

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ



**Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАН України)
Український державний університет науки і технологій МОН України
Дніпровський державний технічний університет МОН України**

Збірник тез

**ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
«НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»**

присвячена 85-річчю

Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України



DOI: 10.52150/2522-9117-2024-conferens

**19-20 листопада 2024
м. Дніпро**

Організаційний комітет конференції:

Бабаченко О. І. (голова) – чл.-кор. НАН України, д.т.н., с.н.с., директор ІЧМ НАН України;
Парусов Е. В. (заступник голови) – д.т.н., с.н.с., заступник директора ІЧМ НАН України;
Гармаш Л. І. (секретар) – к.т.н., учений секретар ІЧМ НАН України;
Подольський Р. В. (заступник секретаря) – докт. філ., голова Ради молодих вчених, наук. співроб. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей ІЧМ НАН України;
Голубенко Т. М. (заступник секретаря) – к.т.н., старш. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАН України.

Науковий комітет конференції:

Камкіна Л. В. – д.т.н., проф., декан факультету Металургійних процесів та хімічних технологій ННІ «Інституту промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій МОН України;
Чернятевич А. Г. – д.т.н., проф., пров. наук. співроб. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАН України;
Тогобицька Д. М. – д.т.н., проф., пров. наук. співроб. відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів ІЧМ НАН України;
Муравйова І. Г. – д.т.н., с.н.с., пров. наук. співроб. відділу металургії чавуну ІЧМ НАН України;
Луценко В. А. – д.т.н., с.н.с., пров. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАН України;
Дейнеко Л. М. – д.т.н., проф., зав. кафедрою «Матеріалознавства та термічної обробки металів» ННІ «Інституту промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій МОН України;
Сігарьов Є. М. – д.т.н., проф., зав. кафедрою «Металургії чорних металів та обробки металів тиском» Дніпровського державного технічного університету МОН України;
Самохвалов С. Є. – д.т.н., проф., старш. наук. співроб. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАН України;
Грішин О. М. – д.т.н., доц., заступник декана Металургійного факультету, доцент кафедри «Теоретичних основ металургійних процесів» ННІ «Інституту промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій МОН України;
Приходько І. Ю. – д.т.н., с.н.с., зав. відділу процесів і машин обробки металів тиском ІЧМ НАН України;
Кононенко Г. А. – д.т.н., ст. досл., зав. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей ІЧМ НАН України;
Меркулов О. Є. – д.т.н., с.н.с., старш. наук. співроб. відділу металургії чавуну ІЧМ НАН України;
Борисенко А. Ю. – д.т.н., с.н.с., старш. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАН України;
Баюл К. В. – д.т.н., ст. досл., старш. наук. співроб. відділу технологічного обладнання та систем управління ІЧМ НАН України.

Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість

Семенов Ю. С. Дослідження раціональної витрати пиловугільного палива при погіршенні якісних характеристик коксу.....	6
Семірягін С. В., Смірнов О. М., Семенко А. Ю., Скоробагатько Ю. П. Малі металургійні заводи (ММЗ) – шлях відновлення сталеплавильної галузі.....	7
Журавльова С. В., Марко А. Ф., Круглов А. М., Яковина Д. О., Ремесло О. О. Використання вуглецьмістячих матеріалів рослинного походження при виробництві сталі.....	8
Селівьорстов В. Ю., Доценко Ю. В., Зеленський К. А. Використання газового тиску для витиснення розплаву із сифонної ливникової системи крупних сталевих виливків і злитків.....	9
Корнілов Б. В., Чайка О. Л., Муравйова І. Г., Гармаш Л. І., Москалина А. О., Лебідь В. В. Аналіз ефективності існуючих та перспективних технологій, спрямованих на зменшення викидів CO ₂ з доменної печі.....	10
Піптюк В. П., Самохвалов С. Є., Греков С. В. Дослідження впливу кількості добавки при позапічній обробці сталі на гідродинамічні і теплові умови ковшової ванни.....	11
Юшкевич П. О. Сучасний стан та перспективи киснево-конвертерного виробництва сталі в Україні..	12
Чайка О. Л., Муравйова І. Г., Меркулов О. Є., Іванча М. Г., Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Корнілов Б. В. Розробка науково обґрунтованих технологічних положень використання водню у доменній печі.....	13
Вишняков В. І., Шербачов В. Р., Білошапка О. О., Єрмоліна К. П. Використання комплексної математичної моделі формування багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів, їх завантаження в бункер безконусного завантажувального пристрою, вивантаження з бункера та розподілу на поверхні засипу.....	14
Молчанов Л. С., Голуб Т. С., Арендач Н. А. Оцінка повердінки домішок при продувці металевій ванни спумішкою кисень – нейтральний газ через донний продувний блок.....	15
Голуб Т. С., Молчанов Л. С. Дослідження впливу високовольної активізації кисневого потоку на ймовірність перебігу хімічних реакцій за участю кисню.....	16
Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Голуб Т. С. Підвищена частка металобрухту в шихті кисневих конверторів, як основа підвищення технологічних та екологічних показників виробництва.....	17
Семикін С. І., Голуб Т. С., Дудченко С. О., Вакульчук В. В. Високотемпературне дослідження процесу продувки металевого розплаву кисневим струменем, активізованим електричним розрядом....	18
Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Муравйова І. Г., Чайка О. Л., Лопатенко К. П., Болденко М. Г. Дослідження процесів відновлення в доменній печі при використанні водневмісних газів.....	19

Електрометалургія

Кононенко Г. А., Аджамський С. В., Подольський Р. В. Дослідження впливу параметрів виготовлення за технологією LPBF на механічні властивості сплаву на основі алюмінію.....	20
Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Барановська О. Є., Балаханова Т. В. Мікроструктура Inconel 718 в залежності від корекції фокусної відстані в деталях, виготовлених методом лазерного плавлення в порошковому шарі.....	21
Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Дослідження впливу механічної постобробки на кінцеві механічні властивості зразків зі сталі 316L, виготовленої за SLM – технологією.....	22

Технології позапічної обробки чавуну та сталі

Тогобицька Д. М., Белькова А. І., Степаненко Д. О., Поворотня І. Р., Греков С. В. Генерація комплексних показників для прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів між кінцевими розплавами після доведення сталі в агрегаті ківш-піч.....	23
Смірнов О. М., Ворон М. М., Тимошенко А. М., Скоробагатько Ю. П., Шваб С. Л., Семенко А. Ю. Низькочастотна вібрація під час затвердіння литих злитків Fe-28Mn-12Al-0,9Si-1,4C сталі.....	24
Дутній Р. Б., Журавльова С. В., Бойко М. М., Трещов В. Є., Білий Б. Ю. Застосування відходів виробництва алюмінію при позапічній обробці сталі.....	25

Рубан В. О., Стоянов О. М., Синегін Є. В. Робота електродугового пристрою при позапічній обробці сталі на установці «ківш-піч».....	26
Шевченко А. П., Маначин І. О., Єлісєєв В. І., Кисляков В. Г., Рибальченко М. О. Моделювання процесів взаємодії компонентів двофазного потоку, введеного в чавун, при інжекційній десульфурації.....	27
Танчев О. А., Журавльова С. В., Журавльова І. В., Аржанцев Є. О. Особливості десульфурації сталей із наднизьким вмістом сірки.....	28
Кисляков В. Г., Єлісєєв В. І., Маначин І. О., Руденко О. Л., Петруша В. П. Дослідження газодинамічних закономірностей інжектування порошкової суміші на «холодних» моделях.....	29

Автоматизація та сучасні методи контролю металургійних процесів та якості металургійної продукції

Михайловський М. В., Шибакінський В. І., Зінченко М. Д. Система автоматичного управління енергорежимом дугової сталеплавильної печі АТ «Нікопольський завод феросплавів».....	30
Жульковський О. О., Жульковська І. І. Інформаційно-моделююча система прогнозування стійкості верхніх конвертерних фурм.....	31

Металознавство та термічна обробка сталі

Олійник Е. В., Парусов Е. В., Чуйко І. М. Методика прогнозного визначення деформаційного зміцнення низьковуглецевої Cr-Mo-V сталі під час виготовлення зварювального дроту.....	32
Борисенко А. Ю., Балаханова Т. В. Зв'язок хімічної мікронеоднорідності зі структурою пластинчатого графіту в сірому чугуні.....	33
Луценко В. А., Голубенко Т. М., Луценко О. В., Сівак Г. І. Особливості структуроутворення низьковуглецевої сталі марки SAE при охолодженні з прокатного нагріву.....	34
Губенко С. І., Парусов Е. В., Чуйко І. М., Парусов О. В. Зносостійкість колісної сталі, яка піддана лазерній обробці.....	35
Губенко С. І., Беспалько В. М. Проблеми низької технологічної пластичності сталі 04X14T3P1Ф при виробництві труб для атомної енергетики.....	36
Олійник Е. В., Парусов Е. В., Борисенко А. Ю. Зв'язок фрактальної розмірності із морфологією та розподілом графітових включень у сірих чавунах.....	37
Соболенко М. О., Романова Н. С. Про напрями інтенсифікації сфероїдизації перліту у борвмісних сталях для холодної висадки.....	38
Борисенко А. Ю., Барановська О. Є. Вплив технологічних факторів виробництва литих заготовок поршневих кілець із сірого чавуну на їх структуру і твердість.....	39
Пархомчук Ж. В., Вейс В. І., Железняк О. В. Сірий чавун легований високоентропійним сплавом... 40	40
Бобирь С. В., Борисенко А. Ю., Левченко Г. В. Нерівноважний термодинамічний аналіз процесу графітизації чавунів.....	41
Бабаченко О. І., Любека І. М. Розвиток технології отримання акустооптичних кристалів на основі діоксиду телуру.....	42
Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Аналіз підходів щодо забезпечення високої надійності та довговічності залізничного руху.....	43
Поворотня І. Р., Сафронова О. А., Подольський Р. В., Олійник Е. В. Вплив хімічного складу на структуру і твердість сталей для залізничних осей.....	44
Кононенко Г. А., Кімстач Т. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Технологічні аспекти отримання безкарбідного бейніту в товстолистовому металопрокаті.....	45

Прогресивні технології обробки металу тиском

Шибакінський В. І., Рибальченко М. О., Михайловський М. В., Зінченко М. Д. Формування температури прокатки за довжиною смуги.....	46
Болюбаш Є. С. Визначення глибини проникнення кумулятивного струменю в перешкоду змінної товщини.....	47

Моделювання та оптимізація технологічних процесів

Тогобицька Д. М., Поворотня І. Р., Кукса О. В., Греков С. В., Ходотова Н. Є. Прогнозні моделі властивостей металодобавок, як запорука раціонального їх використання на УКП.....	48
Воробей С. О. Комплекс математичних моделей прогнозування параметрів гарячої прокатки та показників якості штабового і сортового прокату.....	49
Вереньов В. В. Розвиток способів діагностики технічного стану обладнання прокатних клітей в перехідних режимах роботи.....	50
Молчанов Л. С., Голуб Т. С., Семикін С. І. Взаємозв'язок особливостей холодного моделювання та інтерпретації отриманих результатів.....	51
Амбражей М. Ю., Парусов Е. В. Методика розрахунку параметрів термічного зміцнення катанки з вуглецевої сталі на засадах моделювання процесу перерваного загартування з самовідпуском.....	52
Семенко А. Ю., Вейс В. І., Пархомчук Ж. В., Ліхацький Р. Ф., Ліхацький І. Ф. Чисельне моделювання процесів лиття та кристалізації TWIP сталі низької густини.....	53
Єгоров О. П., Рибальченко М. О., Маначин І. О. Оптимізація режиму роботи вихідної сторони дрібносортних станів.....	54
Аржанцев Є. О., Мамешин В. С., Нізяєв К. Г., Журавльова С. В. Подібність при холодному моделюванні верхнього продування у кисневих конверторах.....	55

Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість

УДК 669.1.061.6

ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ВИТРАТИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ПРИ ПОГІРШЕННІ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОКСУ

Ю. С. Семенов к.т.н., с.н.с.

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

В останні роки у доменному виробництві України суттєво погіршується якість коксу. Це, насамперед, пов'язане з дефіцитом коксівного вугілля. Так, наприклад, у доменному цеху ПрАТ «Камет-сталь» середньорічне значення показника гарячої міцності коксу CSR за 7 років зменшилося від 53,37 % у 2018 р. до 41,45 % у 2024 р., показника реакційної здатності CRI – збільшилося від 32,48 % до 41,67 %, вмісту сірки збільшилося від 0,58 % до 0,92 %, вмісту фракції +80 мм збільшилося від 7,62 % до 9,35 %, кількість золи та показники барабанної міцності M10 та M25 суттєво не змінилися [1].

Низька якість коксу негативним чином впливає як на техніко-економічні показники процесу, так і зменшує можливості застосування в технології заміників коксу: коксового горіху, пиловугільного палива (ПВП) та природного газу.

Виконано аналіз зміни питомих витрат коксового еквіваленту, який є сумою питомих витрат коксу (К), коксового горіху ($k_1 \cdot \text{КО}$) та ПВП ($k_2 \cdot \text{ПВП}$), де $k_{1,2}$ – коефіцієнти заміни коксу [2] при різних питомих витратах ПВП для періоду роботи ДП-1М та ДП-9 ПрАТ «Камет-сталь» протягом 50 діб на початку 2024 р. Питома витрата ПВП у цей період змінювалася від 60 до 120 кг/т чавуну. ПВП у досліджуваному періоді складалося з 100% вугілля австралійського походження (леткі речовини – 13,6 %, сірка – 0,63 %, зола – 11,68 %, вуглець – 87 %).

Результати аналізу показали, що мінімальна питома витрата коксового еквіваленту для ДП-1М становила – 538 кг/т при питомій витраті ПВП – 78 кг/т, при збільшенні питомої витрати ПВП до 120 кг/т спостерігалось збільшення як питомої витрати коксу, так і коксового еквіваленту (552–573 кг/т). Для ДП-9 результати аналізу аналогічні: мінімальна питома витрата коксового еквіваленту становила – 557 кг/т при питомій витраті ПВП – 81 кг/т, при збільшенні питомої витрати ПВП до 110 кг/т спостерігалось збільшення як питомої витрати коксу, так і коксового еквіваленту (563–575 кг/т).

Таким чином, отримані результати свідчать про погіршення ступеня згоряння ПВП при використанні коксу з низькими якісними характеристиками, так CSR коксу в аналізованому періоді становило: 42,6 % для ДП-1М та 41,6 % для ДП-9, у середньому. Рекомендована доменному цеху величина питомої витрати ПВП – 80 кг/т, як гранично раціональна була прийнята для подальшого застосування.

Слід зазначити, що у другій половині 2024 р. з економічної точки зору була застосована практика використання суміші вугілля у ПВП з додаванням вугілля довгополуменево газової (ДГ) марки. Оскільки вугілля марки ДГ відрізняється від вугілля, близького за показниками до слабкоспікливого, значною кількістю летких речовин, низьким вмістом вуглецю та високим вмістом сірки, застосування такої суміші вугілля знижує повноту згоряння ПВП та потребує заходів, направлених на поліпшення дренажної здатності горна [1].

Літературні джерела

1. Semenov Yu. S., Horupakha V. V., Alter M.A., Vashchenko S. V. et al. Efficiency of washing blast furnace hearth in case of pulverized coal injection. *AISTech 2022 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*, 16–18 May 2022, Pittsburgh, Pa., USA, pp. 219–230. <https://doi.org/10.33313/386/025>
2. Tovarovskiy I. G. Normative estimation of parameters of the blast-furnace smelting. *Advances in Materials*. 2017. Vol. 6. Iss. 4. P. 38-44. <https://doi.org/10.11648/j.am.20170604.1>

МАЛІ МЕТАЛУРГІЙНІ ЗАВОДИ (ММЗ) – ШЛЯХ ВІДНОВЛЕННЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

**С. В. Семірягін к.т.н., доц., О. М. Смірнов д.т.н., проф., А. Ю. Семенко к.т.н., с.н.с.,
Ю. П. Скоробагатько к.т.н., с.н.с.**

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

Розглянуто нові технологічні процеси, які відповідають сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки, а також забезпечать найкращі можливості для відновлення сталеплавильної галузі України та подолання її технічного відставання. Рішення полягає у пріоритетному розвитку електросталеплавильного виробництва в умовах малих металургійних заводів (ММЗ). Такі технології за мінімальних матеріальних, енергетичних та екологічних витрат можна застосовувати як у «великій» металургії, що виробляє товарну продукцію, так і у «малій» металургії при машинобудівному комплексі. Розвиток концепції малих металургійних заводів сприятиме відбудові регіональної інфраструктури, створенню нових робочих місць, надходженню коштів до місцевих бюджетів та інше. Вихідними шихтовими матеріалами ММЗ є скрап, металізована сировина і рідкий чавун (до 35-40 % загальної маси шихти). Продукція ММЗ включає переважно тонкий гарячекатаний лист ливарно-прокатних модулів, квадратну та круглу сортову заготовку або затребувані спеціальні профілі прокату, різноманітні споживчі металеві вироби, зокрема великі ковальські зливки [1].

Літературні джерела

1. Смірнов О. М., Тімошенко С. М., Нарівський А. В., Семірягін С. В., Осипенко В. В., Скоробагатько Ю. П. Сталь України: відновлення та інновації. Київ : Наукова думка, 2023. 268 с.

ВИКОРИСТАННЯ ВУГЛЕЦЬМІСТЯЧИХ МАТЕРІАЛІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ

С. В. Журавльова к.т.н., доц., А. Ф. Марко, А. М. Круглов, Д. О. Яковина, О. О. Ремесло

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Біомаса може відігравати важливу роль у декарбонізації чорної металургії. Використання біомаси в металургійних процесах може бути направлено на вирішення низки актуальних питань: утилізація відходів переробки біомаси; скорочення витрат кам'яного вугілля і природного газу в металургійних процесах; скорочення викидів шкідливих газів; отримання вуглецевих матеріалів з кращими характеристиками за існуючі аналоги [1, 2].

В роботі розглядається використання альтернативної сировини: лущиння соняшнику, стебла соняшнику, кукурудзи та соломи у якості навуглецьовувачів сталі. Усі ці біоматеріали потребують специфічної технології підготовки перед використанням для навуглецьовування сталі. Збільшення частки перспективних високоміцних сталей в загальному обсязі виробництва сталі, які в цілому мають вищий вміст вуглецю ніж звичайні, низьковуглецеві сталі, збільшить використання навуглецьовувачів та підвищить вимоги щодо їх якості. Більш того, використання біоматеріалів дозволить додатково зменшити викиди діоксиду вуглецю у навколишнє середовище [3].

Літературні джерела

1. Коверя А. С., Кеуш Л. Г. Отримання металургійного палива і відновників шляхом копіролізу кам'яного вугілля і рослинної біомаси. Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії : колективна монографія. У двох книгах. Книга перша / Під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю.С. Пройдака. Дніпро : Нова ідеологія, 2017. С. 49–53.

2. Smirnov O. M., Timoshenko S. M., Narivskiy A. V. Renovation and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and Green Deal. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. No. 4. P. 21–38.

3. Zhuravlova S. S., Marko A., Boiko M., Tanchev O., Mameshyn V. The use of agricultural waste in steel production. *Croatian metallurgical society (CMS) – 17th international symposium of croatian metallurgical society SHMD 2024 materials and metallurgy book of abstracts metallurgy.* 2024. Vol. 63. No. 2. P. 312.

ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОВОГО ТИСКУ ДЛЯ ВИТИСНЕННЯ РОЗПЛАВУ ІЗ СИФОННОЇ ЛИВНИКОВОЇ СИСТЕМИ КРУПНИХ СТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ І ЗЛИТКІВ

В. Ю. Селівьорстов д.т.н., проф., Ю. В. Доценко к.т.н., доц., К. А. Зеленський

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Технологічні особливості запропонованих способів полягають в герметизації сифонної ливникової системи крупних сталевих виливків і злитків від навколишнього середовища за рахунок шару затверділого металу та наступний газодинамічний вплив.

Введення газу в приведені конструкції пристроїв по одному з варіантів проводиться з використанням контейнера-холодильника з фіксованою кількістю речовини, яка утворює газ при нагріві. У іншому варіанті здійснюється регульована подача газу від зовнішнього джерела з необхідними значеннями тиску [1]. Розроблені конструкції пристроїв та реалізація їхньої роботи можуть бути легко вбудовані в діючі технологічні процеси [2]. Реалізована також можливість занурення пристрою в рідку сталь у разі попадання шлаку в стояк.

