Розглянуто особливості динаміки послідовного заповнення смугою трьох суміжних клітей сортового прокатного стану, обумовлені тим, що валки містять по чотири калібри. Аналізували осцилограми моменту сил пружності на валу між редуктором і двигуном у клітях №№ 7, 8 і 9. Захвату першої смуги передуює холостий режим роботи стану. В цей час у клітях відзначається найбільше значення коефіцієнта динамічності - відповідно 3,3; 3,2 і 4,0, що пояснюється впливом зазорів. При захваті наступних смуг (під час продовження прокатки попередніх) коефіцієнт динамічності зменшився незначно - до 2,2 -2,9, а коливання моменту залишаються інтенсивними. Це вказує на близькість першої й другої форм власних коливань, що сприяє посиленню рівня динаміки.

При захваті кожної наступної смуги в клітях відбувається ступінчате збільшення статичного навантаження  $M_{ст}$ . Це варто приймати до уваги при розрахунках максимального динамічного навантаження  $M_{дмах}$  у клітях. Наприклад, відповідно до формули, враховуючи скільки калібрів зайнято прокаткою

$$M_{дмах i} = M_{ст i-1} + K_i \cdot \Delta M_{ст i}$$

Тут  $M_{ст i-1}$  - сумарний статичний момент прокатки попередніх смуг;

$K_i$  й  $M_{ст i}$  - відносний коефіцієнт динамічності й додаткове статичне навантаження в даній кліті при прокатці  $i$ -тої смуги. Очевидно, у випадку багатониткової прокатки варто користуватися значенням коефіцієнта динамічності, що визначається експериментально або шляхом математичного моделювання при прокатці кожної смуги.

Інший вагомий результат багатониткової прокатки полягає в тому, що шляхом порівняння коефіцієнтів динамічності при захваті смуги під час холостого ходу з їхнім значенням під час заповнення клітей наступними смугами (нитками) можна визначити

технічний стан зчленувань ліній головного приводу в частині зносу й зазорів. Виміри показали, що ще ефективніше фіксувати час запізнювання реакції ділянок лінії приводу в зазначених двох режимах роботи й порівнювати їх. Цей час при захваті смуги з холостого режиму як правило завжди більше за рахунок зазорів, коли ж ведеться прокатка зазори в лініях приводу замкнуті і час проходження ударного імпульсу по ділянках помітно зменшується.

Ще одна особливість багатониткової прокатки полягає в тому, що частота коливань моменту сил пружності в лініях приводу не залежить від того, яка по черзі смуга та скільки їх знаходиться в валках. Це означає, що кількість металу та його жорсткість в валках не впливає на частотні властивості ліній приводу. Це має значення для математичного моделювання динамічних процесів.

Ще одна особливість багатониткової прокатки полягає в тому, що частота коливань моменту сил пружності в лініях приводу не залежить від того, яка по черзі полоса та скільки їх прокатується. Це означає, що метал, який знаходиться в валках, не впливає на частотні властивості лінії приводу.

Таким чином, при багатонитковій прокатці є особливості визначення максимального динамічного навантаження, частотних властивостей та технічного стану обладнання ліній приводу валків, які рекомендовано приймати до уваги при розрахунках та діагностиці.

УДК 621.771.23

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ПЛОЩИННОСТІ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ШТАБ**

**С.О. Воробейд-р техн.наук.**

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

При виробництві гарячекатаних штаб може формуватися кілька видів неплщинності: одностороння або двостороння неплщинність на крайових ділянках штаб («крайова хвилястість»); неплщинність в середній по ширині штаб зоні («коробуватість»); коробуватість в поєднанні з односторонньою або двосторонньою крайовою хвилястістю (спостерігається дуже рідко); місцева хвилястість, що має, як правило, невелику ширину, і яка може розташовуватися практично на будь-якій ділянці по ширині штаби; прихована неплщинність, яка може проявлятися при обробці гарячекатаних рулонів - відрізки крайок штаби, розпуску на більш вузькі штаби або при різанні штаби на листи.

Умови формування плоского прокату визначаються наступними факторами: правильністю профілювання робочих і опорних валків всіх клітей чистової групи; раціональною схемою розподілу обтиснень по клітям; тепловим профілем валків; раціональним плануванням послідовності прокатки штаб різного сортаменту («монтажної партії»); зносом валків; наявністю і раціональним використанням засобів управління формою міжвалкового зазору і площинністю штаб (противигін валків, система осьового переміщення робочих валків та інше).

Результати виконаних нами досліджень дозволили розробити математичну модель формування профілю поперечного перерізу і площинності гарячекатаних штаб. У моделі використані наступні методи і залежності для розрахунку впливу основних факторів: знос валків - за методом, розробленим в ІЧМ; вплив прогину валків - за методом М.Є. Фрейдензона і І.Я. Тарновського; вплив сплющування робочих валків в контакт з штабою - по методу В.П. Полухина. Температура валків і її розподіл по довжині бочки валків визначається за статистичними залежностями, розробленими в ІЧМ. Можливість втрати штабою плоскої форми визначається за критерієм, запропонованим В.М. Видріним.

Модель враховує вихідні профілювання робочих і опорних валків, силу противигину валків, застосування циклічного осьового переміщення робочих валків для зниження величини радіального зносу. Знос валків розраховується шляхом підсумовування при послідовному введенні вихідних даних параметрів прокатки штаб монтажної партії. Передбачена можливість

використання вимірних значень температури валків та сили прокатки, або розрахованих за більш складними, але і більш точними моделями.

Модель розрахунку профілю поперечного перерізу і відхилення від площинності гарячекатаних штаб була перевірена в умовах промислових широкоштабових станів гарячої прокатки. Отримані результати свідчать про задовільну збіжність розрахункових і експериментальних даних.

Модель дозволяє оптимізувати деформаційний режим прокатки штаб, профілювання валків, визначати раціональні компоновки монтажних партій штаб, в тому числі для станів, які проектуються.

УДК 621.762:669.16

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВИХ АЛЮМОМАТРИЧНИХ КОМПОЗИТІВ СИСТЕМИ Al-TiC

Є.С. Кирилюк к.т.н., С.Ф. Кирилюк м.н.с., Ю.О. Шишкіна к.т.н., О.В. Толочина к.т.н.

Інститут проблем матеріалознавства НАН України ім. І.М. Францевича, м. Київ

Досліджено фазо та структуроутворення алюмоматричних композиційних матеріалів зміцнених карбідом титану під час їх синтезу і консолідації з використанням технології гарячого пресування. Визначено вплив вмісту компонентів шихти на густину, пористість, твердість та електропровідність гарячепресованих композитів. Були досліджені композиційні матеріали з різним вмістом алюмінію та дисперснозміцненої добавки : 45Al-44Ti-11C (% , мас.), 50Al-40Ti-10C (% , мас.), 55Al-36Ti-9C (% , мас.), 60Al-32Ti-8C (% , мас.). Алюмоматричні композити отримували шляхом термічного синтезу та гарячого пресування. Термічний синтез композитів проводили у вакуумній печі індукційного нагріву при температурі 950 °C та витримці 1 година. Далі синтезовані зразки піддавались гарячому пресуванню, після попереднього нагріву при температурі 600 °C та витримці 20 хв. Новий підхід при створенні таких порошкових матеріалів зводиться до того, що дисперснозміцнюючі добавки (зокрема - TiC) утворюються шляхом термічного синтезу з елементарних порошків. Внаслідок використання ефектів отримання потрібних дисперсних фаз при термічному синтезі, що дозволить цілеспрямовано впливати на швидкість росту зерен і штучно створювати гетерогенність композиту і тим самим формувати дрібнозернисту мікрогетерогенну структуру з високими фізико-механічними властивостями.

Результати скануючої електронної мікроскопії (SEM) показали, що зразки мають переважно двохфазну структуру – сіре поле, на якому досить рівномірно розподілені світлі дрібні частинки. Слід зазначити, що кількість світлих частинок значно зменшується із зростанням кількості алюмінію у зразках. Результати рентгенофазового аналізу показали присутність ліній карбіду титану та алюмінію, поряд з якими є ряд ліній, що належать алюмінідам титану  $Al_3Ti$ ,  $Al_5Ti_3$ ,  $Al_2Ti$ ,  $AlTi_3$ ,  $Al_5Ti_2$  і судячи з інтенсивності піків, вміст останніх у матеріалі незначний. У випадку зразків, виготовлених із суміші складу 60Al-8C-32Ti (% , мас.) на рентгенограмі присутні і лінії потрійного карбіду титану  $Ti_3AlC$ , наявність якого було виявлено ще при дослідженні SEM даного зразка.