На прикладі сталевих виливків «плита підштампова» визначені параметри реалізації зазначених технологічних процесів. Проведений розрахунок охолодження виливків у формі, тривалість якого складає ~ 177 год. Виконані розрахунки кількості і складу речовин, при нагріві яких виділяється достатній об'єм газу для витиснення розплаву із стояка показали, що для витиснення сталі із стояка заввишки 2,5 м при створенні тиску на рівні ~ 0,3 МПа парафіну необхідно – 6,3 г, а суміші карбонату кальцію з вуглецем в 13 разів більше – 80 г. Встановлено, що застосування суміші карбонату кальцію з вуглецем менш технологічне і ефективне в порівнянні з парафіном (твердим граничним вуглеводнем). Головна його перевага – незалежність від тиску реакції термічного розкладання (реакція розкладання парафіну необоротна, що робить роботу пристрою стабільнішою).

За результатами аналізу технологічних особливостей роботи різних конструкцій пристроїв, що забезпечують газодинамічне витиснення сталі із сифонної ливникової системи встановлено, що для крупних виливків та злитків при використанні сифонних вогнетривких припасів найбільш прийнятною є конструкція пристрою з регульованою подачею газу. Окрім надійності формування затверділого шару в сифонній ливниковій системі, дана конструкція пристрою забезпечує ліквідацію можливих нещільностей по роз'єму вогнетривких трубок за рахунок можливості повернення рідкого металу в стояк. Після затвердіння нового шару металу і повної герметизації ливникової системи від навколишнього середовища знов здійснюється витиснення розплаву у виливок або злиток.

Літературні джерела

1. Селівьорстов В. Ю., Селівьорстова Т. В. Перспективи використання комплексних технологій газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі. *Системні технології* : регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро, 2020. Вип. 5 (130). С.122–143. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-130-2020-14>
2. Селівьорстов В. Ю., Селівьорстова Т. В. Розрахункові схеми та інформаційні технології для визначення технологічних параметрів газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі. *Сучасні проблеми металургії* : науковий вісник. 2015. № 18 (2015). С. 55–64.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ІСНУЮЧИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, СПРЯМОВАНИХ НА ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ CO₂ З ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

**Б. В. Корнілов к.т.н., О. Л. Чайка к.т.н., с.н.с., І. Г. Муравйова д.т.н., с.н.с.,
Л. І. Гармаш к.т.н., А. О. Москалина к.т.н., В. В. Лебідь к.т.н.**

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова 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 різних паливних добавок: водню, пиловугільного палива, природного, коксового, угарного газу та синтез-газу, а також застосування металодобавок, пластику, технічного кисню та азоту, збільшення температури дуття, зменшення теплових втрат, поліпшення газорозподілу 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 CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки.

Одним з перспективних напрямів в сучасному доменному виробництві є застосування очищеного від CO₂ колошникового газу, який представляє собою комбінацію водню, угарного газу та азоту. Дана суміш газів в світовій практиці носить назву синтез-газу. Згідно з літературними даними синтез-газ отримують з некоксованого вугілля з великим вмістом летючих, використання якого дозволить зменшити собівартість виробництва чавуну, за рахунок зменшення витрати коксу в доменній печі, а за великої долі водню – знизити викиди CO₂ в доменному виробництві.

Встановлено, що викиди CO₂ в доменному виробництві можна знизити на 25-30 % за рахунок внесення змін до технології доменної плавки. Реалізація проектів декарбонізації виробництва визначається інвестиціями, сировинною та енергетичною базою металургійного підприємства, рівня існуючої технології доменної плавки. В перспективі зменшення викидів CO₂ за рахунок застосування водню та водневмісних паливних добавок є найбільш перспективним, але зараз є 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 CO₂ та зміни витрати коксу та виробництва чавуну при використанні пиловугільного палива з іншими паливними добавками, та їх комбінацій.

Обмежувочими чинниками вдування різних 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 CO₂ до 10 % і більше та, в цілому, покращення техніко-економічних показників плавки.

Застосування чистих металодобавок дає суттєвий ефект щодо зменшення викидів CO₂, який можна порівняти з вдуванням чистого водню, але лімітований їх наявністю та ціною. Якщо при отриманні чистої металодобавки застосовується вуглець, кількість викидів CO₂ на металургійному підприємстві не зменшиться.

Використання пластику в доменній печі дозволить не тільки зменшити витрату коксу та викиди CO₂ з доменної печі, а й утилізувати його, зменшивши при цьому негативний вплив на екологію Землі.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ДОБАВКИ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ НА ГІДРОДИНАМІЧНІ І ТЕПЛОВІ УМОВИ КОВШОВОЇ ВАННИ

В. П. Піптюк к.т.н., с.н.с., С. Є. Самохвалов д.т.н., проф., С. В. Греков

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

В останні десятиліття активно досліджували вплив низки постійних та змінних факторів на ефективність процесів, що відбуваються у сталерозливному ковші під час позапичної обробки сталі. Серед них визначено вплив ємкості ковша, маси металевого розплаву, хімічного складу сталі, температури металевого розплаву, способу введення добавки і її складу, умов перемішування розплаву, інтенсивності і способу продування ванни та багатьох інших. В той же час ще недостатньо дослідженим виявляється оцінка можливого впливу кількості твердих кускових добавок, які вводяться у сталерозливний ківш під час обробки сталі, зокрема, на установці ківш-піч (УКП). З метою виявлення впливу кількості кускової добавки на ефективність її використання на початковому етапі обробки сталі чисельним методом досліджували гідродинаміку і тепловий стан рідкого металевого розплаву. Дослідження виконували з застосуванням спеціально розроблених тривимірних математичних моделей і програмного продукту, які враховують динамічний вплив твердих добавок, що використовуються. В якості об'єктів дослідження розглядалися ванни сталерозливних ковшів ємкістю 60 і 250 т, що відповідно використовуються на електрометалургійному заводі «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) та металургійному комбінаті «Каметсталь» (м. Кам'янське). На прикладі феромарганцю марки ФМн78 в кількості від 0,2 до 3,0 кг/т дослідили гідродинаміку і теплові умови металеві ванни в момент вводу і на протязі перших 4,5с перебування добавки в металевому розплаві. Враховували одночасне продування ванни аргоном з витратою від 50 до 800 л/хв через кожну з донних фурм ковша.

Проведеними розрахунковими дослідженнями оцінили вплив кількості кускових добавок феромарганцю на гідродинамічний стан розплаву в ковшах різної ємкості в залежності від режимів продування ванни з металевим розплавом. Встановили, що хоча гідродинаміка у ковшах в цілому (в середньому) не змінюється суттєво при подачі кускових добавок, проте у місці їх введення вона змінюється суттєво на якісному рівні. В цьому місці змінюються напрямки і величини потоків розплаву, які визначають розташування в розплаві матеріалів, що вводяться, і їх подальшу динаміку після введення. Оскільки з точки зору засвоєння провідних елементів з твердих добавок феросплавів, що вводяться, є суттєвим для визначення раціональних режимів їх використання, вважається доцільним врахування фактору, що розглядається, як впливового [1].

Чисельними дослідженнями вивчили також вплив кількості введеної добавки на тепловий стан у контактній зоні шлако-металевого розплаву. Визначили, що питома маса добавки впливає на градієнт температур рідкого металу у момент введення останньої та на протязі початкового часу (4,5 с), що вивчався. Встановили, що витрати аргону на фурму в межах від 200 до 600 л/хв (ківш ємкістю 250 т) незначно змінюють температуру металу, що оточує добавку. В той же час у металевій ванні такої ємкості в момент введення добавки з витратами аргону, що практично використовуються, відбувається значне зниження температури, яке підтверджується результатами чисельних досліджень [2]. Показано також зменшення температури під дією маси добавки в ванні ковша 60 т з аналогічним впливом цього фактору на її тепловий стан.

Найближчим часом з використанням розроблених математичних моделей і програмного продукту по дослідженню впливу кількості кускових добавок, що вводяться у металеву ванну ковша на УКП, буде оцінено теплові умови до моменту початку плавлення твердих добавок і ступінь усереднення провідних елементів з феросплавів в об'ємі розплаву.

Літературні джерела

1. Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. Вплив кількості добавки на гідродинаміку металеві ванни у ківші. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 85–93. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-231-245>
2. Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. Вплив кількості добавки на тепловий стан ванни у ківші. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 105–113.

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ В УКРАЇНІ

П. О. Юшкевич к.т.н.

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

У 2024 році в Україні відповідно до свідчень про наявні та заплановані обсяги виробництва [1] за сприятливих умов, може бути збільшене виробництво сталі на 17 % порівняно з обсягом 2023 року та скласти приблизно від 7300000 т до 7500000 т наприкінці поточного календарного року [1, 2], що є позитивним проявом так як металургія є другою за обсягом експортною галуззю нашої держави. Разом з цим важливо відзначити, що на сьогодні від 65 % до 75 % [1, 2] світового виробництва сталі відбувається саме у кисневих конвертерах за технологіями верхньої, комбінованої, бічної та донної продувки. За даними джерела [3] з 2017 р. доля киснево-конвертерної сталі в Україні складала понад 70 % від загального виробництва, однак у зв'язку з знищенням та ушкодженням певних металургійних підприємств України у ході війни відбулося певне перерозподілення у технологічних потужностях виробництва сталі між киснево-конвертерним, мартенівським і електросталеплавильним способом виробництва сталі. На сьогодні в Україні є три великі металургійні підприємства у структурі яких функціонують киснево-конвертерні цехи: ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; ПрАТ «Дніпровський металургійний завод»; ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Потрібно відзначити, що киснево конвертерний спосіб виробництва сталі має ряд переваг порівняно з електросталеплавильним та мартенівським, а саме: найвищу продуктивність; відсутність безпосередньої необхідності у зовнішніх окремих паливних та енергетичних ресурсах; швидше протікання фізико-хімічних процесів; незначні капітальні витрати на будівництво та ремонт; вищу економічність; умови для переробки значної кількості металевого брухту без застосування зовнішніх енергетичних ресурсів; забезпечує добру керованість перебігом технологічного процесу; має ліпші екологічні показники ніж мартенівський процес. Відповідно до наведених переваг, доцільним у подальшій перспективі виробництва сталі в Україні є відновлення домінуючої частки у виробництві сталі саме киснево-конвертерним способом до показників у співвідношенні світового рівня, що буде потребувати як відбудови раніше існуючих киснево-конвертерних цехів, розширення існуючих або створення нових металургійних підприємств в структурі яких вони будуть функціонувати.

Літературні джерела

1. Григоренко Ю. Українські метпідприємства у 2024 році можуть збільшити виплавку сталі до 7,3 млн. т. : веб-сайт. URL: <https://gmk.center/ua/news/ukrainski-metpidpriemstva-u-2024-roci-mozhut-zbilshiti-viplavku-stali-do-7-3-mln-t/> (дата звернення 29.10.2024).
2. Гарбатенко В. Ключові технології виплавляння сталі : веб-сайт. URL: https://metinvest-smc.com/ua/articles/sliaxi-rozvitku-zelenoyi-metallurgiyi-castina-2-texnologiyi-virobnictva-stali/?srsltid=AfmBOoppuXIKQNS4WPlI_BkQ5CJiXK40R67d%20y0AX1FjG9ad2pmIL8Orw (дата звернення 30.10.2024).
3. Основним способом виплавки сталі в Україні залишається киснево-конвертерний: більше 70 % виробництва : веб-сайт. URL: https://ukrudprom.ua/news/Osnovnim_sposobom_viplavki_stali_v_Ukraine_ostaetsya_kislorodnok.html (дата звернення 30.10.2024).

РОЗРОБКА НАУКОВО ОБҐРУНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

О. Л. Чайка к.т.н., с.н.с., І. Г. Муравйова д.т.н., с.н.с., О. Є. Меркулов д.т.н., с.н.с., М. Г. Іванча, О. С. Нестеров к.т.н., с.н.с., Л. І. Гармаш к.т.н., Б. В. Корнілов к.т.н.

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

Інтеграція України у світове співтовариство розвинених економік передбачає реалізацію принципів декарбонізації виробництва у різних галузях промисловості, у тому числі, в металургії. Перспективним шляхом досягнення вуглецевої нейтральності при збереженні традиційного доменного способу виробництва чавуну є розвиток та внесення нових, проривних змін у технологію, зокрема, пов'язаних з використанням водню, як відновника та джерела тепла шляхом значного збільшення його вмісту у дутті. Окрім прямого ефекту зменшення викидів вуглецю цим досягається також загальне зменшення негативного техногенного навантаження на оточуюче середовище за рахунок зниження інтенсивності видобутку викопної сировини для виробництва відновників та теплоносіїв.

Використання водневмісного палива при виробництві чавуну призводить до істотних змін у технології доменної плавки, зокрема, теплових та відновлюваних процесів, які протікають у печі. Поглиблення розуміння цих процесів при використанні в дутті водневмісних добавок, наукове обґрунтування раціональної їх кількості з метою забезпечення максимального ступеня використання водню визначили актуальність та спрямованість розробок, які в теперішній час провадяться у відділі металургії чавуну.

Додавання водню у дуття та підвищення його концентрації у газовій фазі веде до прискорення відновлювальних процесів, зокрема, до збільшення ступеню непрямого відновлення заліза. Результати раніше виконаних досліджень показали, що збільшення кількості водню, що подається в доменну піч, до певної межі, сприяє збільшенню ступеню його використання. Перевищення цього граничного значення призводить до зворотного – зниження ступеня використання водню. Тому визначення раціональної кількості водневмісних добавок у складі дуття за допомогою розрахунків теплового та масового балансів є однією з основних задач досліджень.

Декарбонізація процесу виробництва чавуну передбачає підвищення його енергоефективності, що може бути забезпечено відповідною якістю залізовмісних матеріалів та коксу, розробкою та реалізацією адаптованих до нових умов режимів завантаження шихти, вибором параметрів дуттєвого режиму, що дозволяють досягти високих значень ступеню використання водню з урахуванням особливостей його поведінки у різних зонах доменної печі.

На особливу увагу заслуговують дослідження впливу водню на механізм відновлення залізовмісної частини шихти, яка використовується на підприємствах металургійної галузі. Результати цих експериментальних досліджень дозволять сформулювати та уточнити вимоги до якості та властивостей залізовмісних матеріалів і коксу умовах використання водню в доменній плавці, а також уточнити вимоги для доменної плавки в нових технологічних умовах. Розрахунково-аналітичні дослідження та аналіз показників плавки у різних зонах доменної печі, експериментальні дослідження відновлюваності залізовмісної сировини та урахування особливостей характеру розподілу водню по радіусу горна створюють наукову базу для обґрунтування та розробки технологічних вимог до раціонального розподілу залізовмісних матеріалів, а також визначення раціональних співвідношень вдуваних відновників, які забезпечують високий ступінь використання водню.

Результатом досліджень, які виконуються відділом металургії чавуну, з'явиться розробка науково обґрунтованих положень технології доменної плавки (необхідні властивості залізовмісних компонентів шихти, раціональні режими їх завантаження, співвідношення складових комбінованого дуття параметрів теплового та шлакового режимів) в умовах використання водню та водневмісних добавок у комбінованому дутті.

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОРЦІЙ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ, ЇХ ЗАВАНТАЖЕННЯ В БУНКЕР БЕЗКОНУСНОГО ЗАВАНТАЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ, ВИВАНТАЖЕННЯ З БУНКЕРА ТА РОЗПОДІЛУ НА ПОВЕРХНІ ЗАСИПУ

В. І. Вишняков, В. Р. Щербачов, О. О. Білошапка, К. П. Єрмоліна

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

Виконані в останні роки дослідження показали можливості використання комплексної моделі розподілу компонентів шихти при вирішенні різних технологічних завдань. Одним з найбільш важливих результатів, який може бути отриманий за допомогою моделі, є кількісна оцінка маси кожного компонента шихти, що надходить у розглянуту кільцеву зону під час при вивантаженні шихтових матеріалів у кожному задіяному кутовому положенні лотка безконусного завантажувального пристрою. Це дозволяє аналізувати вплив кількісних характеристик застосовуваної програми розподілу шихтових матеріалів на показники розподілу окремих компонентів, як залізорудної, так і паливної частини шихти, а також рудного навантаження, та створює можливість вибору та корегування програми на основі результатів прогнозних розрахунків до введення її у систему управління завантаженням, що значно зменшує тривалість розробки раціональних режимів завантаження шихти та знижує рівень ризику прийняття неефективних рішень. Окрім того, результатом математичного моделювання є компонентний склад сумішей шихтових матеріалів у різних зонах доменної печі, що дає можливість виконання прогнозних розрахунків високотемпературних властивостей розплавів та оцінки раціональності їх розподілу по перерізу доменної печі з урахуванням технологічних обмежень та ризиків виникнення негативних явищ у ході плавки, таких як, ушкодження футерівки печі, утворення тугоплавких конгломератів, захаращення горну та ін..

Результати моделювання за допомогою комплексної моделі дозволяють також здійснювати оцінку можливості реалізації технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку при роботі доменних печей у різних технологічних умовах.

Наразі, математичне моделювання розподілу компонентів шихти у робочому просторі доменної використовується у роботах по розробці нових методів оперативного визначення положення та параметрів пластичної зони в доменній печі, яка в значній мірі визначає техніко – економічні показники плавки, а також у актуальних дослідженнях використання водню та водневмісних замінників коксу у доменній технології.

Виконання розрахунково - аналітичних досліджень з визначення показників плавки у різних зонах доменної печі, а також їх аналіз дозволить уточнити вимоги до розподілу компонентів шихти, витрати і параметрів комбінованого дуття для забезпечення максимального ступеня використання водню та визначити раціональні співвідношення вдуваних відновників: коксового та природного газу, пиловугільного палива.

ОЦІНКА ПОВЕРДІНКИ ДОМІШОК ПРИ ПРОДУВЦІ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ СУМІШШЮ КИСЕНЬ – НЕЙТРАЛЬНИЙ ГАЗ ЧЕРЕЗ ДОННИЙ ПРОДУВНИЙ БЛОК

Л. С. Молчанов к.т.н, Т. С. Голуб к.т.н, Н. А. Арендач

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

Враховуючи світову необхідність в конструкційних матеріалах, серед яких незамінними залишаються сталь та чавун слід особливо підкреслити місце та значимість низько вуглецевих сталей з вмістом вуглецю нижче 0,01 % мас. Основним показником їх службових властивостей є висока пластичність у холодному стані. Виробництво таких сталей пов'язано з необхідністю використання спеціальних технічних рішень для видалення вуглецю з розплаву нижче критичної концентрації. Цей процес супроводжується значним зниженням виходу придатного рідкої сталі. У зазначених умовах актуальним завданням для сучасної металургійної науки є розробка альтернативних ефективних технічних рішень, щодо виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,01 % в умовах матеріально-технічної бази вітчизняних металургійних підприємств з мінімальною модернізацією устаткування. Перспективним напрямом вирішення зазначеної задачі є здійснення зневуглецювання залізовуглецевого розплаву за рахунок продувки ванни сумішшю кисень-нейтральний газ, яка здійснюється за межами сталеплавильного агрегату.

З метою встановлення технологічної ефективності зазначеного процесу було проведено високотемпературне дослідження, що передбачало продувку вуглецевої сталі сумішшю «кисень – нітроген» співвідношенням 30 до 70 % відповідно, з витратою 0,075 л/год. Плавка та продувка здійснювалася у 1 кг індукційній печі. Для проведення досліджень використовувалася сталева шихта з початковим хімічним складом, % мас.: С 0,3; Si 0,03; Mn 0,34; P 0,012; S 0,014. Продувку проводили крізь керамічну трубку, яка була занурена до донної частини тигля, що імітувало один канал донного продувального блоку за умов обробки сталі в сталь-ковші. Час продувки складав 3 хвилини з відбором проб кожні 40 сек. Результати абсолютної зміни хімічного складу сталі за час продувки:

- вміст вуглецю зменшився на 0,153 % мас.;
- вміст кремнію збільшився на 0,077 % мас.;
- вміст марганцю збільшився на 0,044 % мас.;
- вміст фосфору зменшився на 0,002 % мас.;
- вміст сірки не змінився.

Відповідно до представлених даних можна встановити, що при продувці металевої ванни сумішшю технологічних газів, що містять кисень у кількості 30 % від загального об'єму продувального газу, спостерігається пріоритетне окислення вуглецю та фосфору без окислення інших важливих для якості сталі домішок – кремнію та марганцю.

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про можливість запровадження розробленої технології продувки сталі сумішшю технологічних газів в промислових умовах. При цьому використання двоетапної технології зневуглецювання залізо-вуглецевого розплаву (1-й етап - окислення у плавильному агрегаті до вмісту 0,2-0,3 % мас.; 2-й етап – окислення до необхідної концентрації у сталерозливному ковші за рахунок продувки сумішшю газів, що містять кисень, крізь донний продувний блок) дозволить збільшити вихід придатного на 7-10 % у порівнянні з класичними процесами отримання низько вуглецевих сталей.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ АКТИВІЗАЦІЇ КИСНЕВОГО ПОТОКУ НА ЙМОВІРНІСТЬ ПЕРЕБІГУ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ ЗА УЧАСТЮ КИСНЮ

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

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

На сьогоднішній день киснево-конвертерний спосіб отримання рідкого металевого напівпродукту залишається єдиним економічно вигідним способом виробництва незамінного конструкційного матеріалу – сталей різного сортаменту. Проте сам спосіб для підтримання конкурентоспроможності на ринку потребує постійного підвищення ефективності виробництва та скорочення витрат. Традиційні шляхи впливу на сталеплавильну ванну для покращення обмінних процесів мають ряд обмежень та у своїй більшості вже вичерпали свої можливості [1]. Тому у практиці світової чорної металургії все частіше звертаються до нетрадиційних способів підвищення інтенсивності процесів виробництва сталі, які розширюють можливості існуючих процесів і не вимагають значних капіталовкладень і кардинальних змін в циклі виробництва.

Серед незвичних, проте перспективних способів інтенсифікації конвертерного виробництва можна виділити спосіб електричної активізації складових процесу, наприклад, електрична активізація газового продувального потоку [2]. Це обумовлює актуальність проведення досліджень з вивчення способів фізико-хімічного впливу на залізовуглецевий розплав електрично активізованими газовими струменями. Завдяки активізації кисневого потоку під час продувки до його потрапляння у рідку металеву ванну у струмені утворюються йони кисню. Відомо, що у порівнянні з активністю молекул, активність йонів більша [3]. Відповідно це має сприяти підвищенню ступеня засвоєння продувального газу розплавом і як наслідок викликати інтенсифікацію обмінних процесів у конвертерній ванні з відповідним скороченням тривалості продувки та підвищенням продуктивності кисневих конвертерів.

У роботі проведено аналітичне дослідження впливу високовольтної активізації кисневого потоку на перебіг реакції окислення вуглецю до СО шляхом оцінювання термодинамічного показника перебігу реакції у напрямку утворення продуктів реакції – вільної енергії Гіббса [4]. Вуглець, як компонент для оцінювання, обраний, бо процес його окислення визначає швидкісні можливості процесу кисневого конвертування за умов продувки зверху. Розрахунок проведений з урахуванням підвищеної кількості йонів кисню, які формуються на шляху до металеві ванни у кисневому струмені за рахунок електричного розряду для умов окислювально-відновних реакцій, для яких було розраховано електродні потенціали складових. Встановлено, що високовольтна активізація потоку кисню на виході з сопла створює достатню кількість активних часток – йонів, які зберігаються у такій кількості на відстані 40-ка калібрів, що можна відмітити істотне підвищення електродного потенціалу кисню. Це, у свою чергу, підвищує електрорухоми силу окислювально-відновних реакцій за участю газоподібного кисню, а саме системи «вуглець – кисень» й, відповідно, встановлено підвищення негативності вільної енергії Гіббса у порівнянні з класичним варіантом продувки у 3 рази. Отримані результати свідчать про відповідну можливість скорочення часу продувки металевого розплаву для досягнення необхідного вмісту вуглецю раніше завдяки більш активному протіканню реакції зі збільшеною кількістю йонів кисню.

Літературні джерела

1. Cappel J., Ahrenhold F., Egger M. W., Hiebler H., Schenk J. 70 Years of LD-Steelmaking—Quo Vadis? *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 912–936. <https://doi.org/10.3390/met12060912>
2. Семькин С. И., Голуб Т. С., Прокопенко П. Г. Стеновое исследование особенностей электрофизической активизации газового кислородсодержащего потока. *Сучасні проблеми металургії*. 2019. № 22. С. 94–103. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.10>
3. Von Engel A. *Ionized gases*. 2nd ed. New York, N.Y.: American Institute of Physics, 1994. 281 p.
4. Lele A. B., Dutta S. K. *Metallurgical thermodynamics kinetics and numericals*. S Chand. Publishing, 2012. 200 p.

ПІДВИЩЕНА ЧАСТКА МЕТАЛОБРУХТУ В ШИХТІ КИСНЕВИХ КОНВЕРТОРІВ, ЯК ОСНОВА ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИРОБНИЦТВА

А. Г. Чернятевич д.т.н., проф., Л. С. Молчанов к.т.н, Т. С. Голуб к.т.н.

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

Сьогодні кидає нові виклики людській цивілізації у сфері сталого розвитку та раціонального природокористування. При цьому значний негативний вплив на довкілля в цілому і на атмосферу зокрема має саме металургійна галузь. При цьому основна частка забруднення припадає саме на викиди CO та CO₂, що супроводжують технологічні процеси відновлення заліза з оксидів та безпосереднього окислення надлишкової кількості вуглецю у металошихті при виробництві сталі.

Враховуючи технологічні та організаційні особливості найбільш складно організувати ефективне уловлення та утилізацію оксидів вуглецю при здійсненні процесів виплавки сталі з використанням кисневих конверторів. При цьому в сучасних умовах зазначений спосіб виробництва сталі є головним стосовно сортаменту металопродукції сортаменту звичайної якості. У світовій практиці існує підхід у зниженні негативного впливу конвертерного виробництва сталі, що базується на уловленні, очищенні та усередненні димових газів, складуванні їх у системі газгольдерів та подальше використання у якості енергоносіїв для інших потреб виробництва. При цьому спорудження системи з газоуловлення підготовки та системи газгольдерів для зберігання та усереднення газоподібних продуктів відрізняється високою вартістю. Також існує й інший підхід у зменшенні викидів оксидів вуглецю у атмосферу за рахунок використання теплоти допалення монооксиду вуглецю до діоксиду у порожнині кисневого конвертера для збільшення частки металобрухту у вихідній шихті. При цьому відповідно зменшується кількість надлишкових домішок у металевій ванні, зокрема і вуглецю з відповідним зменшенням кількості викидів оксидів вуглецю у атмосферу.

Метою зазначеного дослідження є інженерно-розрахункова оцінка збільшення частки металобрухту у шихті кисневих конверторів з верхньою продувкою на кількість оксидів вуглецю, що утворюються та відповідно відводяться у атмосферу. Враховуючи, що склад та кількість димових газів під час продувки значно змінюється, то для оцінки був взятий середній показник, розрахований з урахуванням особливостей матеріальних та теплових балансів виплавки сталі наближених до реальних умов виплавки сталі у 250-т конвертерах з верхньою продувкою. Для проведення порівняльного аналізу було використано класичну конструкцію кисневої фурми, двоконтурну та двоярусну. Оцінку результатів проводили за інтегрованим показником кількості діоксиду вуглецю, що потрапляє у атмосферу (при цьому кількість монооксиду вуглецю перераховувалась на діоксид та для подальшої оцінки використовувався саме показник сумарного викиду діоксиду вуглецю).

Таким чином, за результатами проведених досліджень встановлено, що інтегрована кількість діоксиду вуглецю для використання класичної конструкції фурми, двоконтурної та двоярусної відповідно становить, м³/т сталі: 2,79; 2,71 та 2,62. Отримані результати корелюють з відповідним збільшенням частки металобрухту у шихті та збільшенням показників виходу придатного рідкої сталі.

Виходячи з наведеного вище, шляхом інженерно-технічних розрахунків підтверджено ефективність впливу на кількість викиду оксидів вуглецю у атмосферу від конвертерного виробництва за рахунок збільшення частки металобрухту у шихті. При цьому збільшення кількості металобрухту у шихті не приводить до поліпшення технологічних показників оскільки зазначений ефект досягається за рахунок оптимізації теплового режиму конвертерної плавки за рахунок збільшення частки CO, що допалюється до порожнині конвертера за рахунок використання продувних фурм прогресивної конструкції.

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОДУВКИ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ КИСНЕВИМ СТРУМЕНЕМ, АКТИВІЗОВАНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ

С. І. Семикін к.т.н., с.н.с., Т. С. Голуб к.т.н, С. О. Дудченко к.т.н., В. В. Вакульчук к.т.н.

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

Історія конвертерного виробництва починалася з продувки повітрям, потім процес був переведений на кисень як більш активний газ [1]. Зараз настав час, коли виникла необхідність застосування активніших продувних газів, яким є озон [2]. Однак складність та енергоємність процесу його отримання, а також його висока нестабільність є значною перешкодою для його широкого впровадження у промислових масштабах. У зв'язку з цим актуальним є проведення досліджень щодо пошуку раціональних можливостей інтенсифікації процесу кисневого конвертування шляхом застосування озону.

Метою роботи було дослідження на високотемпературній моделі кисневого конвертера особливостей верхньої продувки кисневим струменем, який попередньо активізували електричним розрядом для створення озону.

Попередньо проведені дослідження дозволило встановити, що найкращим для умов продувки металеві ванни озном є отримання озону за рахунок активізації кисневого струменя на виході з продувної фурми високовольтним електричним розрядом [3]. Це зумовлено як простотою реалізації цього способу, так і надійністю в роботі. Обраний тип високовольтного розряду – кистьовий, який зумовлює утворення іонів в газовому струмені.

Дослідження були проведені на високотемпературній моделі кисневого конвертера з верхньою продувкою. В 60 кг модель заливали попередньо розплавлений чавун складу, % мас.: С 3,85-3,95; Si 0,7-0,9; Mn 0,15-0,17; S 0,018-0,021; P 0,086-0,090 з температурою 1360-1400 °С, вводили шлакоутворюючі компоненти і продували залізо-вуглецевий розплав крізь верхню фурму технічно чистим киснем протягом 12 хвилин. Дослідження проведені як при застосуванні активізованого електричним розрядом кисневого потоку, так і для порівняння за умов класичного варіанту продувки. Високотемпературну активізацію проводили безпосередньо на виході з продувної фурми за умов подачі на розташовані в фурмі електроди 25-30 кВ, що відповідало утворенню озону на відстані 40 калібрів від сопла фурми близько 25-27 мг/м³.

За результатами досліджень у порівнянні з класичним варіантом конвертування встановлено, що застосування для продувки залізо-вуглецевої ванни активізованого електричним розрядом кисневого потоку сприяє:

- скороченню часу запалювання ванни у 2-3 рази та підвищенню температури ванни на 100-500 °С;
- підвищенню швидкості окислення вуглецю на 30-40 % відн. та скороченню питомої витрати кисню на 9-10 % відн.;
- зниженню рівня виділення пилу з ванни на 56,9-69,5 % відн.

Літературні джерела

1. Smil V. Transforming the twentieth century: technical innovations and their consequences. Volume 2. Oxford University Press, US, 2006. 368 p.
2. Vosmaer F. Ozone: its manufacture, properties and uses. Leopold Classic Library, 2015. 232 p.
3. Stephenson J. D. An experimental study of electrical discharge in gases at normal temperatures and pressures. *Proc. Phys. Soc.* 1933. Vol. 45. P. 20. <https://doi.org/10.1088/0959-5309/45/1/303>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЕВМІСНИХ ГАЗІВ

О. С. Нестеров к.т.н., с.н.с., Л. І. Гармаш к.т.н., І. Г. Муравйова д.т.н., с.н.с,
О. Л. Чайка к.т.н., с.н.с, К. П. Лопатенко, М. Г. Болденко

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

Одним з багатообіцяючих шляхів значного скорочення шкідливих викидів в чорній металургії є зменшення використання вуглецю за рахунок максимальної його заміни альтернативними джерелами тепла і відновниками. Великий потенціал в цьому плані має водень завдяки своїм фізико-хімічним властивостям і тому, що в результаті його реакцій з окислами заліза не утворюються викиди CO_2 .

Збільшення використання водневмісних газів суттєво впливає на параметри та ефективність доменної плавки, змінює перебіг процесів в доменній печі, розподіл температур та газопроникність шихти. З одного боку, підвищення концентрації водню прискорює процеси відновлення, з іншого – призводить до зниження температури в шахті печі, тому оптимізація властивостей залізорудної сировини, насамперед відновлюваності та міцності, є необхідною умовою підвищення ефективності доменної плавки при використанні водневмісних газів. Треба мати чітке уявлення як на процеси відновлення впливають склад газових сумішей, швидкість їхньої подачі, температура, властивості залізорудної сировини і багато інших факторів. Однак однозначної і загальноприйнятої теорії, яка б узагальнювала всі закономірності процесів відновлення воднем в доменній печі, не існує і досі. Цікаві дослідження впливу водневмісних газів на відновлювальність різних типів залізорудної сировини в останні роки проводяться китайськими, японськими, європейськими, індійськими дослідниками, але результати проведених в різних умовах досліджень доволі суперечливі.

Українські вчені та доменщики-практики проводять дослідження в цьому напрямі вже декілька десятиліть і мають дуже цікаві наукові і практичні результати, але за останні роки умови доменної плавки та склад і властивості залізорудної сировини, з якою працюють українські меткомбінати, дуже змінилися, що нагально потребує подальшого поглибленого вивчення перебігу відновних процесів при використанні водню саме для сучасних українських реалій.

Наразі в лабораторних умовах Інституту чорної металургії продовжуються дослідження впливу водню на відновні процеси в доменній печі для різних типів залізорудної сировини українського виробництва. Процеси відновлення моделювались на лабораторному устаткуванні ІЧМ при використанні різних сумішей відновних газів, склад яких є близьким до промислових умов. Вивчали вплив вмісту водню в відновному газі, швидкості нагрівання та швидкості подачі газу на втрату маси навішувань, на основі чого розраховували показник відновлювальності R.

Було визначено, що підвищення вмісту водню в суміші відновлювальних газів у температурному діапазоні 900-1000 °С супроводжується покращенням відновлювальності для всіх типів шихтових матеріалів, але відновна поведінка агломерату і окатишів суттєво відрізняється і залежить від вмісту водню в газовій суміші та швидкості його подачі. Аналіз отриманих експериментальних даних дозволив визначити найбільш ефективні для цих умов концентрації водню в відновному газі.

Отримані результати, з одного боку, підтвердили загальновизнані закономірності перебігу процесів відновлення в доменній печі при використанні водневмісних газів, а з іншого, виявили деякі особливості саме для таких типів ЗРС, що дає змогу використати їх як для планування подальших досліджень, так і для розробки технологічних рекомендацій по використанню водневмісних газів в доменному виробництві України.

Електрометалургія

УДК 662.352:621.73

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ LPBF НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

Г. А. Кононенко^{1,2,3} д.т.н., ст. досл., С. В. Аджамський^{2,4} докт. філ., Р. В. Подольський^{1,2} докт. філ.

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² ТОВ «Additive Laser Technology of Ukraine», м. Дніпро

³ НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

⁴ Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро

Робота присвячена дослідженню впливу циркуляції захисного середовища в робочому просторі камери принтера під час лазерного плавлення шару порошку (LPBF). За результатами досліджень останніх років для матеріалів з низькою питомою щільністю (легких) особливо актуальним є вплив швидкості та траєкторії видування. Матеріалом для досліджень є вертикальні зразки зі сплаву на основі алюмінію LPBF- AlSi10Mg , рівномірно розташовані по всій робочій площині камери конструкції, виготовлені за раціональними технологічними режимами. Випробування на розтяг необхідно проводити за стандартною методикою (ДСТУ ISO 6892-1:2019). Суцільність (пористість) визначали металографічно за допомогою програмного забезпечення ImageJ. Встановлено, що при подачі постійної швидкості подачі та циркуляції захисного середовища частинки сплаву захоплюються та переносяться до вихідного сопла, що впливає на кінцеву цілісність, а саме розмір пор. Показано залежність механічних властивостей від розташування досліджуваних зразків у зоні платформи (вплив їх обдування).

МІКРОСТРУКТУРА INCONEL 718 В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КОРЕКЦІЇ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ В ДЕТАЛЯХ, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ В ПОРОШКОВОМУ ШАРІ

С. В. Аджамський^{1,4} докт. філ., Г. А. Кононенко^{1,2,3} д.т.н., ст. досл., Р. В. Подольський^{1,2} докт. філ.,
О.Є. Барановська² к.т.н., Т.В. Балаханова² к.т.н

¹ ТОВ «Additive Laser Technology of Ukraine», м. Дніпро

² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

³ НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

⁴ Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро

Дефекти в готовому виробі є однією з основних причин руйнування компонентів, отриманих методом лазерного плавлення в порошковому шарі. Було проведено безліч досліджень контролю процесу лазерного плавлення в порошковому шарі для досягнення високої щільності та відсутності несучільностей. Це досягалось застосуванням комплексу різних запропонованих наявних відомих методик аналізу (оптична мікроскопія, комп'ютерна томографія та просвічуюча рентгеноскопія під час процесу) та побудовою карт процесів дефектної структури виробництва. Переважна кількість досліджень скерована на аналіз дефектів, їх форму та механізм утворення, що наразі доволі добре відомо. Враховуючи цей досвід досліджень авторами багатьох робіт було досягнуто необхідного для них рівня. Наразі в промисловому секторі виробництва методом лазерного плавлення в порошковому шарі постають більш прогресивні питання: збільшення продуктивності процесу та можливості нарощування об'єму друку, як серійного так і великогабаритного виробництва деталей зі збереженням високої щільності готового виробу. Щодо продуктивності, то ці питання частково мають рішення, а саме застосування динамічно адаптованої фокусної плями, форма фокусної плями, збільшення товщини порошкового шару та ін. Але при нарощуванні об'єму друку виникають деякі складності, що наразі шукають вирішення, переважно ці проблеми пов'язані з неможливістю застосування F-Theta лінзи. Таким чином в промисловому секторі була застосована інша оптична система, а саме система трьох осевого фокусування (динамічне фокусування) для збільшення області друку, що дозволило збільшити область за рахунок компенсації фокусної відстані шляхом переміщення рухомої фокусної лінзи та можливістю встановлення додаткових оптичних систем для покриття більшої ділянки (вище 400 мм). Застосування даної системи може впливати на якість готових виробів та особливо в повторюваності механічних властивостей в залежності від зміщення корекції фокусної відстані від центру. В результаті досліджень встановлено, що при зміщенні корекції фокусної відстані відбувається викривлення границь треків, що вказує на зміну кристалізації треків в залежності від викривлення фокусної плями. При застосуванні різних параметрів товщини нанесеного шару, при використанні раціональних параметрів побудови, структура зразків, виготовлених при 40 мкм, має стовпчасті зерна та області термічного впливу HAZ, що вказує на перегрів. Дослідні зразки, що виготовлені при товщині 60 мкм мають характерну область викривлення дугоподібної трекової структури з кутом нахилу 14° в залежності від кореляції фокусної відстані. При аналізі дослідних зразків, що виготовлені при товщині шару 40 мкм зміна кута нахилу не спостерігалось, що пов'язано з меншою товщиною шару та наявністю стовпчастих зерен, що в свою чергу пригнічує виявлення дугоподібної структури.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНОЇ ПОСТОБРОБКИ НА КІНЦЕВІ МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ ЗІ СТАЛІ 316 L, ВИГОТОВЛЕНОЇ ЗА SLM – ТЕХНОЛОГІЄЮ

С. В. Аджамський^{1,4} докт. філ., Г. А. Кононенко^{1,2,3} д.т.н., ст. досл., Р. В. Подольський^{1,2} докт. філ.,
О. А. Сафронова²

¹ ТОВ «Additive Laser Technology of Ukraine», м. Дніпро

² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

³ НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

⁴ Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро

У сучасному адитивному виробництві деталей широкого поширення набув метод SLM – технологія лазерного плавлення шару металевого порошку, який дозволяє значно розширити можливості щодо оптимізації геометрії виробів. Для деталей традиційного способу виробництва (лиття, деформація) відомо, що шорсткість поверхні може суттєво впливати на рівень механічних властивостей, оскільки виступи та западини є концентраторами напружень. Деталі, виготовлені за технологіями адитивного виробництва мають підвищену шорсткість, але їх структурний стан після виготовлення суттєво відрізняється від традиційного металу. Часто виникає необхідність експлуатації без наступної механічної обробки поверхні виробів, виготовлених методом SLM. Мета роботи: визначити вплив шорсткості, наявності або відсутності механічної обробки робочої зони зразків на механічні властивості зі умов статичного розтягу. Матеріал та методика досліджень. Зразки на розтягування з діаметром робочої зони 5 мм, 6 мм (припуск для наступної механічної обробки) та довжиною робочої зони 25 мм виготовлені з металевого порошку сталі 316L на машині для 3-D друку Alfa-150D виробництва ТОВ «АЛТ Україна» у вертикальному напрямі. Механічні властивості визначали при випробуванні на розтягування за стандартною методикою на машині «INSTRON». Контроль шорсткості було виконано за двома методами: з застосуванням шорсткоміру DANA-260 та мікроструктурного аналізу на оптичному мікроскопі AxioVert 200 M Mat з використанням спеціалізованого програмного забезпечення ImageJ. З аналізу профілометричної кривої та мікроструктури встановлено, що зразки без механічної обробки мають періодичні виступи, що пов'язано з текстурою, яка формується під час виготовлення. Середні значення механічних властивостей значно не відрізняються (менше ніж 6,6% для різних характеристик) в залежності від наявності чи відсутності механічної обробки, але відхилення від середнього в межах вибірки щодо значень границі міцності та відносного звуження для зразків без механічної обробки кратно більші порівняно з інтервалом коливань значень всередині вибірки для зразків з механічною обробкою.