Визначення щільності та поруватості показали, що зразки усіх складів максимально ущільнилися та не мають поруватості після проведеного гарячого пресування. Вимірювання твердості проводили на твердомірі Novotest за школою HRB. Значення твердості, для приведених алюмоматричних композитів, коливаються від 59-69,1 (для зразків із 45-50%, (мас.) Al) та до 73,7-76 (55-60 %, (мас.) Al) в залежності від складу. Результати досліджень електропровідності вказують на те, що усі досліджувані композити показали низькі значення питомого електроопору. Для композитів з 55-60 %, (мас.) Al 0,168-0,142 Ом\*мм<sup>2</sup>/м, відповідно

дещо вищі значення для матеріалів з більшим вмістом карбідної складової –  $0,23-0,3 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  (для композитів з 45-50 %, (мас.) Al). На підставі отриманих даних, наведені композити можна рекомендувати для подальших досліджень, щодо можливості їх використання, як матеріалів для струмоприймачів транспортних засобів, що рухаються (пантографів), що допоможе у вирішенні проблеми збільшення терміну служби електроконтактних матеріалів ковзання.

УДК 621.771.2

## **ВІРТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОКАТКИ У ДРОТОВОМУ БЛОЦІ**

**О.П. Максименко д.т.н., О.В. Нікулін к.т.н., А.Б. Приймак, К.В. Колесник**

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

Сучасні технології в металургії та машинобудуванні ґрунтуються на автоматизації проектування і широкому використанні інформаційних технологій. Тому майбутні фахівці повинні набути компетентностей планування та проведення експерименту, а також використання комп'ютерних систем галузевого призначення при навчанні. Моделювання в програмному середовищі **Qform** дозволяє прогнозувати поведінку металу при різних умовах пластичної деформації, наприклад при прокатці катанки у дрововому блоці.

В роботі розглядається застосування комплексу комп'ютерних програм **Qform** для імітації процесу прокатки катанки в системі калібрів “овал - круг”. Такі віртуальні експерименти можуть проводитися на комп'ютерній моделі реального об'єкта з вбудованими в них блоками математичної обробки результатів моделювання. Отримана за її допомогою комп'ютерна модель, складається з трьох взаємопов'язаних рівнів: візуального, на якому розташовані засоби візуалізації та інтерактивної зміни значень параметрів; логічного, де розташовується алгоритм проведення віртуального експерименту; та об'єктного, що являє собою технічний об'єкт, який моделюється.

За допомогою методу скінчених елементів проводиться моделювання механічних, теплових, фізико-хімічних і хіміко-технологічних процесів, що протікають в осередку деформації при обробці тиском. Його програмна реалізація заснована на універсальному обчислювальному ядрі, що здійснює формування та розв'язання систем алгебраїчних рівнянь, складених на основі розбиття фізичних тіл по елементах для взаємодіючих середовищ.

Для порівняльного аналізу з урахуванням реальних умов процесу моделювали прокатку катанки діаметром 8 мм в трьох проходах чистового блоку стану 400/200 ПАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». З метою спрощення процесу розрахунків овальну та круглу форму перерізів розкату та калібрів замінили прямокутниками, розміри яких визначали за методом відповідної штаби. Результати розрахунків показують, що на стан розкату між клітьми безперервного стану істотно впливають контактні умови у кожному з осередків деформації.

Зміна величини коефіцієнта тертя в одному або кількох осередках деформації призводить до зміни швидкісних умов прокатки в кожній з клітей стану. Як наслідок, відбувається зміна напруженого стану розкату по всій його довжині. Кількісно вплив зміни коефіцієнта тертя можна порівняти з впливом зміни величини зазорів валків, тобто такі зміни мають системний вплив.

УДК:666.141.24:621.771.25:621.778

## **ПРО ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОБУДОВИ ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІНН ЯБУНТОВОГО ПРОКАТУ З ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ НА ЗАСАДАХ ПРОГНОЗНИХ МОДЕЛЕЙ**

**Е. В. Парусов, д.т.н., І. М. Чуйко, к.т.н., О. В. Парусов, к.т.н.**

## Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Сучасні технології виготовлення холоднодеформованого дроту з вуглецевих сталей базуються на підвищенні ефективності роботи та завантаження волочильного обладнання, мінімальній тривалості технологічних простоїв, зменшення витрати основних і допоміжних матеріалів, зокрема енергоносіїв для термічного оброблення, а також забезпечення екологічної чистоти виробничого процесу. Рациональне визначення зазначених технологічних чинників на практиці виявляється неможливим без повноти уявлень про вплив хімічного складу, структури та показників міцності сталі на її деформаційне зміцнення під час холодного пластичного деформування (волочіння).

Волочіння передбачає проходження бунтового прокату через певну кількість осередків деформації (волок), після чого отримують дріт заданого діаметру. Під час такого оброблення властивості вуглецевих сталей змінюються: показники міцності підвищуються, а пластичності – зменшуються. На етапі, коли волочіння виявляється недоцільним (руйнування або невідповідність дроту вимогам стандартів), проміжно заготовку піддають термічному обробленню, що зводить нанівель ефекти деформаційного зміцнення та повертає механічні властивості до рівня початкових значень.

Оброблення масиву даних, отриманого за результатами багаторічних спостережень під час перероблення прокату  $\varnothing$  5,5–14,0 мм ухолоднодеформований дріт засвідчило, що унормована міцність сталей із різним вмістом вуглецю (0,03–0,88 % C) та легувальних елементів добре піддається розрахунковому визначенню та дозволяє створювати різні прогностичні моделі. В залежності від сумарного відносного обтиснення, хімічного складу, параметрів структури та механічних властивостей встановлено гранично допустимі коефіцієнти зміцнення сталей за групами (низько-, середньо- і високовуглецеві). Розроблені прогностичні моделі додатково дозволяють проводити побудову маршрутів волочіння, визначати абсолютні значення одиничних обтиснень, швидкість волочіння та міцність прокату-дроту після кожного з осередків деформації. В свою чергу це дозволяє достовірно встановлювати припустимі коефіцієнти навантаження на електродвигуни волочильного стану, визначати їхню сумарну потужність для реалізації виробничого процесу, а також розраховувати теоретичну і фактичну продуктивність.

Таким чином, можливість попереднього прогностичного визначення найважливіших параметрів процесу волочіння дозволяє проводити ефективну побудову сучасних технологій перероблення прокату на металовиробних підприємствах, зокрема енерго- та ресурсозберігаючих схем холодного пластичного деформування без застосування додаткового термічного оброблення.

УДК 681.513.7:621.771.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ AGC-АЛГОРИТМУ РЕГУЛЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПРОКАТУ В УМОВАХ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ЗБУРЕНЬ

**О.Ю. Потап к.т.н., А.В. Іванічик, М.В. Михайловський к.т.н.,**

**Український державний університет науки і технологій**

Вважається, що застосування AGC-алгоритму регулювання товщини листового прокату забезпечує повну компенсацію технологічних збурень, що привносяться підкатом, зокрема, його різнотовщинністю. Проте, на безперервних станах товщина підкату на вході кожної з чистових клітей містить високочастотну складову, спричинену ексцентриситетом валків попередньої клітей. Спроможність AGC-систем компенсувати такі високочастотні збурення залежить від швидкодії гідравлічних натискних пристроїв (ГНП).

В роботі здійснене аналітичне обґрунтування функції передачі АГС-системи з урахуванням реальної швидкодії ГНП, на базі якої аналітично визначені її частотні характеристики.