Результати отримані в рамках Українсько-австрійського проєкту «Удосконалення режимів термообробки AISI316L виробництва SLM для зниження залишкових напружень» (номер держреєстрації 0123U103227) за договором M29-2024/KC.0226.24 від 30.05.2024.

Технології позапічної обробки чавуну та сталі

УДК 669.17.046.517В.083.133

ГЕНЕРАЦІЯ КОМПЛЕКСНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕМЕНТІВ МІЖ КІНЦЕВИМИ РОЗПЛАВАМИ ПІСЛЯ ДОВЕДЕННЯ СТАЛІ В АГРЕГАТІ КІВШ-ПІЧ

Д. М. Тогобицька д.т.н., проф., А. І. Белькова к.т.н., Д. О. Степаненко к.т.н.,
І. Р. Поворотня к.т.н., С. В. Греков

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

Прогнозування показників сталеплавильного процесу дозволяє раціонально використовувати добавки та покращувати фізико-хімічні та експлуатаційні властивості спеціальних сталей. Для підвищення ефективності рафінування сталі на УВП важливо розробити методи прогнозування складу кінцевих продуктів. Взаємодія розплавленого металу та шлаку є іонообмінним процесом елементів системи «метал-шлак», результати якого описуються за допомогою коефіцієнтів міжфазного розподілу дифундуючих елементів.

В Інституті чорної металургії НАНУ накопичений досвід моделювання фізико-хімічних властивостей сталей та феросплавів на рівні міжатомної взаємодії, а також процесів розподілу елементів в системі «метал-шлак» у відновлюваних умовах [1-2] з використанням комплексних показників завантажувальних в плавильний агрегат матеріалів та технології виплавки металу.

Для прогнозування коефіцієнтів розподілу сірки, кремнію, марганцю та алюмінію між кінцевими продуктами плавки після ковшової доводки сталі на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку розроблено методику, яка включає:

– вибір та обґрунтування найбільш значущих показників хімічного складу сталі та шлаку до УВП, добавок та технологічного режиму, що забезпечують отримання необхідного хімічного складу кінцевої сталі;

– генерацію структури комплексних показників систем «метал-шлак» та метал-добавки з урахуванням їх хімічного складу та фізико-хімічних властивостей з використанням математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона, що дозволяє різномірні показники «згорнути» у єдиний узагальнений показник;

– розробку прогнозних моделей для розрахунку коефіцієнтів розподілу елементів з використанням комплексних показників у вигляді $L_{ел} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$, де F_{ms} , F_{md} , F_t – комплексні показники відповідно систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму плавки, A , α_1 , α_2 , α_3 – коефіцієнти рівнянь, які визначаються для конкретної марки сталі.

Запропонований підхід відрізняється від традиційних методів розглядання коефіцієнтів розподілу елементів шихти як постійних величин та закладає передумови для розробки алгоритму прогнозування та направлено формування хімічного складу кінцевих розплавів з урахуванням початкового складу металу та шлаку, які подаються в ківш, та вибору оптимального складу шлакових сумішей, легуючих і мікролеуючих добавок.

Літературні джерела

1. Тогобицька Д. М., Кукса О. В., Греков С. В., Поворотня І. Р., Ліхачев Ю. М., Ходотова Н. Е. Прогнозування теплофізичних властивостей хромовмісних феросплавів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 287–294. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-287-294>

2. Togobitska D., Bielkova A., Stepanenko D. Model decision-making system in the task of choosing the optimal composition of the blast furnace burden under specific operating conditions of BF. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2023. Vol. 29(2). P. 67–74. <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1764>

НИЗЬКОЧАСТОТНА ВІБРАЦІЯ ПІД ЧАС ЗАТВЕРДІВАННЯ ЛИТИХ ЗЛИТКІВ Fe-28Mn-12Al-0,9Si-1,4C СТАЛІ

О. М. Смірнов¹ д.т.н., проф., М. М. Ворон¹ к.т.н., старш. досл.,
А. М. Тимошенко¹ к.т.н., старш. досл., Ю. П. Скоробагатько¹ к.т.н., старш. досл.,
С. Л. Шваб² к.т.н., старш. досл., А. Ю. Семенко¹ к.т.н., старш. досл.

¹ Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

² Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ

Ливарні та металургійні процеси є першою і основною стадією у виробництві металевої продукції від якої залежить формування їх якості, початкового структурно-фазового стану, наявності дефектів і домішок. Для великої кількості сплавів існує багато труднощів, пов'язаних з отриманням однорідних злитків з мінімальною кількістю дефектів, відсутністю ліквациї та сприятливими структурно-фазовими характеристиками. Це особливо важливо для сплавів, які містять компоненти з одночасно великими відмінностями в теплопровідності, теплосмності і щільності. Отримання якісних заготовок та виробів з таких матеріалів потребує використання методів впливу на процеси кристалізації таких сплавів, які забезпечують усунення небажаних дефектів. Ці питання стають особливо актуальними для складних багатокомпонентних сплавів, які відносяться до передових конструкційних матеріалів, таких як легкі високоміцні сталі з високим вмістом марганцю та алюмінію. Підготовка такого розплаву потребує врахування різноманітних технологічних аспектів, таких як щільність компонентів, шлакоутворююча здатність, межі перегріву та інші, щоб забезпечити найкращу якість і властивості одержуваних злитків і виливків.

Далі наведено результати експериментальних досліджень, присвячених вивченню впливу вібраційної обробки на дефекти та структуроутворення Fe-28Mn-12Al-0,9Si-1,4C сталі у литому стані. Відомо, що сталі з високим вмістом марганцю, особливо з високою концентрацією алюмінію, схильні до усадкових дефектів. Вібраційна обробка розплаву під час кристалізації є ефективним методом зменшення дефектів. Відповідні залежності майже не досліджені, тому дана робота присвячена встановленню залежностей якості та формування структури литої Fe-Mn-Al-C сталі з високим вмістом марганцю та алюмінію під впливом вібрації. Такий метод ще не випробуваний на сталях з високим вмістом марганцю та алюмінію. Основними змінними параметрами обробки були частота вібрації та температура розливання сплаву. Для порівняльного аналізу злитки отримували без обробки та з вібраційною обробкою з частотою – 12, 24 та 48 Гц.

Було визначено, що вібраційна обробка Fe-28Mn-12Al-0,9Si-1,4C сталі з частотою 12 Гц чинить мало впливу на дефектність, але непогано подрібнює макро- та мікроструктуру виливків. Найбільша дефектність і найкраще подрібнення зерен забезпечується обробкою з частотою 48 Гц. Оптимальним режимом було визначено обробку з частотою 24 Гц, що забезпечило мінімальну дефектність виливків та їх помітне зерноподрібнення. Вібраційна обробка Fe-28Mn-12Al-0,9Si-1,4C сталі сприяє довшому зберіганню рідкої фази у формі та інтенсифікує кристалізацію.

В ході проведення експериментів було встановлено, що температура солідус для Fe-28Mn-12Al-0,9Si-1,4C сталі становить 1300 °С. За результатами аналізу мікроструктури одержаних зразків було визначено, що оптимальна температура для лиття та обробки сталі даного хімічного складу становить 1450 °С. Збільшення цієї температури призводить до суттєвої втрати ефекту від накладання вібрації, що проявляється у зростанні зерен.

Дослідження проведено в рамках виконання Проєкту 2023.04/0021 «Одержання елементів броні з надлегких сталей для військової техніки з використанням вторинної сировини». Проєкт реалізовано за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України, конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України».

ЗАСТОСУВАННЯ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЮ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ

Р. Б. Дутній, С. В. Журавльова к.т.н., доц., М. М. Бойко к.т.н., доц., В. Є. Трешов, Б. Ю. Білий

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

В роботі розглянуто способи позапічної обробки сталі при яких можливе використання алюмовідходів у складі шлакових сумішей, що використовують для рафінування сталі [1-3]. Одним із розповсюджених способів позапічної обробки сталі є обробка сталі рідкими вапняно-глиноземистими шлаками з метою десульфурації і розкислення. Перемішування металу зі спеціально приготовленим (синтетичним) шлаком інтенсифікує перехід у шлак шкідливих домішок (сірки, фосфору, кисню). Основна вимога, яка пред'являється до синтетичних вапняно- глиноземистих шлаків – мінімальна окисленість, що забезпечує добрі умови для розкислення сталі та її десульфурації, і максимальна активність СаО. Тому окислів заліза не повинно бути зовсім, або їх вміст – обмежений.

Перевагою методу обробки сталі синтетичними шлаками є велика його продуктивність. Вся операція здійснюється під час випуску металу із агрегату в ківш, тобто за кілька хвилин. Продуктивність агрегатів підвищується, оскільки технологічні операції (десульфурації і розкислення) переносять у ківш. Використання відходів алюмінію для виготовлення синтетичних шлаків та позапічної обробки сталі дозволяє зберегти природу і навколишнє середовище, поліпшити екологічну обстановку за рахунок усунення небезпечних промислових відходів [4]. До того ж, це ще й економічна вигода за рахунок реалізації або використання вторинної сировини.

Літературні джерела

1. Гнатуш В. А. Світові тенденції ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів. *Процеси лиття*. 2020. № 3 (141). С. 56–69.
2. Takayuki N., Kaoru S. Formation of spinel inclusions in molten stainless steel under Al deoxidation with slags. *ISIJ Int.* 2014. Vol. 100(4). R7–R8.
3. Величко О. Г., Стоянов О. М., Бойченко Б. М., Нізяєв К. Г. Технології підвищення якості сталі : підручник. Дніпропетровськ : Середняк Т. К., 2016. 196 с.
4. Zhuravlova S., Dutnii R., Boiko M., Zhuravlova I., Mamuzić I. Disposal of aluminum-containing waste in out-of-furnace steel processing. *Croatian metallurgical society (CMS) – 17th international symposium of Croatian metallurgical society SHMD 2024 materials and metallurgy book of abstracts metallurgy*. 2024. Vol. 63(2). P. 311.

РОБОТА ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ НА УСТАНОВЦІ «КІВШ-ПІЧ»

В. О. Рубан докт. філ., О. М. Стоянов к.т.н., доц., Є. В. Синегін к.т.н., доц.

Український державний університет науки технологій, м. Дніпро

На сучасному етапі розвитку металургійного виробництва високий рівень якості металопродукції значною мірою забезпечується поєднанням різних технологічних операцій позапічного рафінування рідкого металу, що неминуче призводить до збільшення тривалості його перебування в ковші. Глибоке рафінування сталі на установці «ківш-піч» (УКП) в своїй більшості супроводжуються істотним зниженням її температури. Разом з тим, навіть в умовах які забезпечують мінімальні витрати теплоти при обробці на УКП, для забезпечення необхідних параметрів розливання сталі, температуру випуску потрібно дещо підвищувати, що неминуче призводить до додаткових витрат електроенергії. Ступінь засвоєння електроенергії залежить від умов теплообміну між дугою та металом, що залежать, у свою чергу, від форми, розміру та характеру роботи дуги. Дані параметри визначаються параметрами роботи електродугового пристрою (ЕДП) агрегату. При роботі ЕДП між графітованими електродами та металом утворюється стовп дуги, що складається із суміші нейтральних газових частинок, електронів, іонів та атомів, пари матеріалу електродів та металу [1].

Фірма-виробник визначає швидкість нагріву розплаву потужністю дуг, ступенем напруги і при товщині шлаку 150-200 мм гарантує на 16-му ступені напруги трансформатора швидкість нагрівання $4\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$, а на 12-му – близько $3\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$. Проведені дослідження показали, що така швидкість нагрівання спостерігається далеко не завжди і пов'язана зі зміною інтенсивності теплообміну в системі плазма–шлак–метал [2, 3].

У стабільно існуючій електричній дугі підтримується теплова рівновага, яка характеризується тим, що кількість теплоти, яка виділяється, дорівнює кількості теплоти, що віддається в навколишнє середовище. Тому за зміни умов охолодження дуги чи фізичних властивостей середовища змінюються її параметри.

Розряд електричної дуги, в процесі роботи ЕДП, постійно змінює положення по всій площині торця електрода та поверхні рідкого металу. Доведення сталі на УКП за хімічним складом здійснюється додаванням у ківш сипучих матеріалів – феросплавів, чушкового алюмінію та ін. Стабільність горіння дуги залежить від властивостей поверхні металу: при переміщенні дуги на тверді частинки доданих матеріалів змінюється температура точок контакту, що впливає на стабільність горіння та теплообмін зі сталлю, а отже знижується електричний коефіцієнт корисної дії та зростає витрата електроенергії

З цього можна зробити висновок, що режим роботи електродугового пристрою визначає ефективність нагрівання сталі на установці «ківш-піч». При цьому основними факторами, що впливають на ефективність роботи ЕДП, є стійкість і стабільність горіння електричних дуг і, як наслідок, ефективність передачі теплоти від них металу. Тобто, вирішивши завдання підвищення ефективності роботи ЕДП, можна знизити витрати електроенергії при позапічній обробці сталі та зменшити тривалість її обробки.

Літературні джерела

1. Смірнов О. М., Кучерський С. В., Штепан Є. В. Безперервне розливання сталі : підручник. Алчевськ : ДонДТУ, 2011. 518 с.
2. Kumar S., Mitra K. Transient radiative transfer. *Radiative Transfer-1. Proceedings of the First International Symposium on Radiation Transfer*, August 1995, Kusadasi, Turkey, ICHMT, 1995. <https://doi.org/10.1615/ICHMT.1995.RadTransfProc.340>
3. Bergman T. L., Viskanta R. Radiation heat transfer in manufacturing and materials processing. *Radiative Transfer-1. Proceedings of the First International Symposium on Radiation Transfer*, August 1995, Kusadasi, Turkey, ICHMT, 1995. <https://doi.org/10.1615/ICHMT.1995.RadTransfProc.340>

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ, ВВЕДЕНОГО В ЧАВУН, ПРИ ІНЖЕКЦІЙНІЙ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

А. П. Шевченко¹ д.т.н., проф., **І. О. Маначин**^{1,2} к.т.н., ст. досл., **В. І. Єлісеєв**^{1,2} к.т.н., с.н.с., **В. Г. Кисляков**¹ к.т.н., **М. О. Рибальченко**² к.т.н., доц.

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Використання позапічної десульфурації чавуну [1, 4, 5-9] різними диспергованими десульфуруючими [2] обумовлено бажанням досягти найповнішого видалення сірки з розплаву за найкоротший час. Фактичні результати промислового застосування позапічної десульфурації свідчать [4], що практичні результати застосування технології в багатьох випадках не є досить стійкими та далекі від можливого і очікуваного. Дослідження були проведені на розрахункових та "холодних" фізичних моделях [3]. В якості десульфуруючих реагентів були оцінені магній, мелене вапно та карбід кальцію. На основі фактичних результатів фізичного моделювання та наступних розрахунків було сформульовано поліпшене вираз для глибини занурення струменя в залежності від параметрів інжекційної через підводну ланцюгу [6]. Були досліджені процеси взаємодії газової та твердої фаз в зоні біля фурми під час десульфурації в ковші. Показано, що під час інжекційної десульфурації чавуну газовий компонент потоку зупиняє свій напрямний рух у розплаві до 80 мм (фактично 50-60 мм), тверді частки продовжують рухатися у порожнині та вдаряються у поверхню цієї порожнини. Для оцінки подальшого руху частинки через межу "газова порожнина-розплав" була розрахована глибина проникнення частинок у розплав чавуну. Розроблено моделі та номограми для визначення глибини занурення частинок реагента як функції швидкості вдування двофазного потоку. Надані рекомендації щодо параметрів інжекційної магнію та меленого вапна та ін.

Літературні джерела

1. Voronova N. A. Desulfurization of Hot Metal by Magnesium. Iron & Steel Society, 1983.
2. Zborshchik A. M., Kuberskii S. V., Pismarev K. E., Akulov V. V., Dovgalyuk G. Ya. Comparison of ladle technologies for hot-metal desulfurization. *Steel Transl.* 2010. Vol. 40, P. 35–37. <https://doi.org/10.3103/S0967091210010092>
3. Shevchenko A. F., Bashmakov A. M., Vergun A. S., Manachin I. A., Kislyakov V. G., Trotsenko E. A., Liu Dong Yie, Yang Jia Rui. Modern high-performance complexes of extra-deep desulphurization of cast iron by mono-injection of magnesium. *Metallurgist.* 2019. Vol. 62. P. 965–973. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00734-w>.
4. Vergun A. S., Shevchenko A. F., Kislyakov V. G., Molchanov L. S., Dvoskin B. V. Sulphur and gas removal from hot metal by injecting disperse magnesium in a gas jet. *Steel in translation.* 2019. Vol. 49(1). P. 45–49. <https://doi.org/10.3103/S0967091219010133>
5. Lindström D., Nortier P., Sichen D. (2014). Functions of Mg and Mg–CaO mixtures in hot metal desulfurization. *Steel Research International.* 2014. Vol. 85(1). P. 76–88. <https://doi.org/10.1002/srin.201300071>
6. Shevchenko A. F., Manachin I. A., Vergun A. S., Dvoskin B. V., Kislyakov V. G., Shevchenko S. A., Ostapenko A. V. (2017). Out-of-furnace desulphurisation of cast iron in ladles. Technology, research, analysis, improvement. Dnipro : Dnipro-VAL, 2017.
7. Schrama F. N. H., Beunder E. M., Van den Berg B., Yang Y., Boom R. Sulphur removal in hot metalmaking and oxygen steelmaking. *Hot metalmaking & Steelmaking.* 2017. Vol. 44(5). P. 333–343. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>
8. Zborshchik A. M., Kuberskii S. V., Dovgalyuk G. Ya., Vinnik K. V. Effectiveness of fluidized lime in the desulfurization of hot metal in 300-t casting ladles. *Steel Transl.* 2011. Vol. 41. P. 741–744. <https://doi.org/10.3103/S096709121109021X>
9. Zborshchik A. M., Kuberskii S. V., Dovgalyuk G. Y., Belomerya V. N. The efficiency of using fluidized lime for desulfurization of iron in 300-ton charging ladles. Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Metallurgy. 2011. Vol. 13(194). P. 53–60. URL: <https://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/14635>

ОСОБЛИВОСТІ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ СТАЛЕЙ ІЗ НАДНИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ

О. А. Танчев, С. В. Журавльова к.т.н., доц., І. В. Журавльова, Є. О. Аржанцев

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

В роботі проведений аналіз основних джерел внесення сірки в сталь при використанні різних шихтових матеріалів та способів їх підготовки, включаючи різні методи позапічної десульфурації чавуну [1]. Розглянуто питання ефективності проведення конвертерної плавки зі зниженим ступенем десульфурації з наступною позапічною обробкою сталі для видалення сірки [2, 3].

Визначено, що глибока десульфурація сталі можлива шляхом використання технологічних комплексів «УДЧ – сталеплавильний агрегат» та «УДЧ – сталеплавильний агрегат – УПК». Їх застосування забезпечує можливість оптимізації витрат на виробництво сталі, розширює сортамент дефіцитних видів металопродукції та дозволяє усунути ряд обмежувальних умов, що ускладнюють поточне виробництво сталі. Кінетика десульфурації сталі залежить від виду реагенту десульфуранта, його хімічного складу, температурних умов, умов перемішування сталі в ковші, додаткових технологічних операцій, ковшової обробки металу [3, 4].

Літературні джерела

1. Şener B., Hüsken R., Cappel J. Desulfurization Strategies in Oxygen Steelmaking. *Iron and Steel Technology*. 2013. No 10(4). P. 147–158.
2. Журавльова С. В., Паніотів Ю. С., Мамешин В. С. Оцінка процесу десульфурації металу на АКП по біваріативному механізму. *Метал і лиття України*. 2015. № 2 (261). С. 8–11.
3. Vodennikova O. S., Vodennikova L. V. Desulfurization of steel: modern technologies, trends and prospects. *Metal and Casting of Ukraine*. 2022. Vol. 30(1). P. 42–53. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.042>
4. Журавльова С. В., Стоянов О. М., Нізяєв К. Г., Малій Х. В., Синегін Є. В., Мамешин В. С. Технології позапічної десульфурації сталі : монографія. Дніпро : Середняк Т. К., 2024, 150 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗО-ДИНАМІЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ІНЖЕКТУВАННЯ ПОРОШКОВОЇ СУМІШІ НА «ХОЛОДНИХ» МОДЕЛЯХ

В. Г. Кисляков^{1,2} к.т.н., В. І. Єлісеєв¹ к.т.н., с.н.с., І. О. Маначин^{1,2} к.т.н., ст. досл.,
О. Л. Руденко¹ к.т.н., В. П. Петруша¹

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

В сучасних умовах вітчизняні металургійні підприємства, а особливо сталеплавильне виробництво в їх складі, зазнають значного негативного впливу дефіциту якісної сировини, відсутності стабільності шихтових матеріалів, що надходять. При цьому в світовій практиці для подолання зазначених проблем використовують технічні рішення, що до позапічної обробки шихтових матеріалів, зокрема й рідкого чавуну. Таким чином, актуальним питанням вітчизняної металургійної науки є встановлення ефективності найбільш розповсюджених методів позапічної обробки чавуну стосовно сучасних реалій існування вітчизняного сталеплавильного виробництва.

На основі теорії двофазних течій (газ - тверді частинки), що базується на математичному описі досліджуваних систем, розроблено методику теоретичного оцінювання впливу характеристик двофазних потоків (витрата газової фази, інтенсивність подачі твердої фази) та характеристики траси, що транспортує двофазний потік (діаметр каналу, довжина горизонтальних, вертикальних та похилих ділянок, матеріал траси), на зміну параметрів (перепад тиску, між початком та закінченням траси, швидкість газової та твердої фаз) двофазного потоку [1-4].

З використанням розробленої методики [5, 6] виконано попередні розрахунки перепаду тисків, швидкостей газової та твердої фаз для частинок CaO з діаметром 60, 100 мкм; FeO – 70, 450 мкм; Na₂CO₃ – 100 мкм) і Al – 500 мкм за витрати газу 100 нл/хв та інтенсивності подачі твердої фази 1,67 кг/с та 2,5 кг/с, які транспортують каналом діаметром 4 мм з горизонтальною ділянкою 1 м і вертикальною 0,6 м.

На лабораторній базі ІЧМ була змонтована установка для проведення досліджень гідрогазодинамічних закономірностей інжектування порошковою сумішшю на «холодних» моделях. Були зроблені випробування установки без реагентів, з використанням соди, з використанням вапна та з використанням сумішшю CaO-Na₂CO₃-FeO.

Літературні джерела

1. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / под ред. М. Е. Дейча. Москва : Мир, 1971. 536 с.
2. Накорчевский А. И., Басок Б. И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках / под ред. А. А. Долинского. Киев : Наукова думка, 2001. 346 с.
3. Кондратьев А. С., Ньа Т. Л., Швыдько П. П. Инженерные методы расчета гидротранспортирования твердых частиц в горизонтальных и вертикальных трубах. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018. № 3. С. 1–19. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1740>
4. Криль С. И., Чальцев М. Н. К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам. *Прикладна гідромеханіка*. 2010. Том 12. № 4. С. 36–44.
5. Елисеєв В. И., Толстопят А. П., Флеер Л. А., Совит Ю. П., Шевченко А. Ф., Шевченко С. А. Движение двухфазного потока в фурме. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка*. 2019. Вип. 23. Т. 27. № 5. С. 21–34.
6. Тимошенко В. И. Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов. Днепропетровск : Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2003. 460 с.

Автоматизація та сучасні методи контролю металургійних процесів та якості металургійної продукції

УДК 669.046

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОРЕЖИМОМ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ АТ «НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОД ФЕРОСПЛАВІВ»

М. В. Михайловський к.т.н., доц.,

В. І. Шибакінський к.т.н., доц., М. Д. Зінченко к.т.н., с.н.с.

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Продуктивність дугової сталеплавильної печі (ДСП) і витрата електроенергії на тонну сталі в значній мірі залежать від вибору раціонального електричного режиму, який повинен забезпечити найбільш повне використання встановленої потужності, введення в піч якомога більше енергії в одиницю часу і завадити перегріванню кладки печі. Для забезпечення високопродуктивної роботи ДСП обладнуються автоматичними регуляторами потужності, які здійснюють підтримку заданої потужності електричної дуги [1]. Робота цього автоматичного регулятора заснована на зміні положення електродів для регулювання довжини дуги. Управління процесом дугової плавки здійснюється, як правило, в умовах невизначеності властивостей об'єкта управління й відсутності системи підтримки прийняття рішень.

Для прийняття релевантних рішень з метою досягнення максимальної продуктивності печі при мінімальних енерговитратах розроблена комплексна система автоматизованного управління, що регулює електричні параметри дуги й переміщення електродів. Для реалізації цієї задачі використана схема релейного регулювання потужності ДСП з використанням асинхронного короткозамкненого двигуна. Система автоматичного управління енергорежимом ДСП складається з модульного програмованого контролера Simatic S7-300, модульної станції системи розподіленого введення-виведення ET-200M і станції розподіленої периферії ET-200S. За інформацією про поточну напругу електро мережі, температуру подини і футерування, система управління розраховує електричний і тепловий режими, що відповідають умовам мінімальних питомих витрат електроенергії, тривалості плавки та собівартості сталі. Розроблено інформаційне забезпечення системи, алгоритм її роботи та відповідна комп'ютерна програма.

Комп'ютерним моделюванням в середовищі Matlab/Simulink доказана стійкість роботи регулятора при аперіодичному характеру перехідних процесів і збільшення швидкодії регулятора в порівнянні з традиційним регулятором двигуна постійного струму. Розроблена система дозволяє забезпечувати рівномірне горіння дуги за рахунок регулювання положення електродів ДСП з комп'ютера оператора. Передбачений на ДСП обсяг засобів автоматичного контролю та управління забезпечує підтримку заданих технологічних режимів електроплавки, а також безпеку експлуатації агрегату.

Літературні джерела

1. Свинолобов Н. П., Бровкин В. Л. Печи черной металлургии : учебное пособие. Днепропетровск : Пороги, 2004. 154 с.

ІНФОРМАЦІЙНО-МОДЕЛЮЮЧА СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ ВЕРХНІХ КОНВЕРТЕРНИХ ФУРМ

О. О. Жульковський¹ к.т.н., доц., І. І. Жульковська² к.т.н., доц.

¹ Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

² Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро

Ефективне керування сучасним металургійним виробництвом вимагає постійного моніторингу всіх технологічних процесів. Забезпечити такий контроль можливо за наявності систем MES (Manufacturing Execution System) та SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), які дозволяють керувати виробничими процесами [1]. Ці системи представляють собою спеціалізоване програмне забезпечення для вирішення різноманітних виробничих завдань на рівні цеху чи підприємства. У більшості випадків вони працюють у реальному часі в рамках Industrial Control System та Instrumentation and Control System, проте можуть функціонувати і автономно, забезпечуючи збір та обробку виробничих даних, контроль якості, надання необхідної інформації та формування рекомендацій для оптимізації технологічного процесу й управління обладнанням. Отже, наявність інформаційно-моделюючої системи прогнозування стійкості верхніх фурм, як складової зазначених вище систем, дозволить вирішити актуальні проблеми конвертерного виробництва.

Інформаційно-моделюючі системи контролю та керування мають високий попит у металургійному виробництві. Не є винятком і потреба в системах моделювання теплового режиму як штатних верхніх фурм, так і спеціальних гарнісажних фурм, що використовуються для гарячого ремонту футерівки конвертера методом роздування шлакової ванни на футерівку (slag-splashing process). Верхні фурми, незалежно від конструкції та призначення, часто виходять з ладу через значні теплові навантаження, зашлаковування, руйнування зварних швів та прогари. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє ефективно керувати процесом проєктування фурм та систем їх охолодження, прогнозувати та своєчасно сигналізувати про перегрів або критичний стан обладнання, що в результаті сприятиме підвищенню зносостійкості пристрою та запобіганню аварійним ситуаціям на виробництві.

З метою виконання актуального завдання щодо визначення відповідності вхідних технологічних параметрів критеріям безпеки ведення конвертерного процесу в цілому розроблено комп'ютерну інформаційно-моделюючу систему прогнозування теплового режиму стовбура верхніх кисневих і гарнісажних фурм. Математичні моделі, як основа системи, передбачають розв'язання диференціального рівняння теплопровідності в циліндричних координатах із заданими початковими (розподіл температур у розрахунковій області) і граничними умовами II та III роду (відповідно на зовнішній і внутрішній поверхнях стовбура фурми). Для чисельного розв'язання рівняння теплопровідності застосовано інтегро-інтерполяційний метод. Розрахунок температурного поля здійснювався методом прогонки (модифікованим методом Гауса) із використанням неявної безумовно стійкої схеми.

Програмний застосунок розроблено у середовищі Microsoft Visual Studio. Він не потребує спеціальних вимог до комп'ютерної інфраструктури, функціонує локально (без необхідності доступу до Інтернету) і не вимагає спеціальних навичок для роботи завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу. Розроблена інформаційно-моделююча система дозволяє оцінювати конструктивні й технологічні параметри роботи верхніх фурм як критерії безпечної експлуатації. Її застосування у режимі «консультанта» забезпечує оптимізоване проєктування верхніх фурм з ефективною системою водяного або газового охолодження, спрямоване на підтримання належного теплового режиму протягом усього часу експлуатації, а також безаварійну роботу конструкції.

Літературні джерела

1. MES vs SCADA in Industry 4.0. *Nexus Integra* : веб-сайт. URL: <https://nexusintegra.io/mes-vs-scada/> (дата звернення: 08.11.2024).

Металознавство та термічна обробка сталі

УДК 621.785:669.15"26"28"292-194.018.26:621.771.25:621.79

МЕТОДИКА ПРОГНОЗНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ Cr-Mo-V СТАЛІ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ

Е. В. Олійник, Е. В. Парусов д.т.н., с.н.с., І. М. Чуйко к.т.н., ст. досл.

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

Визначення рівня зміцнення сталі в залежності від параметрів технології її холодного пластичного деформування, зокрема волочіння, та створення на цих засадах методів розрахунку показників міцності відноситься до актуальних напрямів діяльності сучасних металовиробних підприємств. На деформаційне зміцнення сталі під час волочіння основний вплив чинять ступінь деформації й температура розігріву оброблюваної заготовки, а саме пов'язані з цим процеси зміцнення та знеміцнення металу. За умови сталості параметрів технології волочіння стає можливим розрахувати прогнозне значення границі міцності металу, потрібні тягові зусилля волочильного обладнання, а також визначити відповідність холоднодеформованого дроту унормованим вимогам стандартів [1]. Враховуючи те, що прокат з низьковуглецевих легованих сталей зварювального призначення є переробною заготовкою, яка піддається холодному деформуванню волочінням, то до одного з основних показників його механічних властивостей відносять границю міцності, яка виступає у якості головного індикатору.

Наведено результати практичного застосування авторської методики для прогнозного визначення границі міцності холоднодеформованого дроту в залежності від ступеня сумарного відносного обтиснення сталевого прокату, що базується на відомому рівнянні Туленкова-Золотнікова [2], та яке було модифіковане шляхом уведення емпіричного коефіцієнту (k). Цей коефіцієнт враховує інтегральний вплив хімічного складу і параметрів структури сталі, що істотно впливають на деформаційне зміцнення металу під час волочіння. Накопичений багаторічний досвід авторів з аналізу зміни механічних властивостей широкого марочного сортаменту сталей за умови застосування технології прямого волочіння (без проведення відпалу) дозволив визначити коефіцієнт $k = 1,17-1,22$ для низьковуглецевих сталей ($C \leq 0,15$ % ваг.) з феритною матрицею, які додатково леговані хромом (0,70–1,30 %), молібденом (0,50–1,30 %), ванадієм (0,10–0,30 %) та містять марганець і кремній в діапазонах 0,70–1,60 та 0,20–0,80 % відповідно.

Із використанням зазначеної методики встановлено залежність деформаційного зміцнення дроту з низьковуглецевої хромомолібденванадієвої сталі (CrMoV1Si) у процесі прямого волочіння від механічних властивостей прокату у стані постачання. Визначено діапазон вихідної міцності сталевого прокату діам. 5,5 мм ($R_m = 450-550$ МПа), який гарантовано забезпечує відповідність границі міцності холоднодеформованого дроту діам. 1,2–3,0 мм вимогами існуючих стандартів.

Літературні джерела

1. Парусов Е. В. Прогнозування енергосилових параметрів волочіння та механічних властивостей холоднодеформованого дроту з високовуглецевих сталей. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : матеріали X міжнародної науково-практичної конференції, м. Дніпро, 27-29 березня 2018 р. Дніпро : НМетАУ, 2018. С. 31.
2. Туленков К. И., Злотников М. И., Бобылева С. Ф. Механические свойства стальной наклепанной проволоки. *Сталь*. 1956. № 9. С. 821–825.

ЗВ'ЯЗОК ХІМІЧНОЇ МІКРОНЕОДНОРІДНОСТІ ЗІ СТРУКТУРОЮ ПЛАСТИНЧАТОГО ГРАФІТУ В СІРОМУ ЧУГУНІ

А. Ю. Борисенко д.т.н., с.н.с., Т. В. Балаханова к.т.н.

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

Чавун із пластинчастим графітом широко застосовується в різних галузях промисловості. Це недорогий матеріал, що легко піддається рециклінгу та має відносно низький рівень забруднення навколишнього середовища, зокрема низькі викиди CO_2 .

Утворення структури чавуну з пластинчастим графітом досі залишається предметом численних досліджень. Пластинчастий графіт у сірому чавуні може мати різні форми: голчасту, пластівцеву, прямолінійну, закручену, гніздоподібну, які також різняться за розміром. Форма, розмір та розподіл графіту в сірому чавуні є надзвичайно чутливими до незначних змін хімічного складу (особливо локальних), а також до швидкості охолодження. В межах однієї литої деталі можуть утворюватися різноманітні графітові частки, тому контрольоване формування різних структур пластинчастого графіту в межах одного литого виробу є актуальним завданням.

Насьогодні бракує знань про вплив ліквідаційної мікронеоднорідності на процес утворення графітових часток різної морфології та розмірів.

У роботі було проведено аналіз морфології графітових часток у сірому чавуні, а також досліджено черговість виникнення часток різної форми та розміру й їхній зв'язок із хімічною мікронеоднорідністю. Досліджуваний зразок сірого чавуну мав хімічний склад, близький до евтектичного (3,94 % C; 2,59 % Si), і кристалізувався при уповільненому охолодженні. Було проведено металографічний аналіз та вимірювання мікротвердості структурних складових. Для візуалізації хімічної мікронеоднорідності використовували метод гарячого травлення в лужному розчині пікрату натрію.

У зразку спостерігали масивні, гніздоподібні, зірчасті та гілкоподібні форми графіту, які, залежно від їхнього розташування у макро- та мікрооб'ємах, мали різні розміри. Хімічна мікронеоднорідність, що виникає на всіх стадіях кристалізації, проявляється у варіаціях концентрації кремнію та вуглецю. Оскільки кремній знижує розчинність вуглецю, у висококремністих ділянках концентрація вуглецю є меншою, що призводить до різниць у твердості між різними ділянками зразка. Мікроструктурні дослідження показують, що інтенсивність і топологія хімічної мікронеоднорідності впливають на розташування, розмір і форму графітових включень.

Дослідження виявило стадійність утворення різних графітових часток у сірому чавуні. Топологія хімічної мікронеоднорідності та пов'язані з нею інтенсивність розподілу хімічних елементів, розташування, розмір і форма графіту, а також хвилеподібна послідовність зміни мікротвердості металевої матриці свідчать про існування динамічних процесів у розплаві чавуну. Від цих процесів залежить структура розплаву і розподіл у ньому хімічних елементів, тобто його хімічна мікронеоднорідність, яка впливає на утворення графіту. Динамічні процеси в розплавах залежать від їхніх фізичних властивостей (щільності, в'язкості, поверхневого натягу тощо), температури та швидкості її зміни, тобто кінетики кристалізації.

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ МАРКИ SAE ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ З ПРОКАТНОГО НАГРІВУ

В. А. Луценко д.т.н., с.н.с., Т. М. Голубенко к.т.н., О. В. Луценко к.т.н., Г. І. Сівак

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

Сортовий прокат круглого перерізу з низьковуглецевих сталей марок SAE вимагає постійного підвищення надійності системи забезпечення якості. Перспективними є процеси, що включають після прокатного нагріву такі температурно-швидкісні параметри охолодження, які забезпечують формування однорідної структури. Залежно від умов проведення гарячої деформації в сталевому прокаті можуть спостерігатися різні структурні стани, зафіксовані охолодженням після гарячої деформації, які визначають властивості металу. Якщо метал піддавати витримкам при температурі кінця деформації, то в ньому протікають процеси збиральної рекристалізації, яка проявляється у формуванні зародків, здатних до подальшого зростання. У сталях із невисоким вмістом вуглецю після гарячої деформації подрібнення аустенітного зерна призводить до зменшення розмірів перлітних ділянок. Утворення внаслідок збиральної рекристалізації великого аустенітного зерна призводить до зменшення кількості структурно-вільного фериту. Тому актуальним є вивчення впливу на структуроутворення сортового прокату сталі марки SAE при використанні з прокатного нагріву температурно-швидкісних параметрів охолодження.

Досліджували сортовий прокат із низьковуглецевої сталі марки SAE 1008 круглого діаметру до 18,0 мм. Прокат після швидкісного чистового блоку з температурою гарячої прокатки (вище за A_3) охолоджували водою перед розкладкою на витки до різних температур вище за A_1 , у подальшому охолоджували із середньою швидкістю $\sim 3,0$ °C/с до температур навколишнього середовища.

Найбільш важливим параметром мікроструктури є розмір зерна, який є одним із найефективніших способів управління структурою, що приводить до зміни механічних властивостей. Металографічні дослідження дозволили встановити вплив параметрів термічної обробки на структуру дослідженої сталі, яка являє собою ферит з невеликими ділянками пластинчастого перліту. За допомогою проведених розрахунково-аналітичних досліджень встановлено, що після високошвидкісної гарячої деформації саме температура кінця охолодження впливає на середній умовний діаметр зерна. При виробництві низьковуглецевого сортового прокату марок типу SAE слід використовувати схему обробки з регульованим двостадійним охолодженням при середній температурі на виткоутворювачі $A_1 + 150$ °C, при якій формується більш рівномірне зерно, що забезпечить мінімальний розкид механічних властивостей. Підвищення температури при охолодженні з прокатного нагріву призводить до утворення різнозернистості у мікроструктурі, що є небажаним.

ЗНОСОСТІЙКІТЬ КОЛІСНОЇ СТАЛІ, ЯКА ПІДДАНА ЛАЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ

**С. І. Губенко^{1,2} д.т.н., проф., Е. В. Парусов¹ д.т.н., с.н.с., І. М. Чуйко¹ к.т.н., ст. досл.,
О. В. Парусов¹ к.т.н., с.н.с.**

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український державний університет науки і технологій:

ННІ Придніпровська академія будівництва та архітектури, м. Дніпро

Доказана доцільність локального зміцнення зони викружки поверхні ковзання шляхом лазерної обробки. На основі дослідження зношених у процесі експлуатації залізничних коліс, що мають різний профіль поверхні ковзання, показано, що протікання інтенсивних пластичних зсувів в умовах дії досить високих контактних напружень під час експлуатації призводить до інтенсивного зносу в зоні викружки, що може викликати підріз гребенів [1, 2].

Встановлено, що після лазерної обробки колісної сталі в режимі імпульсного випромінювання виникає лазерно-загартована зона зі структурою дисперсного мартенситу, яка ідентична «білому шару», що утворюється під час експлуатації на поверхні ковзання. Дослідження показали, що така структура є несприятливою з точки зору експлуатаційної надійності. Показано, що після лазерної обробки в режимі безперервного випромінювання можна отримати мікрокомполітну бейнітну структуру лазерно-зміцненого шару, яка сприятлива для умов експлуатації. При цьому, параметри зміцненого шару, тонкої структури сталі, а також мікротвердість і твердість можна варіювати в певних межах залежно від вихідного стану колісної сталі, а також режиму безперервного лазерного впливу. На основі порівняльного аналізу показано, що режими лазерної обробки, а також ступінь дисперсності вихідної мікроструктури визначають ефект лазерного зміцнення колісної сталі.