В інтервалі найпоширеніших частот обертання опорних валків ( $\omega=5 - 15 \text{ с}^{-1}$ ) АЧХ є майже лінійною і залежно від постійної часу  $T$  ГНП та відношення модуля жорсткості прокату  $M_{II}$  до модуля жорсткості прокатної кліти  $M_K$  змінюється в широких межах від  $A(5)=0,05$  (при  $\omega=5\text{с}^{-1}$ ;  $T=0,01 \text{ с}$ ;  $M_{II}/M_K=1$ ) до  $A(15)=0,48$  (при  $\omega=15\text{с}^{-1}$ ;  $T=0,01 \text{ с}$ ;  $M_{II}/M_K=4$ ). Тобто АГС-система за певних умов може або майже повністю усувати високочастотну різнотовщинність підкату, зменшуючи її у 20 разів, або лише частково компенсувати це збурення. В останньому випадку, що за параметрами близький до холодної прокатки тонких смуг, різнотовщинність на виході кліти не перевищує  $\Delta h \approx 0,024 \text{ мм}$ , що відповідає вимогам до прокату високій точності.

Аналітичні висновки підтверджені результатами комп'ютерного моделювання.

УДК 621.771.26 : 621.778 : 330.123.72.083.133

## **РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОФІЛІВ СТРІЧКОВОГО О ТИПУ СПОСОБОМ ВОЛОЧІННЯ РОЛИКОВИХ ВОЛОКАХ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗГІННИХ КАЛІБРІВ**

**В.Г. Раздобрєєв к.т.н., К.Ю. Ключніков, Д.Г. Паламар, О.І. Лещенко**

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

Процес прокатка-волочіння застосовується при виробництві великого ряду фасонних профілів складної конфігурації, у тому числі тонкостінних, стрічкових та профілів періодичного перерізу. Цей процес, порівняно з волочінням у монолітних волоках, дозволяє на 20-40 % знизити енергетичні витрати, збільшити деформацію за один перехід до 40-50 %, зменшити кількість підготовчих операцій (термообробка, травлення), виключити використання дорогих мастил для волочіння. Проведені аналітичні дослідження показали, що для отримання максимального співвідношення  $b/h$  при виробництві профілів стрічкового типу способом волочіння в роликівих волоках необхідно деформувати вихідну заготовку плющени в розгінних калібрах з послідовним зменшенням кута нахилу гребеня. На підставі аналізу впливу технологічних параметрів процесу волочіння у роликівих волоках з використанням розгінних калібрів розроблено спосіб отримання профілів стрічкового типу широкого розмірного сортаменту з круглої заготовки. На підставі даного способу розроблені два варіанти одержання профілю стрічкового типу перерізом  $0,5 \times 12,0 \text{ мм}$  із застосуванням розгінних калібрів. У порівнянні з раніше експериментально отриманим калібруванням, розроблені варіанти дозволяють скоротити кількість переходів отримання профілю стрічкового типу перетином  $0,5 \times 12,0 \text{ мм}$  з 9 до 7 або 5, відповідно. Розроблено конструкцію привалкової арматури, що забезпечує стабільний перебіг процесу деформації профілю в розгінних калібрах.

УДК 621.771.014.2

## **РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРОКАТКИ КРУГЛИХ ПРОФІЛІВ НА ТЗС ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»**

**М.М. Штода к.т.н.**

**ПрАТ «Камет-Сталь», м. Каб'янське**

Наведено сортамент та технологію виробництва круглих профілів на стані 900/750-3 ПрАТ «Камет-Сталь». Показано технологічні особливості переходу ТЗС в режим роботи малотоннажними партіями. Проаналізовано характер зміни технологічних факторів при виробництві круглих профілів малого перерізу (діаметром менш ніж 110 мм).

Показано, що відповідно до існуючої ситуації при прокатці круглих профілів діаметром від 40 мм до 110 мм в кліті «750-3» на ТЗС температура розкату по довжині змінюється в межах 70...100°C. Це, в кінцевому рахунку, призводить до утворення періодичних дефектів по довжині профілю. Найчастіше зустрічається дефект прокатного походження на передньому кінці першої краті та задньому кінці останньої краті злитку – «вус». Аналіз температурного поля розкату та вимір фактичної довжини дефекту «вус» дозволили зробити висновок про прямий зв'язок між цими параметрами.

Подальша дослідна робота була спрямована на визначення технологічного фактору, який найбільш суттєво впливає на величину розширення та одночасно з цим, при необхідності, може бути негайно замінений технологічним персоналом стану. Аналіз дослідницьких робіт попередніх років та досвід прокатки круглих профілів на ТЗС дозволили обрати за такий параметр - частоту обертання валків чистової кліті стану.

Проведено дослідну роботу з визначення взаємозв'язку між величиною напруження постійного струму на головний привод та частотою обертання валків клітей «750-1, 2, 3». За результатами дослідження збудовано графік частоти обертання валків в залежності від показників вольтметра, що встановлений на посту керування чистовою кліттю стану.

Проведено промисловий експеримент з визначення впливу температурно-швидкісного режиму процесу прокатки в чистовому проході на деформований стан розкату при виробництві круглих профілів діаметром від 40 мм до 110 мм. На основі обробки експериментальних даних розроблено та впроваджено тимчасовий регламент температурно-швидкісного режиму прокатки круглих профілів діаметром від 60 мм до 110 мм та діаметром 40 мм в кліті «750-3». Економічний ефект від впровадження результатів роботи за рахунок зменшення витратного коефіцієнта металу при виробництві круглих профілів діаметром від 60 мм до 110 мм склав 2,36 млн. грн./рік.

### **Моделювання та оптимізація технологічних процесів**

УДК 519.854

## **ЗАСТОСУВАННЯ МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ ДО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА**

**Л.Т.Бойко к.ф-м.н., І.С. Ляшенко магістр**

**Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара**

Останні декілька десятиліть дослідники все частіше звертаються до природних алгоритмів пошуку розв'язків різних прикладних задач. Природа відпрацювала ці алгоритми протягом мільйонів років в процесі адаптації флори і фауни до навколишнього середовища.

Метою даного дослідження є аналіз алгоритму колективної поведінки мурашиної колонії під час пошуку їжі та застосування цього алгоритму до розв'язування задачі комівояжера, тобто до задачі пошуку найкоротшого (оптимального) маршруту, який дозволяє комівояжеру відвідати усі задані міста лише по одному разу та повернутися у початкове місто.

Першу версію мурашиного алгоритму оптимізації (Ant Colony Optimization, ASO) запропонував Марко Доріго у 1992 році [1]. Через деякий час було опубліковано декілька модифікацій цього алгоритму, серед яких найвдалішимипризнані Ant Colony System (ACS) [2] і Max-Min Ant System (MMAS) [3].



В роботі [4] проведено аналіз системних особливостей обміну інформацією в колонії мурах під час пошуку їжі. Представлена ітераційна схема вказаних трьох алгоритмів, які моделюють природну поведінку мурах-фуражирів при пошуку найкоротшого шляху доставки їжі до мурашника. Алгоритми налаштовуються на конкретний приклад задачі комівояжера за допомогою параметрів налаштування, які вибираються експериментально.

Розроблено комп'ютерну програму для реалізації трьох вказаних мурашиних алгоритмів. Програма дозволяє: через вікно інтерфейсу вводити кількість міст, кількість мурах, максимальну кількість ітерацій; виконати налаштування кожного алгоритму; за бажанням вибрати будь-який із трьох алгоритмів. Результатами програми є: візуалізація найкоротшого знайденого маршруту; довжина цього маршруту; найменша кількість ітерацій, за допомогою яких досягається цей найкоротший маршрут; графічна залежність довжини найкоротшого маршруту від номера ітерації.

Порівняльний аналіз результатів роботи програми дозволив зробити такі висновки:

1) При вдало вибраних параметрах налаштування алгоритмів ітераційні методи, зазвичай, достатньо швидко дають результати, близькі до оптимальних. Однак, у кожного методу буде своя кількість необхідних для цього ітерацій і ці кількості можуть істотно відрізнятися.

2) Метод вивчення проблеми комівояжера за допомогою мурашиних алгоритмів є швидше експериментальним, ніж теоретичним, оскільки результат дуже залежить від параметрів налаштування алгоритмів, однак, теоретичне дослідження відносно вибору цих залежностей залишається актуальним питанням.

### Література

1. Dorigo, M., Stützle, T., Ant Colony Optimization. MIT Press, Cambridge, MA, 2004, 305 p.
2. Dorigo M., Gambardella L. M., Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, v. 1, 1997, p. 53–66.
3. Stützle T., Hoos, N. H. MAX–MIN Ant System. Future Generation Computer Systems, v. 16, 2000, p. 889-914.
4. Бойко Л.Т. Використання мурашиного алгоритму оптимізації в задачі комівояжера. /Л.Т. Бойко, І.С. Ляшенко, // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ – 2022) / Дніпро, 18 травня 2022 р. – 309 с. С. 223 – 231.