Запропоновано перспективний режим з потужністю лазерного променя 600 Вт і швидкістю його переміщення 5–15 мм/с, який рекомендовано використовувати особливо у поєднанні з традиційною термічною обробкою. Рекомендовано також проведення локального лазерного зміцнення зони викружки в умовах виробництва залізничних коліс після гартування перед відпуском для зменшення термічних напружень.

Показано, що підвищення зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки свідчить про ефективність застосування зміцнювальної лазерної технології шляхом цілеспрямованого використання внутрішніх резервів структурної пристосованості поверхневих шарів сталі в умовах експлуатації. Обговорені перспективи локальної лазерної обробки викружки з отриманням мікрокомполітної бейнітної структури в режимі безперервного лазерного випромінювання, що дозволить не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизить ризик підрізу гребенів у процесі експлуатації. Такій обробці можна піддавати як нові залізничні колеса після традиційної термічної обробки, так і використовувати її в залізничних депо під час проведення відновлення зношених профілів поверхні ковзання шляхом переточок.

Літературні джерела

1. Sladkovsky A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Y., Gubenko S. Analysis of stress and strain in freight car wheels. *Computational Method and Experimental Measurements VIII*. Southampton, Boston : Computational Mechanics Publications, 1997. P. 15–24.

2. Taran Y. N., Esaulov V. P., Gubenko S. I. Increase of wear-resistance of railway wheels with different profile of tread. *Metallurgical and Mining Industry*. 2000. No. 2. P. 42–44.

ПРОБЛЕМИ НИЗЬКОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ СТАЛІ 04X14T3P1Ф ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТРУБ ДЛЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

С. І. Губенко^{1,2} д.т.н., проф., В. М. Беспалько к.т.н., с.н.с.

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український державний університет науки і технологій:

ННІ Придніпровська академія будівництва та архітектури, м. Дніпро

Для транспортування та зберігання відпрацьованого ядерного палива використовуються контейнери [1]. Для їх виготовлення застосовують високохромисту сталь 04X14T3P1Ф, леговану бором. При введенні в сталь бору утворюється велика кількість боридів, що негативно впливає на її механічні властивості та технологічну пластичність в процесі виробництва гарячекатаних труб [2-5]. Метою роботи було вивчення впливу боридних включень на механічні та технологічні властивості сталі 04X14T3P1Ф за різних температур.

В сталі 04X14T3P1Ф виявили два типи боридних включень: $(Ti,Fe,Cr,V)_2B$ з оболонкою $(Ti,Cr,V)_2B$ та $(Fe,Cr)_2B$, що мають значну хімічну неоднорідність. В процесі гарячої деформації відбуваються фазові та структурні трансформації: зміна складу боридів внаслідок перерозподілу елементів, динамічне дифузійне дроблення та виділення «сателітних» частинок, крихке руйнування боридів, боридне перетворення $(Ti,Fe,Cr)_2B \rightarrow (Fe,Cr)_2B$, а також оплавлення включень.

Боридні включення в процесі гарячої деформації не пластичні та є джерелами появи тріщин, що сприяє зниженню технологічної пластичності сталі 04X14T3P1Ф. Трансформації боридних включень сприяють зміні структури та механічних властивостей сталі 04X14T3P1Ф за різних умов деформації, що необхідно враховувати під час розробки режимів обробки тиском з метою підвищення технологічної пластичності. Дослідження поведінки включень боридів під час гарячої обробки сталі тиском і їх вплив на формування деформованої матриці, а також розвиток руйнування поблизу включень дозволили визначити режими обробки (температури і ступені деформації), які сприяють отриманню оптимальної структури, що забезпечує підвищену ударну в'язкість сталі 04X14T3P1Ф.

Літературні джерела

1. Горынин И. В., Карзов Г. П., Филимонов Г. Н. Разработка и совершенствование конструкционных материалов для оборудования нового поколения АЭС повышенной безопасности и ресурса. Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя : збірник статей. Київ : Наукова думка, 1998. С. 279–283.

2. Proidak Yu. S., Gubenko S. I., Bepalko V. N., Zhilenkova E. V., Balev A. E. Influence of non-metallic inclusions on the structural heterogeneity of high-alloy steels. *New Technologies and Achievements in Metallurgy, Materials Engineering and Production Engineering* : collective monograph. Chestochowa : Chestochowa University of Technology. 2013. Vol. 2. P. 128–134.

3. Губенко С. И., Беспалько В. Н., Жиленкова Е. В. Влияние температуры и степени деформации на характер изменения боридов в высокохромистой стали с бором. *Теория и практика металлургии*. 2006. № 4–5. С. 158–160.

4. Губенко С. І. Вплив боридних включень на структуру і властивості сталі 04X14T3P1Ф для чохлів відпрацьованих паливних касет атомних електростанцій. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2024. Т. 60. № 4. С. 68–75.

5. Gubenko S. About the problems of low technological plasticity of steel 04H14T3R1F used in the production of pipes for nuclear energy. *Machines. Technologies. Materials*. 2024. Vol. 1(4). P. 140–143. URL: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2024/4/140.full.pdf>

ЗВ'ЯЗОК ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ ІЗ МОРФОЛОГІЄЮ ТА РОЗПОДІЛОМ ГРАФІТОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СІРИХ ЧАВУНАХ

Е. В. Олійник, Е. В. Парусов д.т.н., с.н.с., А. Ю. Борисенко д.т.н., с.н.с.

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

Відомо, що для кількісного опису фракталів достатньою умовою є визначення фрактальної розмірності або параметра, який описує збереженість статистичних характеристик при зміні масштабу. Аналіз традиційних методів дослідження структури металів і сплавів (світлова та електронна мікроскопія, кількісна металографія, рентгеноструктурний аналіз) свідчить про те, що жоден з них не може бути універсальним і придатним для вирішення повного обсягу завдань щодо ідентифікації кількісних характеристик структури металевих матеріалів [1].

Застосування теорії фракталів для аналізу або моделювання різних процесів формування структур та визначення їхнього зв'язку із властивостями матеріалу є найбільш поширеним, доступним і достовірним напрямом у матеріалознавстві. Пошук середньої фрактальної розмірності графітових включень у структурі сірого чавуну проводили у відповідності до вимог ГОСТ 3443-87 (додаток № 3, шкала № 1) за методикою, сутність якої полягала у визначенні найближчої збіжності значень фрактальної розмірності, яку обчислювали за допомогою клітинного та точкового методів [2].

За результатами розрахунку отримано наступні середні значення фрактальної розмірності (D_i) в залежності від морфології та розподілу графітових включень: пластинчаста прямолінійна форма (1,180), пластинчаста завихрена форма (1,328), гніздоподібний розподіл (1,344), розетковий розподіл (1,539), розподіл у міждендритних колоніях (1,590), міждендритний точковий розподіл (1,799). Додатково визначено фрактальні розмірності металевої матриці (D_f), а також довжини міжфазної границі графіт/металева матриця (L_{if}) у структурі сірого чавуну, які змінювались в інтервалах $D_f = 1,977-1,890$ та $L_{if} = 5820-21071$ пікс. відповідно.

Отримані значення фрактальних розмірностей дозволили розмежовувати графітові включення за морфологією та розподілом у структурі сірого чавуну, що обумовлює можливість створення універсального методу кількісної оцінки елементів його структури із використанням фрактального аналізу.

Розрахункові дані мають конкретні числові значення, тому у подальшому вони можуть бути використані для створення аналітичних моделей прогнозного визначення властивостей сірих чавунів в залежності від особливостей формування кінцевої структури. Розглянутий метод визначення фрактальної розмірності може бути корисним під час дослідження особливостей процесів структуроутворення та оцінки морфології графітових включень на різних стадіях оброблення сірих чавунів, починаючи з етапу виплавляння та завершуючи фінішною термічною обробкою. Додатково фрактальний аналіз може бути задіяно для визначення та оцінки впливу морфологічних параметрів графітових включень на формування показників якості сірих чавунів, що викликає певні труднощі при використанні традиційних методів кількісного аналізу. Подальші дослідження будуть сфокусовані на встановленні статистично значущих кореляційних зв'язків фрактальної розмірності з властивостями сірих чавунів в залежності від особливостей утворення кінцевої структури.

Літературні джерела

1. Штофель О. О. Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей : дис. канд. техн. наук : 05.16.01. Київ, 2021. 163 с.
2. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Фракталы в материаловедении. Днепропетровск : ПГАСА, 2006. 253 с.

ПРО НАПРЯМИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ СФЕРОЇДИЗАЦІЇ ПЕРЛІТУ У БОРВМІСНИХ СТАЛЯХ ДЛЯ ХОЛОДНОЇ ВИСАДКИ

М. О. Соболенко, Н. С. Романова к.т.н., доц.

Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро

Використання борвмісних сталей дає змогу істотно розширювати обсяги виробництва високоміцних кріпильних виробів, які отримують методами холодної деформації. У технологіях отримання холоднодеформованих виробів найефективнішим способом підготовки структурного стану сталі перед холодною деформацією є технологічна операція пом'якшувальної термічної обробки. Її призначення – зміна структурного стану, що полягає в трансформації карбідної фази з пластинчастої в більш сприятливу глобулярну форму. Сталь з такою структурою має найменшу твердість і легше обробляється під час подальших переробок (висадка, різання, холодне об'ємне штампування та ін.). Крім цього, зернистий перліт є оптимальною вихідною структурою під час проведення подальшого термічного оброблення, оскільки має меншу схильність до зростання аустенітного зерна під час нагрівання. Тому конструкційні сталі для холодної висадки повинні мати у початковому стані структуру зернистого перліту певного балу.

Для отримання в гарячекатаних сталевих заготовках структури зернистого перліту їх, як відомо, піддають перед висадкою сфероїдизуючому відпалу, який є дифузійним процесом. Тому наявні способи сфероїдизації потребують тривалого часу для здійснення, а сам процес є енергоємним. Для прискорення процесу сфероїдизації застосовують різні схеми попередніх обробок як з прокатного, так і зі спеціального нагріву заготовки.

Використовувані режими попередніх обробок перед сфероїдизацією призводять до збільшення дисперсності частинок карбідів в перлітних колоніях і до підвищеного ступеня дефектності кристалічних ґрат феритної матриці за рахунок зниження температури розпаду аустеніту в інтервалі евтектоїдного (перлітного) перетворення. Зазначені зміни у структурі після режимів попередньої обробки призводять до деякого зменшення тривалості процесу сфероїдизації, але це зменшення не є досить ефективним.

Розробка режимів зі значним скороченням тривалості сфероїдизуючого відпалу для низьковуглецевих борвмісуючих сталей є актуальним завданням, оскільки це дозволить скоротити не тільки енерговитрати на термічну обробку, а й здійснювати сфероїдизуючий відпал у потоковій технологічній лінії виробництва кріпильних виробів.

У роботі розглядаються такі три основні напрямки комплексної інтенсифікації сфероїдизуючого відпалу. Перший напрямок пов'язаний з підготовкою структурного стану сталевий заготовлі перед відпалом з урахуванням особливостей сфероїдизації цементиту в низьковуглецевих сталях та вимог до структури після відпалу з розподілу глобулів цементиту у феритній матриці. Необхідні зміни в структурі безпосередньо перед витримкою процесу сфероїдизації пропонується досягати шляхом розпаду аустеніту, що переохолоджується, при більш низьких температурах. Другий напрямок інтенсифікації пов'язаний із розробкою та обґрунтуванням температурних режимів сфероїдизуючого відпалу з урахуванням особливостей зміни значень термодинамічного та кінетичного факторів у процесі розвитку структурних перетворень. Третій напрямок інтенсифікації сфероїдизуючого відпалу пов'язані з використанням нагріву внутрішнім теплоносієм на всіх стадіях реалізованого режиму. Нагрів внутрішнім теплоносієм призводить до локального підвищення температури в мікро ділянках на міжфазних ферито-цементитних межах перлітних колоній, тобто там, де швидкість дифузії компонентів є вирішальною для структурного перетворення пластинчастого перліту на зернистий.

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ ВИРОБНИЦТВА ЛИТИХ ЗАГОТОВОК ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ІЗ СІРОГО ЧАВУНУ НА ЇХ СТРУКТУРУ І ТВЕРДІСТЬ

А. Ю. Борисенко д.т.н., с.н.с., О. Є. Барановська к.т.н.

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

Виробництво якісних заготовок поршневих кілець індивідуального відливання із сірого чавуну ускладнюється тим, що необхідна структура графіту та металевої матриці формується у литому стані без використання термічної обробки. Це зумовлює необхідність чіткого контролю хімічного складу чавуну та технології лиття. Контрольованою характеристикою механічних властивостей литих кілець-заготовок із сірого чавуну є твердість, яка адитивно залежить від структури графіту та структури металевої матриці. Навіть при дотриманні технології виробництва можуть виникати випадки формування незадовільної структури та твердості литих кілець-заготовок із сірого чавуну. Причина цього полягає у спадковому впливі шихтових матеріалів, негативну дію яких можна усунути шляхом зміни режимів лиття або варіювання хімічного складу чавуну.

Ідея досліджень полягала в аналізі впливу технологічно допустимих діапазонів температури перегріву, часу витримки та температури розливання на структуру та твердість кілець-заготовок при заданому хімічному складі чавуну в % мас.: C = 3,72; Si = 2,82; Mn = 0,79; P = 0,4; S = 0,045; Ni = 0,23; Cr = 0,26; Cu = 0,48; Mo = 0,53; Ti = 0,05.

Проведена оцінка впливу технологічних факторів лиття у піщано-глинисті форми, а саме температури перегріву, часу витримки та температури розливання розплаву на твердість і структуру литих заготовок для виробництва компресійних поршневих кілець різного розміру. За вимогами технологічної інструкції температура перегріву має бути 1530–1560 °С. Показано, що коливання температури перегріву та розливання розплаву в діапазоні 10-50 °С та часу його витримки протягом 1-11 хвилин не надають закономірного впливу на твердість та мікроструктуру виливків кілець-заготовок із сірого чавуну. Твердість за довжиною виливків кілець-заготовок неоднакова, та становить 94-112 HRB, що відповідає вимогам ГОСТ 621-87 «Кольца поршневые двигателей внутреннего сгорания». Найменша твердість виливків кілець-заготовок спостерігається в ділянках, що прилягають до ливникової системи.

Встановлено, що структура графіту та металевої матриці виливків кілець-заготовок із сірого чавуну, незважаючи на дотримання технологічного процесу їх виробництва, часто не відповідає вимогам зазначеного стандарту. Максимальний розмір графітових включень становить 120-250 мкм, що перевищує необхідний розмір 80 мкм згідно ГОСТ 621-87. Подальшу термічну обробку (середній відпуск) без фазової перекристалізації проводили з метою зняття ливарних напружень, яка призвела до збільшення розміру графітових включень.

У металевій матриці виливків кілець-заготовок із сірого чавуну формуються не допустимі за ГОСТ 621-87 бейніто-мартенситні структури, відпуск яких, викликає зниження твердості кілець-заготовок.

Для забезпечення відповідності вимог за ГОСТ 621-87 щодо структури графіту та металевої матриці, а також запобігання зниження твердості після термічної обробки литих кілець-заготовок необхідно зменшити максимальний розмір графітових включень до 80 мкм та забезпечити формування дисперсного перліту з не більше 5 % доєвтектоїдного фериту. Для гарантованого забезпечення вищенаведених вимог, за умови сталості технологічного процесу лиття, доцільно корегування хімічного складу розплаву чавуну з урахуванням вмісту в ньому газів (O, N, H), що спадково залежить від походження шихтових матеріалів, основні з яких – доменний чавун та оборот власного виробництва.

СІРИЙ ЧАВУН ЛЕГОВАНИЙ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИМ СПЛАВОМ

Ж. В. Пархомчук к.т.н, с.н.с., В. І. Вейс докт. філ., О. В. Железняк

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

Високоентропійні сплави викликають значний інтерес у сучасному матеріалознавстві завдяки широкому спектру можливих комбінацій елементів і, відповідно, унікальним властивостям, які відсутні в традиційних матеріалах, зокрема стійкості до високотемпературного окислення. Однак створення високоентропійних сплавів із структурою твердих розчинів заміщення є вкрай складним завданням, що потребує використання високочистих компонентів із мінімальною кількістю домішок, щоб запобігти утворенню твердих розчинів проникнення. Це робить дослідження структури і властивостей високоентропійних сплавів дуже витратним. Тому на початкових етапах досліджень при створенні нових високоентропійних сплавів замість чистих компонентів доцільно використовувати феросплави, особливо у контексті взаємодії високоентропійних сплавів із розплавами на основі заліза, де можна знехтувати наявністю у феросплавах вуглецю та інших домішок.

У цьому дослідженні розглянуто ефективність легування сірого чавуну (3,46 % C, 2,30 % Si, 1,1 % Mn) високоентропійним сплавом системи Fe-Ni-Cr-Cu-Mn (24,18 % Fe, 20,85 % Ni, 23,30 % Cu, 15,8 % Mn, 14,28 % Cr, 1,46 % Si, 0,68 % C), отриманим шляхом вакуумної індукційної плавки, та сумішшю чистих компонентів у кількості 2 та 5 мас. % для порівняння. Хімічний аналіз показав ефективніше засвоєння таких елементів, як Ni, Cu та Mn, при легуванні чавуну високоентропійним сплавом. Крім того, після відпалу при 920-930 °C протягом 4 год. чавун, легований високоентропійним сплавом, показав дещо вищі показники твердості, що свідчить про перспективність такого підходу для отримання зносостійких сплавів.

НЕРІВНОВАЖНИЙ ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ГРАФІТИЗАЦІЇ ЧАВУНІВ**С. В. Бобирь д.т.н., с.н.с., А. Ю. Борисенко д.т.н., с.н.с., Г. В. Левченко д.т.н., проф.****Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро**

Розвинуто дифузійно-вакансійний механізм, що описує процес графітизації чавуну, і не використовує тиск графіту на матрицю для пояснення дифузії заліза. Розраховано значення термодинамічних сил та кінетичних коефіцієнтів для випадку графітизації бінарного сплаву системи Fe–C з 2,5 % при 1100 °C. Встановлено, що в умовах стаціонарного потоку вакансій при графітизації чавуну в твердій фазі, концентрація вакансій на межі γ -фаза – графіт приблизно в 0.97723 рази менша від концентрації вакансій у γ -фазі. Виконано оцінку впливу легуючих елементів, наприкладі хрому та кремнію, на графітизацію чавуну з 2,5 % C.

Запропоновано термодинамічний параметр графітизації T_G , що враховує вплив усіх легуючих елементів (за винятком вуглеця і заліза) [1]:

$$T_G = \sum_{k=1}^N \beta_k N_k, \quad (1)$$

де N – кількість врахованих легуючих елементів у чавуні.

При даній температурі графітизації для утворення в структурі чавуну графіту, а не цементиту, має виконуватися термодинамічна умова:

$$T_G \geq \ln(a^G_C / a^K_C) \approx a^G_C - a^K_C. \quad (2)$$

При $T_G > 0$ термодинамічний параметр графітизації характеризує ступінь стабільності графіту і може бути пов'язаний з морфологією і розміром графітних включень.

Літературні джерела

1. Bobyr S. V., Krot P. V. Nonequilibrium thermodynamic analysis of diffusion processes in the steel – carbon thin film tribological system. *Material Science & Engineering International Journal*. 2022. Vol. 6(1). P. 14–18. <https://doi.org/10.15406/msej.2022.06.00174>

РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ АКУСТООПТИЧНИХ КРИСТАЛІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ТЕЛУРУ

О. І. Бабаченко чл.-кор. НАН України, д.т.н., І. М. Любека

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

Підвищення якості акустооптичних (далі АО) кристалів може значно покращити точність та ефективність військових приладів. Це є надзвичайно важливим у контексті війни, де кожна технічна перевага може бути вирішальною. Військові прилади повинні працювати в екстремальних умовах, таких як висока температура, вібрації, механічні удари та електромагнітні завади. Удосконалення АО кристалів для підвищення їх витривалості та надійності забезпечує стабільну роботу приладів навіть у найскладніших умовах.

Телур і його сполуки, зокрема діоксид телуру, мають унікальні властивості, які роблять їх незамінними для АО модуляторів, дефлекторів та переналаштовуваних фільтрів. Потреба у вирощуванні великих високоякісних кристалів TeO_2 виникає через зростаючий попит на нові технології, що вимагають матеріалів із високими оптичними характеристиками для використання у відповідальних приладах. Проте вирощування великих кристалів TeO_2 пов'язане з низкою технічних викликів, таких як необхідність оптимізації температурних градієнтів, швидкості росту та зменшення дефектів у кристалах.