УДК 62-551.454

## МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ МУФЕЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧЕЙ З НЕЙРОНЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Єгоров О.П. к.т.н., Рибальченко М.О. к.т.н., Маначин І.О. к.т.н.

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро  
Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Електричні печі опору (камерні, шахтні, ковпакові і т.д.) широко застосовуються для термообробки виробів в металургії, енергетичному машинобудуванні, металообробці, керамічному та скляному виробництві та інших галузях української промисловості.

В електричних печах опору застосовується автоматичне регулювання температурного режиму, а також автоматичне керування роботою різних механізмів пічного агрегату. Підвищення рівня автоматизації електричних печей опору отримало в даний час значного розвитку. Це пов'язано, з одного боку, з обробкою в них сучасних матеріалів, для яких потрібні режими зі складними графіками зміни температури і високою точністю її підтримки,

безперервним контролем і регулюванням складу атмосфери в ході процесу, із загальним ускладненням установок в зв'язку з їх агрегуванням, а з іншого - жорсткими вимогами до економічності експлуатації печей, а також прагненням до скорочення застосування робочої сили при обслуговуванні обладнання.

Для печей безперервної дії (методичних, прохідних, протяжних) статичні і динамічні характеристики змінюються зі зміною продуктивності, тобто при збуреннях. Нестационарність статичних і динамічних характеристик печей в контурі регулювання температури потребує особливої уваги при виборі і налаштування регуляторів. У цих контурах застосовують регулятори безперервної дії, що працюють по П-, ПІ-, ПІД-законів регулювання, а також релейні (двох і трьох позиційні) і імпульсні регулятори. Хороша якість регулювання забезпечується зазвичай застосуванням регуляторів, що працюють по ПІ-закону регулювання, з налаштуванням ступенів нерівномірності. Однак в кожному конкретному випадку закон регулювання необхідно визначати за індивідуальними показниками об'єкта. Поліпшеними динамічними властивостями володіють системи з корекцією налаштувань регулятора при зміні режиму роботи печі.

В роботі реалізовано адаптивне управління нагріванням виробів в електричній печі. Математичний опис процесів нагрівання виробу спрощено представлено у вигляді двох аперіодичних ланок. Одна ланка – з малою постійною часу (датчик температури), інша – з великою (час нагрівання виробу). Причому, чим більше маса виробу, тим більше постійна часу в передатній функції. Задача управління нагріванням виробів з різними масами складається в мінімізації часу нагрівання й забезпечення перерегулювання у 4,3 % (технічний оптимум).

Модель системи управління містить у собі об'єкт управління, ПІД- регулятор і коригувальну ланку зміни коефіцієнта підсилення регулятора – гібридну нейронну мережу ANFIS.

Корекція коефіцієнта підсилення здійснюють за допомогою гібридної мережі.

У гібридну мережу входить проєкт нечіткого виведення Сугено. Блок фазифікації із трьома функціями приналежності трикутної форми для змінної «Швидкість зміни температури» (діапазон зміни від 0,02 до 0,03 °C/c). Цей діапазон розбитий на три піддіапазона: «Швидкість низька» mf1, «Швидкість середня» mf2, «Швидкість висока» mf3 .

Функції приналежності вихідного сигналу в алгоритмі Сугено вибираються у вигляді стовпчиків. Навчання нейронної мережі проводиться по заздалегідь складеними даними відповідності входу й виходу.

Значення швидкості зміни температури в печі запам'ятовується впродовж 10 с після подачі напруги живлення. Ці дані характеризують час перехідного процесу в системі. На підставі цих даних запрограмований FuzzyLogicController обчислює необхідну зміну коефіцієнта підсилення регулятора, і перехідний процес здійснюється з новими значеннями параметрів регулятора.

Дослідження проводилися з використанням моделі, виконаної в пакеті Matlab.

При зміні постійного часу об'єкта управління якісні параметри керування температурним режимом печі не змінилися.

Проведені дослідження на моделі та експерименти на лабораторній печі показують, що системи, виконані із застосуванням нечітких регуляторів можуть виявитися, у зв'язку з легкістю їх навчання, незамінними при автоматизації технологічних процесів з неповною інформацією про їхні параметри.

1. Єгоров О.П., Михайловський М.В.Проектирование систем управления в среде Fuzzy Logic Toolbox: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2020. – 85 с.
2. Горячих Е.В. Разработка способов и алгоритмов управления электрическими печами сопротивления, обеспечивающих временную и пространственную равномерность нагрева : Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет”, 2016 г.-126

3. Е.Ю. Воронцов. Система управления температурой муфельной электропечи с адаптивным регулятором температуры. Вестник ЮУрГУ. Серия "Металлургия", 2019, Т.19, №3, с.80-87.

УДК 004.942:669.18

### **КОМП'ЮТЕРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОМІШКОВОГО ЗАСВОЄННЯ ПРИ ВДУВАННІ У РОЗПЛАВ ЧЕРЕЗ ОСЬОВУ ФУРМУ**

**К.С. Красніков к.т.н., В.О. Скоробреха**

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

У процесі виробництва сталі металургійні підприємства додають до розплаву. Вдування домішки через фурму є одним з поширених способів модифікації хімічного складу рідини. Цей процес досліджувався у багатьох роботах. Проблема полягає у дуже повільній дифузії домішки, а значить і у тривалому перемішуванні при постійній втраті температури розплаву. На швидкість перемішування впливає як кількість фурм продування так і їх розташування. Означений процес проаналізовано у даній роботі за допомогою комп'ютерного математичного моделювання, яке користується популярністю у науковців завдяки своїй малій вартості. Комп'ютерна реалізація дозволяє зберігати параметри і результати дослідів у базі даних. Доступ до функціональних сторінок забезпечено через веб-інтерфейс користувача. Веб-сайт має підсистему реєстрації дослідників і форму для додавання розрахованих полів. У результаті дослід з витратою інертного газу від 40 до 90 л/хв і з числом фурм від однієї до трьох виявлено, що найменшу тривалість перемішування має конфігурація з однією фурмою по центру радіуса та з двома протилежними фурмами сумарною витратою 90 л/хв.

УДК 004.942:669.18

### **КОМП'ЮТЕРНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ І АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРОДУВОЧНОГО РЕЖИМУ ОСЬОВОЇ ФУРМИ НА РОЗМИТТЯ КОВШОВОЇ ФУТЕРОВКИ**

**К.С. Красніков к.т.н., Т.Ф. Фатихова**

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

Товщина футеровки сталерозливного ковша з кожною плавкою поступово стає тоншою. І ступінь розмиття залежить від швидкості дотичного розплаву. При виробництві сталі намагаються уповільнити це зношування, бо кожний ремонт футеровки вартує значного часу і ресурсів. Цій проблемі науковці приділяли увагу у публікаціях, зокрема, по математичному моделюванню зносу футеровки. Дослідженню підлягає велика кількість умов цього процесу, зокрема, кількість і розташування фурм продування, а також потужність продування. По-перше треба і домішку швидко перемішати у розплаві, а по-друге і футеровку ковша зберегти. Комп'ютерна візуалізація і аналіз означеного процесу передбачають його хід і результати у вигляді розрахованих полів, зокрема, зносу. Поля зберігаються у базі даних і додавання та їх обробка здійснюється через спеціально розроблений веб-сайт. Він надає можливість

дослідникам зареєструватися і заповнювати форму досліджу, а також додавати літературні джерела даних. Перелік літератури використовується практично у всіх досліджах для порівняння результатів. Моделювання процесу в умовах потужності продування 40, 60 і 90 л/хв та кількістю пробок продування від однієї до трьох показало: найбільше розмиття прогнозується на дні, поблизу фурм продування, причому перехід на кожну вищу потужність продування підвищує інтенсивність розмиття приблизно на 15%. Вимикання фурм після 1 хвилин продування значно зменшує розмиття мінімум на 35%. Якщо ж розглядати стінку ковша, то без відключення фурм витрати 90 л/хв є найбільш руйнівними.

УДК 004.942:669.18

## **ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТІЙНИХ ОБЛАСТЕЙ РОЗПЛАВУ ПІД ЧАС ПРОДУВАННЯ**

**К.С. Красніков к.т.н., О.В. Феліпенко**

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

Проблема існування застійних областей розплаву під час продування інертним газом полягає у ризику його кристалізації біля стінок ковша в умовах постійного зменшення температури. Велика кількість наукових публікацій присвячено розв'язанню цієї проблеми. Одним з можливих вирішень є оптимізація кількості і розташування фурм продування розплаву з метою мінімізації об'єму застійних областей. Математичне моделювання і чисельне дослідження означеного процесу дозволило визначити найкраще розташування фурм та зекономити на витратах лабораторних або промислових експериментів. Комп'ютерна реалізація передбачає облік дослідів за допомогою бази даних і веб-інтерфейсу користувача. Також ця реалізація автоматично формує графіки залежних величин. Дослідники після реєстрації мають можливість додавати результати дослідів у вигляді розрахованих полів. У результаті досліджень виявлено, що незалежно від кількості фурм на дні поблизу стінки ковша формується застійна область. Там швидкість розплаву вкладає від 1 см/с до 5 см/с.

УДК 669.184:004.42

## **КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА І ВЕРХНЬОЇ ФУРМИ**

**Ю.О. Павленко, О.О. Жульковський, к.т.н., І.І. Жульковська, к.т.н.,  
С.П. Пантейков, к.т.н.**

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

Киснево–конвертерний процес залишається основною сучасною технологією виробництва сталі. Конвертер є головним агрегатом при виробництві сталі, а верхня дуттьова фурма – основним інструментом для здійснення конвертерного процесу та керування ним. Їх виготовлення потребує ретельного попереднього розрахунку конструктивних параметрів, що будуть задовольняти постійно зростаючим вимогам до процесу. Правильність та раціональність проектування й виготовлення цих агрегатів і пристроїв гарантує ефективне проведення технологічного процесу, забезпечуючи безаварійний режим роботи конвертерного цеху.

Відомі основні методики розрахунку кисневого конвертера і верхньої фурми розроблені провідними освітніми установами України – Дніпропетровським металургійним інститутом, 1976 р. (зараз Інститут промислових і бізнес технологій УДУНТ); Жданівським металургійним

інститутом, 1978 р. (зараз Приазовський ДТУ); Дніпродзержинським індустріальним інститутом, 1981 р. (зараз Дніпровський ДТУ) та іншими. Зазначені методики є актуальними і зараз.

Алгоритми розрахунків за даними методиками є доволі складними, насиченими великою кількістю закономірностей, рівнянь, довідкових даних, таблиць тощо та потребують не аби яких знань і фахової кваліфікації. Зазвичай подібні розрахунки виконуються фахівцями–сталеплавильниками вручну, а отже займають достатньо часу й не завжди дають достовірні результати. Автоматизація розрахунків значно спростить та пришвидчить процес проектування конвертера і фурми із забезпеченням значно більшої точності отриманих результатів.

Аналіз існуючої інформації показав практично повну відсутність на ринку спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) для автоматизації розрахунків конструктивних параметрів кисневого конвертера і верхньої фурми. Отже розроблення такої комп'ютерної системи є актуальною проектно–конструкторською задачею, що важлива при виробництві сталі.

Для комп'ютерної реалізації поставленої задачі обрані мова програмування JavaScript, фреймворк Angular та графічна бібліотека D3.js. Управління станом компонентів ПЗ відбувається за допомогою бібліотеки Ngrx, яка реалізує принцип односпрямованого потоку даних. Використання цього підходу надає можливість зберігати стан усіх компонентів програми у деревоподібній структурі – сховищі. Наявність єдиного джерела даних позбавляє від необхідності вирішувати проблему обміну даними між різними компонентами та спрощує debugging програми.

Обрано каскадну методологію (Waterfall Model) – послідовний метод розроблення ПЗ з використанням IDE JetBrains WebStorm 2019.2.

Для користування застосунком не потрібна реєстрація. Усі розрахунки відбуваються на РС користувача без використання сервера. Середовище функціонування ПЗ – браузер, операційна система Linux / Windows 7, 8, 8.1, 10 / macOS.

**Висновки.** В результаті виконання роботи автоматизовано розрахунок кисневого конвертера і верхньої фурми із застосуванням сучасних технологій та підходів до розроблення ПЗ; розроблено оригінальний дизайн та логотип застосунку, інтуїтивно зрозумілий користувальницький інтерфейс; проведено тестування програми на конкретних прикладах застосування; виконано тестовий розрахунок кисневого конвертера і верхньої фурми конвертерного цеху ПрАТ «Камет–сталь».

Розроблений застосунок дозволяє спростити та прискорити процес розрахунків конструктивних параметрів кисневого конвертера і верхньої фурми при їх проектуванні, проводити великі обсяги обчислень у короткі терміни та отримувати більш надійні результати.

УДК: 669.168: 669.26.0018

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НІКЕЛЬВМІСНИХ ФЕРОСПЛАВІВ**

**Петров О.П., Кукса О.В., Греков С.В., Черський С.С.**

**Інститут чорної металургії (ІЧМ) ім. З. І. Некрасова НАНУ**

Потреба в нікелі для виплавки спеціальних сталей головним чином задовольняється за рахунок електролітичного нікелю (~ 99%Ni), висока ціна якого не сприяє розвитку виробництва нікельвмісних сталей. У багатьох випадках замість дорогого і дефіцитного чистого нікелю може бути використаний феронікель, собівартість виробництва якого (як і багатьох інших феросплавів) нижче, ніж чистого металу. У той же час відомо, що на ринку легуючих матеріалів є дефіцит відносно дешевих нікелевих і комплексних феросплавів, що містять 10-30%Ni. У роботі розроблено принципово новий підхід до опису фізико-хімічних властивостей розплавів

феросплавного виробництва на основі методики розрахунку критеріїв ( $\Delta Z^y$  та  $\Delta d$ ), що характеризують ступінь відмінності зарядового й структурного стану розплаву як хімічно єдиної системи від механічної суміші вихідних компонентів.

Запропоновано напівемпіричні моделі: температура плавлення ( $T_n$ , С), щільність ( $D \cdot 10^3$ , кг/м<sup>3</sup>), теплота плавлення ( $Q$ , кДж/кг), теплоємність ( $C$ , Дж/кг·к), теплопровідність ( $\lambda$ , Вт/(м·к)), температурний коефіцієнт теплоємності ( $\beta$ , Дж/кг·к<sup>2</sup>) як  $f = (Z^y, d, \Delta Z^y, \Delta d)$ , для оцінки властивостей феросплавів феронікелю виробництва Побузького феронікелевого комбінату з вмістом (мас.%): 6%Ni, 0,2%Si, 0,1%C, 0,242%Cr, 0,32%Co, 0,48%Cu, 0,04%S, 0,03%P. Сплавів нового покоління системи Fe-Ni-Cr, що містять: 10%Ni; 25-45%Cr; 2,0%C; 0,2%Si; Fe - інше. Розроблені аналітичні залежності дозволяють прогнозувати вплив зміни складу, вираженого через інтегральні параметри міжатомної взаємодії, на властивості різних марок нікелевих феросплавів, що виробляються в Україні.

УДК 681.52

## МОДЕЛЮВАННЯ АСР РІВНЯ МЕТАЛУ У КРИСТАЛІЗАТОРІ МБЛЗ

**М.О.Рибальченко к.т.н., В.І.Шибакінський к.т.н., О.П.Єгоров к.т.н**

**Український державний університет науки і технологій, м.Дніпро**

Підтримка сталості рівня рідкої сталі в кристалізаторі МБЛЗ є одним з головних вимог технології отримання якісної сталевої заготовки. Стабілізація рівня металу в кристалізаторі забезпечує стаціонарні умови затвердіння заготовки і її високу якість, а також безпечну роботу установки. Перевищення рівня металу в кристалізаторі може привести до переливу сталі на робочу площу, а неприпустиме зниження - до прориву рідкого металу через недостатньо сформовану оболонку заготовки після виходу з кристалізатора.

Існують наступні методи автоматичної стабілізації рівня металу в кристалізаторі:

- за допомогою зміни припливу металу з промковша в кристалізатор при постійній швидкості витягування злитка;
- за допомогою зміни швидкості витягування злитка із кристалізатора;
- комбінований метод.