Для успішного вирощування великих кристалів TeO_2 необхідне вивчення процесу кристалізації та фазових переходів у матеріалі, що є критично важливим для отримання суттєвих переваг у якості монокристалів.

Ці знання дозволяють точно налаштувати параметри процесу, які є ключовими факторами для отримання високоякісних кристалів. Також слід зазначити, що вирощування великих кристалів TeO_2 вимагає контролю чистоти вихідних матеріалів і точного аналізу домішок.

Таким чином, застосування нових технологічних рішень щодо вирощування кристалів TeO_2 дозволять вирішити проблеми масштабування розмірів вирощуваних кристалів придатних для застосування у приладах відповідального призначення.

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОЇ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХУ

Г. А. Кононенко^{1,2} д.т.н., ст. досл., Р. В. Подольський¹ докт. філ., О. А. Сафронова¹

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

Залізничний транспорт є складовою критичної інфраструктури. Інновації у залізничній галузі не лише покращують ефективність руху, а й вносять значний вклад у безпеку перевезень та оптимізацію витрат на обслуговування. Завдяки впровадженню новітніх технологій та матеріалів, сучасні залізничні системи стають надійнішими та економічнішими в експлуатації.

Взаємодія колеса та рейки є фізичною основою руху поїздів залізницями. При цьому вимоги до показників взаємодії коліс та рейок у різних зонах контактування суперечливі. З одного боку зчеплення коліс з рейками має бути таким, щоб забезпечувався малий опір руху поїзда. З іншого боку – для реалізації необхідної сили тяги необхідно забезпечувати високий та стабільний рівень зчеплення локомотивних коліс з тією самою поверхнею.

Контактна втома і зношування є конкуруючими механізмами ушкодження і при поєднанні певних умов почергово виникають на залізницях, що призводить до підвищеної змінюваності коліс та рейок. Експлуатаційна надійність та довговічність пари колесо-рейка забезпечується за раціонального балансу зношування та зносостійкості. Таким чином, підвищення міцності та твердості обода колеса є одним із найважливіших завдань для забезпечення загальної надійності рухомого складу.

Достатня зносостійкість сприяє тривалому збереженню геометрії профілю та коректному розподілу навантажень у плямі контакту. Однак, за умов коли метал вздовж поверхні контакту тривалий час підлягає дії експлуатаційних навантажень, структура зазнає змін: виникає локальна деформація, насичення дислокаціями, можуть зароджуватися та розвиватися втомні тріщини. Тому певна міра зношування, в результаті якого може зменшуватись довжина втомних тріщин від поверхні та видалення деструктурованого металу є корисним процесом.

Сучасні тенденції у виробництві конструкційних сталей залізничного призначення показують, що перспективними є дегазація сталі у вакуумі з метою зменшення вмісту водню, ефективне розкислення та раціональне легування сталі, які в комплексі забезпечують задані механічні та експлуатаційні характеристики [1-3]. Однак слід враховувати також спосіб виготовлення (лите, деформоване) та структурний стан (термічна обробка, структурна неоднорідність) коліс та рейок. Залежно від хімічної та структурної неоднорідності реакція на дію експлуатаційних навантажень може відрізнятись.

Результати отримані в рамках Українсько-німецького проекту «Вплив структурної та хімічної неоднорідності на зносостійкість та поширення втомних тріщин в місці контакту колеса-рейки» (номер держреєстрації 0124U003037) за договором М14-2024/КС.0227.24 від 30.05.2024.

Літературні джерела

1. Осташ О. П., Анофрієв В. Г., Андрейко І. М., Мурадян Л. А., Кулик В. В. Про концепцію вибору сталей для високоміцних залізничних коліс. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. Т. 48. № 6. С. 7–13.
2. Бабаченко А. И., Кононенко А. А., Кныш А. В, Хулин А. Н., Дементьева Ж. А., Шпак Е. А. Влияние твердости и химического состава железнодорожных колес на стойкость к образованию дефектов на поверхности катания. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. №1. С. 53–56.
3. Gubenko S., Ivanov I., Kononov D., Kiselev I. Wear of railway wheels tread. *AIP Conf. Proc.* 2022. 2503. 080010. <https://doi.org/10.1063/5.0100009>

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА СТРУКТУРУ І ТВЕРДІСТЬ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ

І. Р. Поворотня к.т.н., О. А. Сафронова, Р. В. Подольський докт. філ., Е. В. Олійник

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

Зважаючи на чималу кількість комплексних підходів із застосуванням інформаційних технологій до обґрунтування вибору вмісту хімічних елементів в сталі та закладених у них обмеженнях, запропоновано використання концепції спрямованого хімічного зв'язку, що забезпечує високу прогнозну точність та одержання необхідних її властивостей на затребуваному споживачем рівні. Був виконаний аналіз вимог нормативної документації щодо хімічного складу, а саме вмісту основних компонентів таких як вуглець, марганець і кремній, в сталі для залізничних осей марок EA1N, F і OC. Застосовані інформаційні технології з використанням концепції спрямованої міжатомної взаємодії, коли критерії є комплексними та характеризують весь склад одночасно, а також отримані лінійні закономірності впливу інтегрального показника хімічного складу на твердість.

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу хімічного складу на формування і трансформацію фазової структури та твердості після деформації і термічної обробки вуглецевої сталі для залізничних осей. Об'єктом досліджень були лабораторні злитки вуглецевих сталей, які співставні за хімічним складом зі сталями для залізничних осей відповідно до державного, європейського та американського стандартів. Виготовлені з них зразки піддавалися гарячій пластичній деформації (ГПД) з наступною термічною обробкою (ГПД + ТО). Проведений мікроструктурний аналіз досліджуваних сталей.

Виявлено закономірності впливу хімічного складу на співвідношення фаз та твердість досліджених сталей у різних станах: литому, після ГПД та ГПД + ТО з використанням концепції спрямованого хімічного зв'язку. Встановлено, що за інтегрального параметру зарядового стану (ZY) менше 1,20 е, тобто за певного хімічного складу в досліджуваному інтервалі значень, твердість сталі у стані після ГПД перевищує твердість такої сталі у стані після ГПД + ТО.

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОТРИМАННЯ БЕЗКАРБІДНОГО БЕЙНІТУ В ТОВСТОЛИСТОВОМУ МЕТАЛОПРОКАТІ

Г. А. Кононенко^{1,3} д.т.н., ст. досл., Т. В. Кімстач^{1,2} к.т.н., доц.,
Р. В. Подольський¹ докт. філ., О. А. Сафронова¹

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

³ НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

Для отримання необхідного рівня механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей важливим є грамотний вибір параметрів технології зміцнюючої термічної обробки товстолистого металопрокату з окремого нагріву, з урахуванням товщини листа та хімічного складу сталі.

Перспективним напрямом отримання високої міцності при забезпеченні достатньої пластичності та стійкості до розтріскування конструкційних сталей є формування структури дрібнодисперсного бейнітного фериту без виділення карбідів цементитного типу у поєднанні зі стабільним залишковим аустенітом [1]. Формування такої структури досягається завдяки комплексному легуванню сталі хімічними елементами, які дозволяють практично повністю придушити процеси утворення карбідів у бейнітному фериті (кремній, алюміній, кобальт, нікель) [2], та/або відповідної термічної обробки.

Стандартним методом термічної обробки для формування структури безкарбідного бейніту (БКБ) є ізотермічне загартування, яке може проводитися як з температури аустенітизації, так і з міжкритичного інтервалу температур.

Аналіз літературних джерел показав, що для сталей певного хімічного складу отримання БКБ можливе в результаті безперервного охолодження з температури аустенізації як на повітрі так і з піччю. За даними роботи [3] перспективним є наступний режим термічної обробки: безперервне охолодження на повітрі та з піччю з міжкритичного інтервалу температур Поряд з бейнітом, у структурі зберігається деяка кількість рівномірно розподіленої феритної складової. У роботах зазначається [4, 5], що сукупність безкарбідного бейніту (БКБ), фериту та достатньої кількості залишкового аустеніту може позитивно впливати на характеристики тріщиностійкості.

Літературні джерела

1. Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H. Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. No. 8. P. 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.005>
2. 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. *Metall Mater Trans A*. 2016. Vol. 47. P. 1028–1039. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3285-6>
3. Kaletin A. Y., Ryzhkov A. G., Kaletina Y. V. Enhancement of impact toughness of structural steels upon formation of carbide-free bainite. *Phys. Metals Metallogr.* 2015. Vol. 116. P. 109–114. <https://doi.org/10.1134/S0031918X15010068>
4. Yi H. L., Chen P., Bhadeshia H. K. D. H. Optimizing the morphology and stability of retained austenite in a δ -TRIP steel. *Metall Mater Trans A*. 2014. Vol. 45. P. 3512–3518. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2267-4>
5. Mohanty R. R., Girina O. A., Fonstein N. M. Effect of heating rate on the austenite formation in low-carbon high-strength steels annealed in the intercritical region. *Metall Mater Trans A*. 2011. Vol. 42. P. 3680–3690. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0753-5>

Прогресивні технології обробки металу тиском

УДК 621.771.251

ФОРМУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОКАТКИ ЗА ДОВЖИНОЮ СМУГИ

**В. І. Шибакінський к.т.н., доц., М. О. Рибальченко к.т.н., доц.
М. В. Михайловський к.т.н., доц., М. Д. Зінченко к.т.н., с.н.с.**

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Відомо, що монотонна зміна температури прокатки за довжиною смуг (так званий «клин температури») виникає на переважній більшості станів гарячої прокатки, незалежно від типу стану, розташування основного обладнання та сортаменту продукції. Вибір способу усунення наслідків клина температури залежить від багатьох складових, більшість яких заснована на компенсації вже наявного клину чи його наслідків. Наприклад, прискорення чистової групи клітей, зміна розхилу між валками кліті в залежності від зміни температури металу, різні способи підігрівання заднього кінця розкату тощо. Звісно, що усунення цього явища більш ефективно, ніж спроби компенсації його наслідків.

В даному дослідженні здійснена спроба визначити управляючі дії для стабілізації температури штрипсів на безперервному стані з типовим розташуванням прокатного обладнання. Проаналізований процес прокатки типових заготовок довжиною 12 м і перерізом 360 x 110 мм у готові смуги 360 x 3,4 мм згідно технологічної інструкції та реальним налаштуванням величин обтиснення та швидкісним режимам роботи клітей.

У результаті дослідження зміни температури металу, тобто температури прокатки у першій кліті безперервного стана, з урахуванням умов охолодження різних ділянок заготовки після видачі її із печі (при однаковій початковій середньомасовій температурі за довжиною), виявилось, що клин температури утворюється при прокатці у першій кліті (час прокатки ~ 50 с) і, за відомих обставин, він трохи зменшується в усіх наступних клітях.

Аналіз результатів дослідження показав, що основною причиною утворення клина температури на подібних за розташуванням обладнання станах є різний час охолодження окремих ділянок заготовки при транспортуванні її від вікна видачі з печі до входу цієї ділянки заготовки у валки першої кліті. Показано, що при відповідних технологічних умовах прокатки ефективною управляючою дією процесом формування температури прокатки у першій кліті може бути зміна швидкості витягування заготовки з печі. Витягування відбувається за допомогою спеціальних валків з електричним приводом. Тому керування швидкістю витаскувача в залежності від дійсної різниці температур прокатки переднього та заднього кінців розкату може бути ефективним способом стабілізації температури. Цей факт був підтверджений експериментально на штрипсовому прокатному стані 300 [1]. Крім того, показано, що різні траєкторії переміщення переднього та заднього кінців заготовки мають незначний вплив на їх температуру перед прокаткою.

Таким чином, для стабілізації температури прокатки за довжиною смуги треба забезпечити однаковий час охолодження усіх ділянок заготовки при транспортуванні її до першої кліті.

Літературні джерела

1. Трегубов Ю. В., Макаренко Ю. М., Шибакінський В. И. и др. Стабилизация температуры прокатки по длине раската. *Сталь*. 1984. № 9. С. 57–59.

ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ КУМУЛЯТИВНОГО СТРУМЕНЮ В ПЕРЕШКОДУ ЗМІННОЇ ТОВЩИНИ

Є. С. Болюбаш

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

Піротехнічні пристрої на основі лінійних кумулятивних зарядів широко використовуються в ракетно-космічній техніці для розділення ступенів і відділення конструкційних елементів [1]. При проектуванні даних систем виникає низка складних інженерних задач, однією з яких є визначення глибини проникнення кумулятивного струменю в перешкоду змінної товщини. Точність прогнозування глибини проникнення має критичне значення для забезпечення надійності та безпеки роботи ракетно-космічних систем. Наявність локальних неоднорідностей в перетині розділення ракети суттєво ускладнює процес проектування та вимагає детального аналізу поведінки кумулятивного струменю.

Для вирішення цієї задачі, основну увагу приділено встановленню функціональної залежності між глибиною проникнення кумулятивного струменю і фокусною відстанню встановлення лінійних кумулятивних зарядів [2, 3]. Наведено розрахунок знаходження глибини проникнення кумулятивного струменю для довільного перетину конструкції зі змінною товщиною перешкоди.

Матеріали можуть бути корисними інженерно-технічним робітникам при розробці і оптимізації піротехнічних систем у ракетно-космічній техніці.

Літературні джерела

1. Колесников К. С., Козлов В. И., Кокушкин В. В. Динамика разделения ступеней летательных аппаратов. Москва : Машиностроение, 1977. 224 с.
2. Шкіль М. І., Слєпкань З. І., Дубинчук О. С. Алгебра і початки аналізу : підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закладів. Київ : Зодіак-ЕКО, 2006. 272 с.
3. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента : перевод с англ. Е. Г. Коваленко ; под ред. чл.-корр. АН СССР Н. П. Бусленко. Москва : Мир, 1972. 381 с.

Моделювання та оптимізація технологічних процесів

УДК 669.02/09.411:669.18.001.8

ПРОГНОЗНІ МОДЕЛІ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОДОБАВОК, ЯК ЗАПОРУКА РАЦІОНАЛЬНОГО ЇХ ВИКОРИСТАННЯ НА УКП

Д. М. Тогобицька д.т.н., проф., І. Р. Поворотня к.т.н., О. В. Кукса к.т.н., С. В. Греков,
Н. Є. Ходотова

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

Сучасна металургійна промисловість знаменується комп'ютерно - інформаційним проривом, що забезпечується науковим фундаменталізмом. Про це свідчить значна кількість створених спеціалізованих комп'ютерних систем, які у Європейських країнах та Японії доведені до рівня «цифрового двійника процесу», що в свою чергу забезпечує високу керованість процесів виплавки металу. Запорукою адекватної роботи програмного забезпечення таких систем є стійкі прогнози моделі, що адаптовані до конкретного виробництва та розроблені на достовірних даних. У ІЧМ НАНУ створено банк даних «Металургія», який є безумовним лідером за об'ємом зібраних даних, його інформаційним наповненням (фізико-хімічні, теплофізичні властивості взаємодіючих розплавів, технологічні особливості виробництва та інші дані), що охоплюють різні класи сталей, сплавів, чавунів, шлаків, ШУС, феросплавів, як важливих складових металургійного виробництва та його повний цикл одержання якісної сталі. Саме ці дані використані нами у якості інформаційної основи при моделюванні, а фізико-хімічне підґрунтя забезпечене використанням унікальної концепції спрямованого хімічного зв'язку [1], яка на відміну від інших розглядає розплави, як хімічно єдині системи, а впровадження параметрів міжатомної взаємодії розкриває суть нерозривного ланцюга «склад - технологія - структура - властивості».

Згідно відправних положень концепції спрямованого хімічного зв'язку хімічна індивідуальність системи, реакційна здатність та структурний стан розплавів виражаються за допомогою методу кодування хімічного складу дослідного розплаву в інтегральних параметрах міжатомної взаємодії: Z^Y – параметр зарядового стану системи, e ; d – середньозважена між'ядерна відстань, 10^{-1} нм; tga – константа для кожного елемента, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ρl – спрямована зарядова щільність, е/нм. На основі виявлених вагомих інформативних параметрів міжатомної взаємодії та результатів кореляційно-регресійного аналізу розроблено прогнози моделі для розрахунку важливих фізико-хімічних властивостей феромарганцю, феросилікомарганцю, феросиліцію, феробору, алюмінієвого дроту, хромовмісних феросплавів, зокрема температури плавлення та кристалізації, щільності і теплофізичних характеристик (теплопровідність; теплоємність; теплота плавлення; питомий електроопір; тимчасовий опір) з достатньою точністю прогнозу ($R^2 \geq 0,9$), що дозволяє рекомендувати їх використання в системах АСНД та АСУТП сталеплавильного виробництва. Вищезгадані феросплави зокрема використовуються при доведенні до затребуваного хімічного складу для сталей марок 40X та SAE. Проведення на репрезентативних вибірках розрахунків по t – критерію Стьюдента, дозволило встановити значимість вмісту алюмінію на зміну температури плавлення сталі SAE, що узгоджується з технологічною картою процесу, а саме обробкою на установці «ківш-піч» та додатковим введенням алюмінію. Таким чином, органічне поєднання програмних продуктів, що функціонують у виробників з запропонованими блоками розроблених прогнозних моделей дозволить одержати адекватні числові значення ступеню засвоєння добавок, що реально відображають процес розподілу та взаємодії елементів в системі «метал-шлак» і підвищити ефективність прийнятих оперативних рішень.

Літературні джерела

1. Приходько Э. В., Тогобицкая Д. Н. Физико-химическое моделирование процессов межатомного взаимодействия в металлургических расплавах. *Вестник ПИТУ*. 1998. Вып. 7. С. 72–83.

КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ТА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ШТАБОВОГО І СОРТОВОГО ПРОКАТУ

С. О. Воробей д.т.н., с.н.с.

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

Багаторічні експериментальні та теоретичні дослідження технологій гарячої прокатки широкоштабового та сортового прокату, які проведено у відділі процесів і машин обробки металів тиском, дозволили розробити комплекс математичних моделей прогнозування параметрів деформації та показників якості продукції. Розроблені моделі відрізняють від відомих більш високою точністю прогнозування, в тому числі за рахунок факторів, які раніше не враховували, або враховували недостатньо коректно. Зокрема, враховується фактичний хімічний склад прокату; неповне розміщення металу в паузах між деформаціями; конструктивно-структурний склад прокатного стана (характеристики та розташування прокатних клітей, застосування теплосберігаючих екранів, проміжних перемотувальних пристроїв, систем примусового охолодження розкатів між клітями; параметрів пристроїв для охолодження прокату після завершення деформації); параметри охолодження валків.

Комплекс математичних моделей дозволяє розраховувати наступні параметри:

- температуру прокату в лінії стана, починаючи з видачі заготовки з нагрівального пристрою, і завершуючи післядеформаційним охолодженням прокату;
- енергосилові параметри деформації у всіх прокатних клітях стана – горизонтальних і вертикальних;
- температурні параметри експлуатації робочих прокатних валків;
- знос прокатних валків;
- поздовжню та поперечну різнотовщинність штаб;
- відхилення листового прокату від площинності;
- параметри мікроструктури листового та сортового прокату;
- механічні властивості прокату: границя плинності, тимчасовий опір, відносне подовження, відносне звуження (для сортового прокату).

Розроблений комплекс математичних моделей успішно застосовувався на багатьох прокатних станах металургійних підприємств для вирішення важливих практичних задач. Серед них доцільно виділити наступні:

- розробка ефективних варіантів реконструкції прокатних станів;
- порівняльна оцінка різних пропозицій на будівництво, або реконструкцію прокатних станів;
- модернізація систем охолодження прокатних валків;
- визначення раціональних параметрів технологічного обладнання прокатних станів;
- освоєння нових видів широкоштабового прокату, арматурного прокату і катанки;
- розробка більш ефективних режимів прокатки існуючого сортаменту.

Створений комплекс математичних моделей дозволить визначати ефективні рішення по відродженню об'єктів чорної металургії України у післявійськовий період.

РОЗВИТОК СПОСОБІВ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ПРОКАТНИХ КЛІТЕЙ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

В. В. Вереньов д.т.н., с.н.с.