Зазначимо, що основним збурюючим впливом для системи управління рівнем металу в кристалізаторі МБЛЗ є швидкість витягування злитка. Збільшення точності роботи системи під час перехідного процесу при наявності збурення можливо досягти за рахунок одночасної роботи двох каналів стабілізації рівня – стабілізації рівня металу зміною припливу металу з промковша та стабілізацію рівня зміною швидкості витягування заготовки.

Рівень металу в кристалізаторі повинен стабілізуватися з високою точністю (допустиме відхилення  $\Delta h_{кр} = 15 - 20$  мм).

Виконано моделювання роботи системи у пакеті Matlab/Simulink. Для розрахунку параметрів регулятора використано інструмент sisotool, що входить у пакет динамічного програмування Matlab.

Моделювання АСР рівня було виконано у трьох схемах:

- при управлінні стопором (обурення - збільшення швидкості приводу тягнучої кліті);
- при управлінні приводом тягнучої кліті (обурення - збільшення припливу матеріалу в кристалізатор);
- комбінована схема моделювання АСР рівня металу (обурення - збільшення швидкості приводу тягнучої кліті, збільшення припливу металу в кристалізатор).

По результатам дослідження динамічне відхилення в АСР рівня при управлінні стопором (схема 1) становило 13 мм, час перехідного процесу – 10с. Динамічне відхилення в АСР рівня при управлінні приводом тягнучої кліті (схема 2) – 7,5 мм, час перехідного процесу – 10с. В

комбінованій системі (схема 3) динамічне відхилення становить 6 мм, час перехідного процесу – 6с.

Таким чином, динамічні відхилення рівня мінімізуються в комбінованій системі регулювання. Тому така система є найбільш прийнятною для вирішення задачі стабілізації рівня металу в кристалізаторі МБЛЗ.

УДК 621.744.52

## **СТАБІЛІЗАЦІЯ ТЕРМОЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛИВКИ СТАЛІ В КЕРАМІЧНІ ФОРМИ**

**В.Ю. Селівьорстов д.т.н., О.І. Шакіров**

**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

Найбільш проблемними місцями при литті в керамічні форми є процеси формування, прогартування, заливки форм і охолодження виливків, а також підготовчі інженерні роботи, що пов'язані з розробкою ливниково-живильних систем. Тому проведення досліджень, направлених на вдосконалення технологічних процесів формування, прогартування та заливки є актуальним завданням.

Аналіз даних, що характеризують вплив способу формування на охолодження керамічних форм після прогартування показав, що найбільш тривала стабільність температури форми спостерігається при способах формування керамічних форм в зернистий опорний наповнювач і термостат. Причому, змінюючи товщину або матеріал теплоізоляційного шару термостата, можна регулювати тривалість термостатування керамічної форми в широких межах, і тим самим управляти процесами формування виливка і його якістю.

В результаті аналізу експериментальних даних встановлені залежності: тривалості збереження температури форми від товщини теплоізоляційного шару термостату, і швидкості нагріву керамічних оболонок в термостатах від початкової температури в прогартувальній печі.

Встановлено, що при формуванні в термостати достатня тривалість прогартування керамічних оболонок при 950 - 980 °С становить близько 1 години.

В ході аналізу експериментальних даних про вплив газового тиску на щільність сталевих виливків встановлено, що надлив газового тиску ефективніший, ніж надливи атмосферного тиску. Причому, незалежно від способу утеплення, надливи атмосферного тиску в умовах термостатування форм працюють практично з однаковою ефективністю.

В результаті аналізу даних про вплив термостатування оболонок на механічні властивості сталі 08X14H7МЛ встановлено, що механічні властивості сталі знаходяться на одному рівні незалежно від способу формування керамічних оболонок і відповідають вимогам ТУ. Тому у виробничих умовах зразки на механічні властивості для виливків, що одержуються в термостатах, можна заливати в незаформовані керамічні оболонки.

УДК 669.18:621.746:537.84

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАГНІТНОГО ВПЛИВУ НА СТРУМІНЬ МЕТАЛУ НА ДІЛЯНЦІ ПРОМІЖНИЙ КІВШ-КРИСТАЛІЗАТОР МБЛЗ**

**А. Ю. Семенко к. т. н., О. П. Верзілов к. т. н., Д. І. Гойда м. н. с.**

Наведено результати фізичного моделювання для вивчення ефективності конструкції комплектів постійних магнітів NdFeB в умовах безперервного розливання сталі. Проведено перевірку альтернативного енергозберігаючого способу, в рамках якого магнітне поле генерується за допомогою комплектів постійних магнітів.

За допомогою розробленої фізичної моделі, та розрахункових методів виконано комплексне дослідження для обліку і компенсації впливу на комплекти магнітів теплових втрат в зоні металопроводу (теплоізоляція), обліку розмагнічування, визначення оптимального розташування комплектів відносно металопроводу, відпрацювання методики використання комплектів постійних магнітів різної конфігурації для вивчення поведінки струменя розплаву в системі «стакан-дозатор-занурений стакан» в умовах накладення зовнішнього магнітного поля.

Проведено тестування для перевірки та уточнення результатів експериментів та вивчення впливу постійного магнітного поля на струмінь металу при різних діаметрах зануреного стакану, які становили 28, 30, 32, 34, 36 мм.

Перевірено розрахункові данні, які можуть забезпечити стабільний нерозривний струмінь розплаву за допомогою магнітного числа Гейлора ( $Ta < 41,3$  ламінарний перебіг Куэтта  $41,3 < Ta < 400$  – ламінарний перебіг з вихорами Гейлора,  $Ta > 1700$  – розрив струменя). Важливість отриманих даних обґрунтована тим, що розрив струменю розплаву, особливо з урахуванням діаметра зануреного стакану, є неприпустимим в умовах як безперервного, так і напівбезперервного розливання. За результатами встановлено оптимальне значення відстані між комплектом магнітів і стінки зануреного стакану.

Встановлено, що діапазон максимально можливого відтиснення струменя розплаву від стінки зануреного стакану: для стакану з внутрішнім діаметром 28 мм – від 0,7 до 3,5 мм (при відповідній відстані від полюсів магнітного пристрою до зовнішньої стінки стакану) 25% (7 мм) і 5% (1,4 мм) від його внутрішнього діаметра); для стакану з внутрішнім діаметром 36 мм – від 0,9 мм до 4,5 мм (при відповідній відстані від полюсів магнітного пристрою до зовнішньої стінки стакану 25% (9 мм) і 5% (1,8 мм) від його внутрішнього діаметра).

Зокрема, визначено, що при використанні магнітного поля, що обертається, з використанням комплекту постійних магнітів аксіального намагнічування без зазорів можливе закручування зовнішнього шару струменя, який становить 5 % від його діаметра при швидкості на вході у занурюваний стакан 4 м/с. Такий результат має забезпечити формування компактного струменя і зменшити його розбризкування та контакт з порожниною зануреного стакану.

### Екологічні проблеми чорної металургії

УДК 669.02/09:669.168.046.58.001.57

### ВИБІР ФАКТОРІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАРГАНЦЕВИХ ШЛАКОВИХ РОЗПЛАВІВ

В.С. Киричок аспірант, А.А. Надточій к.т.н., О.М. Гришин к.т.н.

Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро

При виробництві марганцевих феросплавів і подальшому розкисненню-легуванню сталі втрачається до 50% марганцю, що переходить в основному в шлак загострюючи проблеми екології та використання невідновлюваних ресурсів. Тому необхідний пошук вискоєфективних схем рециклінгу відходів і безвідходних технологій, що дозволяють повернути цінний хімічний елемент в металургійний переділ. Саме завдяки вивченню властивостей феросплавних шлаків та методів їх прогнозування можливо створити такі схеми.



Це надасть можливість створювати сприятливі умови для відновлювання зі шлаку цінних оксидів ( $MnO$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ), знизити витрати шихтових матеріалів та зменшити кількість непереробних відходів. Проведений аналіз впливу основності, а також оксидів  $MgO$  та  $Al_2O_3$  на рівноважний фазовий склад шлаку силікомарганцю. При збільшенні основності кількість вільного  $MnO$  збільшується, що полегшує процес відновлення марганцю, з  $SiO_2$  ж все навпаки - чим більше основність, тим менше його кількість у шлаку. Зміна кількості  $MgO$  майже не несе ніякого впливу на кількість вільного  $MnO$  чи  $SiO_2$ , а ось збільшення  $Al_2O_3$  призводить до зменшення кількості  $MnO$ , що ускладнює процес відновлення марганцю. Встановлено, що низька електропровідність відіграє позитивну роль в процесах відновлення, дозволяє збільшити енергетичний ККД технологічного процесу за рахунок максимальної концентрації потужності в дуговому вузлі, знизити енергозатрати. Знизити електропровідність рудновідновлювальної суміші можна вводом в її склад матеріалів, що містять оксиди з низькою електропровідністю  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  та інші.

Зниження в'язкості шлаку у виробництві феросплавів має позитивний вплив на швидкість і повноту відновних реакцій, визначає розмір корольків металу, що залишаються в шлаку, полегшує відділення крапель сплаву від шлаку, і тим самим створюються сприятливі умови для інтенсифікації процесу. Але для процесу довідновлення шлаку низька температура плавлення рудної суміші не є позитивним фактором. Розплавлена при температурах нижче температур відновлення, рудна частина буде віддалятися з високотемпературної реакційної зони не встигнувши прореагувати з відновником, що значно знизить ефективність процесу, тому добавки до складу шихти вапна і коксу повинні сприяти збільшенню температури її плавлення, а значить і поліпшення умов відновлення марганцю, що і підтверджують результати досліджень.

УДК 669.054.8

## **ЗМЕНШЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ШЛЯХОМ ОРГАНІЗАЦІЇ КОМПЛЕКСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСНИХ ЗАЛІЗОГРАФІТОВИХ ВІДХОДІВ МЕТАЛУРГІЇ**

**В.О. Маслов, д.т.н., Л.О. Дан, к.т.н., Л.О. Трофімова, к.т.н.**

**Приазовський Державний Технічний Університет, м. Дніпро**

Безперечні успіхи електromеталургії, водневої металургії суттєво знижують викиди у довкілля парникових газів. Водночас залишається ще чимало інших відходів металургійних підприємств, які потрапляючи до повітряного, водного басейнів, акумулюючись на полігонах, завдають істотної шкоди екології. До таких відходів можна віднести дисперсні залізографітові відходи (ЗГВ). У своєму складі вони мають графіт, оксиди заліза, металеве залізо та домішки. У великих кількостях вони утворюються всіх етапах виробництва чавуну: десульфурації, переливах в міксери і ковші тощо. Частина їх уловлюється системами аспірації та може бути успішно утилізована. На жаль на сьогоднішній день переважають технології, що дозволяють витягувати або вуглецеву або оксидну частину ЗГВ. Частина, що залишилася, знову перетворюється на відхід.

На підставі комплексних досліджень ЗГВ, що включали аналіз гранулометричного складу, морфології, мікроструктури та їх електрофізичних властивостей був зроблений висновок про те, що дисперсні ЗГВ мають значний потенціал застосування з точки зору поєднання в них магнітних властивостей і малого питомого електричного опору. Такий комплекс властивостей робить ЗГВ перспективним радіоекрануючим та радіопоглинаючим матеріалом.

Рівень магнітних властивостей вихідних ЗГВ відносно невисокий (питома намагніченість насичення,  $\sigma_s$ , знаходиться на рівні  $20 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$ ) при досить низькому питомому електричному опорі ( $\rho_v \approx 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).

Результати багаторічних досліджень дозволили розробити загальну технологічну схему комплексної переробки дисперсних ЗГВ. По-перше, враховуючи нерівномірний розподіл вуглецевмісних (немагнітних) і оксидних (магнітних) складових у фракціях різної крупності, ця схема включає розсівання вихідного матеріалу і виділення з нього дрібної, більш магнітної фракції. Вже завдяки цьому вдається підвищити рівень  $\sigma_s$ . По-друге, термічною обробкою магнітної фракції шляхом магнетизуючого випалу або карботермічногосамовідновлення питома намагніченість насичення збільшується до  $\sim 80 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$  у першому випадку та до  $\sim 180 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$  у другому.

Вуглецевмісна складова ЗГВ може самостійно використовуватися як сировина для отримання товарного графіту або вводиться в фракцію, що пройшла термічну обробку, для отримання заданого співвідношення  $\sigma_s$ - $\rho_v$ . Магнітна фракція може використовуватися як самостійний радіоекрануючий та радіопоглинаючий матеріал або як наповнювач композиційних покриттів, що мають такі властивості.

УДК 669.09.26

## ПРО ВПЛИВ МЕТАЛУРГІЇ НА ЗМІНУ КЛІМАТУ

**В. П. Руських<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, Ю. В. Хавалиць<sup>1</sup>, Р. Ю. Кирсанов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (Маріуполь, Україна)

Клімат змінюється. Наслідки зміни клімату – це не поступове потепління, а надзвичайні природні явища: посухи, урагани, повені, шторми, смерчі.

Клімат змінюється. Наслідки зміни клімату – це не поступове потепління, а надзвичайні природні явища: посухи, урагани, повені, шторми, смерчі.

Наукові дослідження показали, що сучасне потепління відбувається через підвищення концентрації парникових газів в атмосфері землі. До парникових газів відносять такі гази як вуглекислий газ, метан, окис азоту.

Першим міжнародним документом, спрямованим на скорочення викидів парникових газів, був Кіотський протокол – міжнародна угода, укладена з метою скорочення викидів парникових газів у повітря. Головна мета угоди: стабілізувати рівень концентрації парникових газів в атмосфері на такому рівні, який не допускав би небезпечного антропогенного впливу на кліматичну систему планети. Для кожної країни було встановлено квоту на викиди парникових газів. У тому випадку, якщо держава викидає в атмосферу парникових газів менше виділеної квоти, вона може продати надлишки іншій державі, яка тим самим отримує можливість викидати більше парникових газів. Кіотський протокол став першою глобальною угодою про охорону навколишнього середовища, засновану на ринковому механізмі регулювання – механізмі міжнародної торгівлі квотами на викиди парникових газів.

У 2015 році в рамках Конвенції ООН про зміну клімату 196 країн підписали Паризьку кліматичну угоду, згідно з якою всі країни, незалежно від рівня їх економічного розвитку, зобов'язалися скоротити викиди в атмосферу парникових газів.

Перевищення глобального потепління на 1,5 градуса Цельсія (що МГЕІК визначила як поріг для запобігання гіршим наслідкам зміни клімату) означатиме сильнішу посуху, екстремальну спеку, повені та бідність, скорочення чисельності видів (включаючи масове вимирання коралових) загострення нестачі продовольства та лісових пожеж.

Необхідно скоротити виробництво, споживання викопного палива, активізуючи використання чистих, відновлюваних джерел енергії та енергоефективних технологій.

Викиди  $\text{CO}_2$ , що пов'язані з діяльністю людини (антропогенні фактори) становлять 9,1% загальних викидів вуглекислоти в атмосферу, але вони вносять порушення балансу між надходженням  $\text{CO}_2$  в атмосферу та поглинанням Землею. Антропогенна емісія збільшує

концентрацію вуглекислого газу в атмосфері, що, ймовірно, є головним фактором зміни клімату.

Загальна кількість антропогенних викидів оцінюється в 22413,2 млн. т, у тому числі 49,3% енергетика, 20,0% автотранспорт, 7,3% металургія, 23,4%.

Викиди CO<sub>2</sub> світовою металургією 2001 року оцінюються 1620 млн т, зокрема електрометалургія 2,2%, киснево-конвертерне виробництво 4,0 %, мартенівське виробництво 0,6 %. Доменне виробництво 51,2%, інші 23,4%.

Зменшення викидів CO<sub>2</sub> металургією може бути впровадженням виробництва заліза прямим шляхом (DRI) з використанням водню як відновник та призвести до скорочення викидів діоксиду вуглецю в атмосферу на 740 млн т на рік до 2050 року.

Воднева технологія стане конкурентоспроможною не раніше 2030 року. Такого висновку дійшли сталеливарні корпорації Arcelormittal і thyssenkrupp.

Для цього вартість відновлюваного водню повинна знизитися до 2,2 долара за кілограм, а ціни на вугілля, що коксується, бути не нижче 310 доларів за тону.