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

Розглянуто заснований в ІЧМ в останні два десятиліття новий підхід до визначення технічного стану обладнання прокатних клітей [1, 2]. Він базується на використанні параметрів перехідних процесів в нестационарних режимах роботи, перш за все під час захвату металу валками та даних масових дослідно-промислових вимірювань на шести безперервних широкополосних станах гарячої прокатки. Вперше запропоновано визначати стан зносу та зазорів за часом запізнення реакції ділянок лінії приводу на ударне навантаження в прокатній кліті [3]: чим більше зазор, тим більше час запізнення реакції. Цей показник використано в інших способах: задання полоси в валки зі збільшенням швидкості (удару по валках) [4], з використанням швидкості розповсюдження ударної крутильної хвилі вздовж ділянок, в способі для багатониткових дротяних станів [5]. Вперше встановлено наявність кореляційних полів значень динамічного і статичного моментів, які апроксимуються лінійною залежністю, кут нахилу яких змінюється з погіршенням технічного стану обладнання і технології [2]. Запропоновано поряд з коефіцієнтом варіації моменту в сталому режимі прокатки використовувати значення коефіцієнтів варіації динамічного моменту і коефіцієнта динамічності, які визначаються з масивів вимірювань. Шляхом порівняння комбінацій трьох їх значень встановлюють, які збудження переважають – нестабільність параметрів прокатки, наприклад, розкид температури металу, її зміна вздовж прокату, чи обладнання і дія, перш за все, зазорів. Розроблена діагностична модель лінії приводу з урахуванням динаміки зубчатого зачеплення шестеренних валків, колеса і шестерні редуктора та їх осей в опорах при наявності низки зазорів, показано, що петлі переміщень осей, ударні зусилля на станини мають ознаки, пов'язані з конкретними зазорами.

Досвід досліджень вказує на ефективність діагностування прокатного обладнання в перехідних режимах.

Розглянуто шляхи розвитку способів діагностики згідно визначеному підходу. До них належить пошук нових кореляційних полів, наприклад, пікове зусилля в фундаментних болтах – сталий момент; використання особливостей технології прокатки і обладнання (кліті 5, 6 стану 1680), створення цілеспрямованих режимів прокатки і роботи обладнання, спрямовані на підвищення інформативності перехідних процесів.

Літературні джерела

1. Веренев В. В., Большаков В. И., Путноки А. Ю., Коринь А. А., Мацко С. В. Диагностика и динамика прокатных станов : монография. Днепропетровск : ИМА-пресс, 2007. 144 с.
2. Веренев В. В. Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах. Никополь : СПД Фельдман О.О., 2014. 203 с.
3. Спосіб визначення технічного стану устаткування крутильної лінії головного приводу прокатної кліті : пат 70137А Україна. Заяв. 26.12.2003 ; опубл. 15.09.2004. Бюл. № 9.
4. Спосіб визначення зміни технічного стану зчленування робочий валок - шпindelь лінії головного приводу прокатної кліті : пат. 87827 Україна. Опубл. 25.08.2009. Бюл. № 16.
5. Спосіб діагностики лінії головного приводу валків кліті з багатонитковою прокаткою : пат. 124756 Україна. Опубл. 10.11.2021. Бюл. № 45.

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ОСОБЛИВОСТЕЙ ХОЛОДНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

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

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

В сучасних умовах на ряду з використанням методів чисельного моделювання широке розповсюдження у металургійних процесах знайшли методи натурального фізичного моделювання. Це пов'язано зі складністю одночасного математичного опису процесів виробництва металів з точки зору фізики, хімії та теплотехніки. Виходячи з сучасного досвіду при моделюванні металургійних об'єктів виділяють високотемпературне та низькотемпературне моделювання. Методи низькотемпературного моделювання базуються на використанні у якості модельних рідин речовин органічного та неорганічного походження зі значно нижчою у порівнянні з реальними металевими та шлаковими розплавами температурою плавлення. Найкращим варіантом моделювання для перенесення отриманих результатів на реальний промисловий об'єкт є високотемпературне моделювання на об'ємних моделях. Проте значним недоліком зазначеного способу дослідження є висока вартість та технологічна й екологічна складність організації на ділянках дослідницьких центрів. Тому на даний момент найбільше розповсюдження отримали методи низькотемпературного фізичного моделювання, що пов'язано з низькою вартістю процесу та можливістю багатократного повторення дослідів.

Відомо, що для досягнення у фізичній моделі подібності процесів до реальних металургійних об'єктів (конвертер чи ківш) необхідно дотримання подоби величин основних факторів, що визначають ці процеси – так звані критерії подоби (наприклад, для моделювання з використанням води, застосовують як основний модифікований критерій Фруда). Дотримання критеріїв подоби не дає розуміння на скільки інтерпретація візуальних результатів відповідає дійсності. Наприклад, у випадку, коли проводиться фото/відео фіксація процесів крізь воду зверху, чи крізь прозору ємність та воду збоку. Відомо, що світло, переходячи з одного середовища до іншого, змінює свою швидкість та напрямок, що відбивається у візуальній зміні лінійних розмірів об'єкта, який досліджується й розміщений у зазначених середовищах. Найчастіше для створення холодних моделей використовують прозорі скляні або пластикові ємності, які мають свої особливості, в першу чергу, проходження світла, яке формує візуальну картину об'єктів в середині моделі. Для аналізу впливу типу ємності, крізь яку проводять спостереження та фотофіксацію за ходом холодного моделювання в роботі було проведено серію фотозйомок за різних умов: наявність чи відсутність освітлення, наявність води навколо об'єкта, різні за формою ємності, в яких розміщено об'єкт. У якості об'єктів дослідження було обрано різнокольорові об'єкти правильної та неправильної форми. У якості ємностей для моделювання було використано прозорі циліндричні та квадратні за перетином ємності з оргскла. За параметр порівняння було обрано співвідношення лінійних розмірів розміщених в середині ємностей об'єктів. Встановлено, що при дослідженні об'єктів крізь опуклу стінку циліндричної ємності без додавання води ми бачимо візуально відсутність зміни геометричних показників, проте виміряні геометричні параметри свідчать про викривлення (діапазон пов'язаний з дослідженням тіл різної форми): за рахунок оргскла на 0,5-2,2 %; за рахунок опуклого склад циліндричної форми ємності на 2,0-3,0 %; за рахунок води та плаского оргскла на 3,8-5,7 %; за рахунок води та опуклого оргскла на 21,9-36,2 %. При цьому було встановлено, що поєднання одночасно плаского та опуклого оргскла, що розділені невеликим водним прошарком (товщиною до 1 см), знижують величину викривлення до 4,9-9,9 %.

Для покращення інтерпретації результатів при проведенні фізичного низькотемпературного моделювання з метою візуального спостереження крізь стінку можна дати рекомендацію використання системи ємностей: внутрішня опукла, яка моделює геометричні параметри агрегату, та зовнішня з пласкими стінками заповнена рідиною з однаковими оптичними показниками, що зменшує викривлення зображення.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ КАТАНКИ З ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА ЗАСАДАХ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРВАННОГО ЗАГАРТУВАННЯ З САМОВІДПУСКОМ

М. Ю. Амбражей, Е. В. Парусов д.т.н., с.н.с.

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

Прокат у бунтах, зокрема катанка з вуглецевих сталей, належить до одного з масових видів металопродукції, який зазвичай використовують для перероблення у різні металовироби за способом холодного пластичного деформування. Різноманітність товарної продукції, яку виготовляють, обумовлює необхідність отримання сталевих катанки з різним рівнем механічних властивостей, зокрема, з підвищеними показниками міцності та достатньою пластичністю. Додатково ситуацію ускладнює той факт, що обсяги катанки у межах окремих комерційних замовлень не завжди відповідають мінімальним промисловим партіям, а обґрунтоване визначення параметрів технологічного процесу безпосередньо в умовах виробництва є економічно недоцільним, оскільки істотно знижує продуктивність та впливає на відсорткування готової металопродукції. Для вирішення існуючої задачі, яка полягає у гарантованому отриманні сталевих катанки з регламентованою міцністю, створена методика розрахунку тривалості та інтенсивності водяного охолодження прокату на дротовій лінії прокатного стану, сутність якої заснована на принципі адитивності [1].

Розрахунок зазначених параметрів термічного зміцнення проводили за наступним алгоритмом:

1. Чисельне вирішення диференціального рівняння теплопровідності із заданими початковими та граничними умовами. Вихідні дані: теплофізичні характеристики матеріалу, діаметр катанки, тривалість охолодження, діапазон середніх значень коефіцієнта тепловіддачі в табульованій формі. Тривалість водяного охолодження (стадія № 1) визначали виходячи з довжини траси водяного охолодження та швидкості прокатки. Під час розрахунку процесу самовідпуску (стадія № 2) кінцевий стан процесу водяного охолодження (стадія № 1) приймається початковою умовою процесу самовідпуску.

2. Аналіз отриманих даних для визначення глибини загартованого шару та температури самовідпуску. Значення глибини загартованого шару визначали за наявним дискретним набором розрахованих значень методом лінійної інтерполяції. Температура самовідпуску визначається як температура поверхні прокату на заданий момент часу і залежить від місця розташування пірометра, швидкості прокатки та швидкості переміщення витків катанки на роликовому транспортері лінії Стелмор.

3. Аналіз отриманих залежностей глибини загартованого шару та температури самовідпуску від середнього коефіцієнта тепловіддачі. Визначення необхідної глибини загартованого шару. Вихідні дані: діаметр катанки, границя плинності готового прокату та прокату з модельним типом структур (ферито-перлітна, мартенситна).

4. Розрахунок границі плинності від температури самовідпуску із врахуванням для заданого діаметру катанки її інтегральної міцності в залежності від глибини загартованого шару.

Запропонована методика розрахунку параметрів термічного зміцнення (тривалість та інтенсивність водяного охолодження) пройшла успішну апробацію в умовах безперервного дрібносоротно-дротового стану під час виготовлення різних профілерозмірів катанки з вуглецевої сталі (0,21 % C; 0,56 % Mn; 0,06 % Si).

Літературні джерела

1. Park C. S., Yi H. J., Kim Y.-T., Han S. W., Lee T., Moon Y. H. Tempcore process simulator to analyze microstructural evolution of quenched and tempered rebar. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Iss. 14. 2938. <https://doi.org/10.3390/app9142938>.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ TWIP СТАЛІ НИЗЬКОЇ ГУСТИНИ

**А. Ю. Семенко к.т.н., с.н.с, В. І. Вейс докт. філ., Ж. В. Пархомчук к.т.н., с.н.с.,
Р. Ф. Ліхацький докт. філ., І. Ф. Ліхацький**

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

Високоміцні Fe-Mn-Al-C TWIP сталі є перспективними конструкційними матеріалами завдяки високій технологічності і комплексу механічних властивостей, якими можна керувати шляхом операцій деформації і термічної обробки. Цей клас матеріалів базується на концепції високоентропійних сплавів на основі заліза з багатофазною структурою. Таким сталям притаманні високі міцність і пластичність ($400 \text{ МПа} \leq \text{межа текучості} \leq 1200 \text{ МПа}$, $600 \text{ МПа} \leq \text{межа міцності} \leq 2000 \text{ МПа}$ і $30 \% \leq \text{відносне видовження} \leq 100 \%$). Fe-Mn-Al-C сталі приблизно на 18 % легші за їх традиційні аналоги. Таке поєднання механічних властивостей зумовлює їх широке використання в авіакосмічній галузі для виготовлення високонавантажених корпусних деталей.

Через високий вміст марганцю (15-35 мас. %) ці сплави переважно мають аустенітну структуру, яка забезпечує їм здатність до надзвичайно ефективного зміцнення під час деформації. Високий вміст алюмінію у TWIP сталях (5-12 мас. %) сприяє значному зменшенню їх густини та підвищенню корозійної стійкості.

Такі особливості хімічного складу TWIP сталей зумовлюють у габаритних напівфабрикатах, отриманих литтям, прояви дефектів пов'язаних з усадкою – усадкові раковини, тріщини, пори, витоки тощо. Це ускладнює процес виробництва цих матеріалів.

В роботі представлено результати чисельного моделювання лиття TWIP сталі низької густини в ливарній системі з чотирма варіантами конфігурації живильного каналу: подача розплаву знизу під кутами 15° і 30° , безпосередньо бічна подача та подача збоку через шестиступеневий контурний живильник.

Результати чисельного моделювання показали, що під час процесу лиття сталі низької густини зазнають не тільки вплив термічних напружень, але й додатковий вплив від циркуляції рідких потоків. При цьому найбільший вплив, виражений у максимальних значеннях температури, спостерігається у кутах форми і зберігається поки рівень металу не стане надлишковим.

Розподіл температур у формі показав, що при бічній подачі металу живильник не замерзає поки метал не досягне температури солідусу. Такий варіант підведення металу можна вважати оптимальним, зважаючи на схильність цього класу сталей до утворення газових і усадкових дефектів.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ВИХІДНОЇ СТОРОНИ ДРІБНОСОРТНИХ СТАНІВ

О. П. Єгоров¹ к.т.н., доц., М. О. Рибальченко¹ к.т.н., доц., І. О. Маначин^{1,2} к.т.н., ст. досл.

¹ Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Сортовий прокат виробляється з вуглецевих, конструкційних та низьколегованих марок сталей усіх ступенів розкислення. Після прокатки на вихідній стороні стану розкат, порізаний на штанги, охолоджується на рейковому холодильнику, потім збирається в пачки, транспортується до ножиць холодного різання. На ножицях він ріжеться на мірні чи нормальні прутки. Нарізані прутки збирають у кишнях відводного рольгангу ножиць, зважують, ув'язують у пачки і подають електромостовим краном на склад готової продукції.

Одним із важливих показників роботи стану є темп прокатки. Забезпечення максимально можливого, виходячи з роботи технологічного обладнання, темпу прокатки знижує собівартість готової продукції за рахунок, наприклад, зменшення енерговитрат при зниженні темпу або технологічних простоїв.

Розглянуто роботу транспортування смуг прокату, зібраних в пакет рольгангом що підводить, до ножиць холодного різання. Вага пакета смуг в залежності від їх довжини та кількості суттєво варіюється. Від цього залежить і гальмівний шлях пакету, що транспортується.

Прорізка пакета ножицями холодного різання здійснюється під упор, тому пакет підводиться до них на повзучій швидкості. Чим довший шлях, тим більший витрачений час на різання, що знижує загальний темп прокатки.

Розроблена система дозволяє при транспортуванні пакета рольгангом до ножиць холодного різання для першого зачисного різку визначити параметри розгону та гальмування приводу роликів.

У пакеті від початку до кінця можуть бути смуги різної довжини, що залежить від алгоритму розкрою. Тому шлях розгону та гальмування пакета для порізки на ножицях холодного різання може бути різним. Однак моменти інерції пакета та статичні моменти позначаються однаково на процесах розгону та гальмування. Визначаючи час і шлях розгону, можна визначити і шлях гальмування. Відношення шляху розгону до шляху гальмування, отримане для зачисного різку, використовується для визначення часу гальмування для наступного різання. При кожному включенні рольгангу це відношення уточнюється.

Проведене імітаційне моделювання роботи системи показало, що таким чином можна точно встановлювати пакет перед упором ножиць та знизити шлях переміщення пачки штанг на повзучій швидкості практично до нуля, і тим самим підвищити продуктивність цієї ділянки.

Літературні джерела

1. Устройство управления перемещением пакета полос мелкосортного проката при порезке на стационарных ножницах : авторское свидетельство SU1109207 СССР. № 1109207 ; заявл. 13.07.1983 ; опубл. 23.08.1984. Бюл. № 31.

2. Бешта А. А., Куваев В. Н., Потап О. Е., Егоров А. П. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах. Днепропетровск : Изд-во НГУ, 2014. 333 с.

3. Куваев В. М. Развитие научных основ автоматизации процессов производства арматурного проката : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07. Днепропетровск, 2007.

ПОДІБНІСТЬ ПРИ ХОЛОДНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ВЕРХНЬОГО ПРОДУВАННЯ У КИСНЕВИХ КОНВЕРТОРАХ

Є. О. Аржанцев, В. С. Мамешин к.т.н., доц., К. Г. Нізяєв д.т.н., проф.,
С. В. Журавльова к.т.н., доц.

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Продування рідкої металевої ванни надзвуковими кисневими струменями є ключовим елементом киснево-конвертерного процесу. Взаємодія струменів кисню з розплавом не тільки забезпечує окислення домішок чавуну, а й ініціює розвиток складних гідродинамічних явища в рідкій ванні, які впливають на перебіг плавки та визначають основні техніко-економічні показники процесу. У зв'язку з цим, дослідження ключових аспектів взаємодії газових струменів з рідкою ванною, а також аналіз гідродинамічних процесів у ванні завжди викликали особливу увагу у металургійній науці [1-3].

Одним з наукових методів, що застосовують при дослідженні металургійних процесів, є «холодне» моделювання [1, 4]. Таке моделювання є легким в реалізації, наочним та відносно невитратним що обумовлює його широке використання при дослідженні питань гідродинаміки конверторної ванни. «Холодне» моделювання базується на використанні теореми подоби і вимагає дотримання рівності критеріїв подоби між оригіналом та моделлю.

Виходячи з рекомендацій робіт [1, 5, 6], при «холодному» моделюванні верхнього продування, визначальними критеріями є число Маха та критерій Ньютона.

Рівність значення числа Маха дозволяє забезпечити подібність струминної течії газових потоків на оригіналі та моделі [6]

$$Ma \equiv \frac{w}{c} = idem, \quad (1)$$

де w – швидкість витікання газового потоку, м/с; c – швидкість поширення звуку, м/с.

Дотримання ідентичності критерію Ньютона необхідне для забезпечення динамічної подоби моделі і оригіналу й однією з можливих форм може бути представлений у вигляді комплексу

$$Ne_3 \equiv \frac{i \cdot n \cdot \cos \alpha}{m \cdot g} = idem, \quad (2)$$

де i – імпульс поодинокого кисневого струменя, Н; n – кількість сопел, шт.; α – кут нахилу сопел до вертикалі, град.; g – прискорення сили тяжіння, м/с²; m – маса рідини, кг.

Для забезпечення геометричної подоби, найчастіше, рекомендується використання симплексу [7,8]

$$\frac{H_\phi}{d_{вих}} = idem, \quad (3)$$

де H_ϕ – висота розташування фурми над рівнем рідини, м; $d_{вих}$ – вихідний діаметр сопел, м.

Однак використання такого симплексу не дозволяє ідентифікувати режими взаємодії між струменями газу та рідкою ванною, що може приводити до викривлення отриманих результатів. Тому для визначення умов «холодного» моделювання, яке враховує вплив режиму впровадження струменя газу у рідину на загальну гідродинамічну картину у ванні, можна скористатися експериментальними залежностями, запропонованими в роботі [9]. Ці залежності можуть бути представлені у вигляді рівняння, яке пов'язує основні параметри дуттового режиму та визначає граничні значення при яких відбувається зміна режиму взаємодії газового струму з рідиною:

$$A \equiv \frac{H_\phi}{\left(\frac{i}{\rho_p \cdot g}\right)^a} = idem, \quad (4)$$

де ρ_p – щільність рідини, кг/м³; a – емпіричний показник ступеня, значення визначається режимом взаємодії між струменями газу та рідкою ванною (для режиму взаємодії нестабільної відкрита лунка з розбризкуванням $a = 0,456$; для режиму глибокого проникнення $a = 0,462$; для режиму «жорстка» продувка $a = 0,465$)

Таким чином, геометричну подібність при «холодному» моделюванні верхнього продування можливо визначати ґрунтуючись на залежностях, що визначають граничні умови переходу між режимами взаємодії газового струму з рідиною.

Літературні джерела

1. Пантейков С. П. Моделювання технологічних та фізичних процесів в металургії : навч. посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 235 с.
2. Cao L. L., Wang Y., Liu Q., Feng X. Physical and mathematical modeling of multiphase flows in a converter. *ISIJ International*. 2018. Vol. 58(4). P. 573–584. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-680>
3. Явойский В. И., Дорофеев Г. А., Повх Н. Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. Москва : Металлургия, 1974. 496 с.
4. Mazumdar D., Evans J. W. Modeling of steelmaking processes. Boca Raton, CRC Press, 2009. 493 p.
5. Баптизманский В. И., Паниотов Ю. С. О холодном моделировании гидродинамики сталеплавильного конвертора. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1989. № 6. С. 26–30.
6. Капустин Е. А. К моделированию продувки жидкой стали кислородом. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1972. № 11. С. 186–187.
7. Пантейков С. П. О методике холодного моделирования гидродинамики конвертерной ванны при верхней продувке. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 2001. № 3. С. 14–18.
8. Яковлев Ю. Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов. *Вопросы теории и практики сталеплавильного производства* : научн. тр. ММИ. Москва : Металлургия, 1991. С. 32–44.
9. Чернятевич А. Г., Шишов Б. И., Соломон Г. М. К вопросу взаимодействия кислородной струи с металлической ванной. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. № 2. С. 30–34.