За іншими оцінками в цілому по світу внесок металургії в парникові гази дають цифру в інтервалі 2.4-3.6 % у загальній емісії вуглекислого газу промисловістю, що на порядок нижче у вкладі світового транспорту і тим більше світової енергетики.

УДК 622.22.553.4:519.85

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ КІНЦЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ ПІД ЧАС РОЗРОБКИ РОДОВИЩ БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ**

**А.О. Хорольський, к.т.н.**

**Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова  
Національної академії наук України, м. Дніпро**

Особливістю ефективної експлуатації родовищ благородних металів є оптимальне проектування процесів, що супроводжують видобуток, збагачення, переробку, які направлені на отримання кінцевої продукції у вигляді металу. Можна виділити кілька проблем, що формують системні принципи та методичні підходи при розробці родовищ благородних металів:

1) Вибір інструменту прийняття рішень. Насьогодні, на практиці застосовується понад 100 інструментів прийняття рішень. Спільний облік якісних та кількісних показників видається складним.

2) Комплексність. Обираючи інструмент, необхідно враховувати економічні, екологічні, технологічні, соціальні, законодавчі, регіональні аспекти. Отримане рішення має бути економічно доцільним, екологічно доцільним, враховувати зв'язки між підприємствами, а також регіональні особливості, крім того, задовольняти вимоги чинного законодавства.

3) Цілісність та ієрархічність. Це передбачає взаємозв'язок між усіма етапами, тому що ефективне вирішення одного завдання не може гарантувати підвищення ефективності всього технологічного процесу в комплексі. Таким чином, необхідно вибирати оптимальне рішення на кожному етапі і лише після цього переходити до вирішення нового завдання.

4) Наявність системи підтримки прийняття рішень. Мається на увазі отримання програмних засобів, які дозволять підвищити розмірність завдань, інтерпретувати отримані результати, впровадити їх у виробництво.

5) Обґрунтування меж області раціонального проектування включає визначення параметрів, при яких буде відтворено заданий обсяг вилучення корисних копалин шляхом встановлення оптимальних зв'язків при експлуатації технологічних схем шляхом вибору та оцінки параметрів. При цьому процес відпрацювання родовища, а також кінцевий результат у вигляді об'єму вилученої корисної копалини, розглядається як проміжна ланка у системі генерації кінцевої продукції.

При проектуванні технології відпрацювання родовищ з корисними копалинами слід поруч із економічними чинниками врахувати і екологічні. Це реалізується шляхом побудови економічної та екологічної стратегії освоєння. Порівнюються між собою найбільш економічно переважна та екологічно безпечна технологія освоєння. Спільний облік екологічної та економічної стратегії дозволяють для економічно переважної передбачити додаткові заходи щодо мінімізації техногенного навантаження на довкілля у регіонах, де ведеться видобуток корисних копалин.

Оптимізація процесів, що супроводжують відпрацювання родовищ корисних копалин відбувається за рахунок зміни стану запасів. Це реалізується з урахуванням побудови декомпозиційної схеми, яка враховує взаємозв'язок між альтернативними технологічними рішеннями. В якості вершин приймаються альтернативні технології, а як відстані між вершинами значення оптимізаційного параметра для зазначеної технології. За допомогою алгоритмів оптимізації знаходиться найкоротша відстань від початкової вершини до кінцевої. Найкоротшій відстані відповідатиме оптимальне рішення. Запропоновано для оптимізації технологічних процесів застосовувати алгоритми Дейкстри та Флойда, а для розробки стратегій освоєння та врахування екологічних аспектів при освоєнні родовищ шляхетних металів – алгоритм Беллмана.

В результаті реалізації наведених підходів можна отримати «Паспорт розробки родовища корисних копалин». У цьому паспорті будуть вказані параметри, що дозволяють інтенсифікувати процес видобутку корисних копалин із мінімальною собівартістю видобутку та мінімальним ступенем техногенного навантаження на довкілля.

УДК 622.281.406:502.1

## **ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СУСПЕНЗІЙ-ІНГІБІТОРІВ НА ОСНОВІ НАТРІЄВОЇ ГРУПИ ДЛЯ ОБРОБКИ ВІДВАЛЬНОЇ МАСИ ВІДХОДІВ ВУГЛЕВИДОБУТКУ**

**Чоботько І.І. провідний інженер**

**Відділення фізики гірничих процесів, Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова  
НАН України, м. Дніпро**

Самозаймання відвальної маси відходів вуглевидобутку відбувається за умови доступу кисню та вологи всередину пористої структури відвальної маси в тілі породних відвалів й призводить до утворення теплових зон концентраторів горіння температура котрих становить від 80 до 1200<sup>0</sup>С, які негативно впливають на рідкоземельні метали (РЗМ), що містяться у відвальній масі створюючи термічну деструкцію наслідком якої є повне руйнування РЗМ та їх повна непридатність до застосування у металургійній промисловості. Окремий інтерес для металургійної галузі представляє отримання алюмінію 15–20 г/т, галію при вмісті 100 г/т, скандію 10–20 г/т. Тому, при застосуванні суспензій-інгібіторів можливо досягти не тільки ліквідації процесів горіння відвальної маси а й зберегти вподальшому РЗМ при їх повній консервації у складі відвальної маси.

Для дослідження було відібрано зразки відвальної маси відходів вуглевидобутку у кількості 3-х проб, оскільки вони містять корисні хімічні елементи, які необхідні в металургійній промисловості:  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ . Відібрані зразки були оброблені суспензіями з використанням добавок содових розчинів на основі натрію:  $NaHCO_3$ ,  $Na_2CO_3$  та  $NaOH$ .

Порядок проведення експериментальних досліджень здійснювався один раз. загальні параметричні характеристики фракцій зразків відвальної маси не перевищували 15–30 мм, питома вага всіх зразків не перевищує 3–14 г. Приготування суспензій відбувалось наступним чином: на кожному з трьох мінзурок об'ємом 100 мл заливалася дистильована вода та додавалось по 50 г.  $NaHCO_3$ ,  $Na_2CO_3$  та  $NaOH$  в результаті чого отримали суспензії з концентрацією натрієвих агентів 50%. Обробка зразків відвальної маси здійснювалася звичайним

пульверизатором (повноконусний факел зрошування з мінімальними та максимальним кутами зрошування  $150-125^{\circ}$ , теоретична ширина зрошування становила 35 мм) при відстані зрошування 10 см трьома видами натрієвих розчинів: гідроксидом, гідрокарбонатом та карбонат натрію. готова оброблена відвальна маса витримувалася в приміщенні на протязі 30 діб при середній температурі повітря  $20-21^{\circ}\text{C}$ . Для подальшої обробки результатів отриманого експерименту використовувалися загальні методи статистичного аналізу. при перевірці отриманих даних на однорідність був обраний метод аналізу з застосуванням параметричного t-критерію Стьюдента. даний метод аналізу дозволяє виключити з вибірки сумнівні варіанти, котрі можуть бути помилковими й не належати до генеральної сукупності даних.

Було здійснено розподіл критеріїв Стьюдента на основі пропорційних розрахунків за ефективністю обробки відвальної маси суспензіями на основі натрієвих розчинів. Найбільшу ефективність при взаємодії з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  отримано при застосуванні суспензії на основі гідроксидом натрію –76 %; на другому місці є обробка суспензією карбонатом натрію хімічного елементу  $\text{K}_2\text{O}$  –73 %; на третьому місці є обробка суспензії гідроксидом натрію хімічного елементу  $\text{SiO}_2$  –56 %.

Аналізуючи дані за можна зробити висновок, що відбулась значна статистична достовірність при обробці гідроксидом натрію ( $\text{NaOH}$ ) відвальної маси. Отримані результати дозволяють стверджувати, що при обробці суспензією на основі гідроксиду натрію  $\text{NaOH}$  будуть мати позитивні результати при ліквідації окислювальних процесів у відвальній масі за участю сірки та піриту, які є агентами самозаймання відвальної маси, що дозволить зберегти рідкоземельні метали для їх подальшого використання у металургійній промисловості. Таким чином ми зможемо вирішити дві задачі: перша зліквідації горіння відходів вуглевидобутку з подальшим збереженням РЗМ для їх використання у майбутньому в металургійній промисловості; друга задача полягає у використанні відходів вуглевидобутку, як потенційного сховища корисних РЗМ для потреб металургійної промисловості