

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



**Всеукраїнська науково-технічна конференція
«НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»
14-16 листопада**

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

Збірник тез

DOI: 10.52150/2522-9117-2023-conferens

**Дніпро
2023**

Організаційний комітет конференції:

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

Науковий комітет конференції:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Баюл К.В. д.т.н., с.н.с. відділу технологічного обладнання та систем Управління ІЧМ НАНУ.

Зміст

	Стор.
Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість	7
Арендач Н.А., Молчанов Л.С. Аналіз ефективності видалення вуглецю з розплаву на різних етапах виробництва сталі	7
Молчанов Л. С., Голуб Т.С. Аналіз умов ефективної активізації нітрогенвмісного газового потоку	8
Семикін С.І., Голуб Т.С., Молчанов Л.С. Використання активованих газів, як напрям підвищення ефективності технологічних процесів металургії	9
Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москалина А. О., Ізюмський М. М., Джигота М. Г. Дослідження впливу вдування водню в доменну піч на викиди CO ₂ та витрату коксу	10
Єськов Д. В., Сігарьов Є.М., Крячко Г. Ю. Дослідження газодинаміки двохфазного потоку у т-подібному наконечнику фурми	11
Протоковілов І. В., Порохонько В. Б., Абралов М. М. Дослідження кінетики твердіння 205 тонного ковальського зливка на холодній фізичній моделі	13
Волох В. І., Мазур І. А. Дослідження напружено деформованого стану балок кантуючих холодильників на машині безперервного лиття заготовок	14
Лебідь В.В. Дослідження особливостей потоку шихти у доменній печі	15
Мазур В.В. Застосування ефективних теплоізолюючих матеріалів – резерв енергозбереження в металургії	16
Юшкевич П.О. Киснево-конвертерне виробництво сталі у сучасній металургійній галузі України	17
Сігарьов Є. М., Єськов Д. В., Матина І. М, Коваленко Д. А. Коригування сульфідної ємності ковшового шлаку	18
Сіренко К. А., Мазур В. Л. Моделювання процедури визначення шихти і коригування хімічного складу розплаву чавуну	20
Муравйова І.Г., Іванча М.Г., Щербачов В.Р., Вишняков В.І. Новий метод обґрунтованого коригування характеристик режиму завантаження шихти, що забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі	21
Надточій А. А., Гришин О. М., Киричок В. С. Особливості твердофазного відновлення залізомарганцевих руд	22
Гришин О. М., Надточій А. А, Петренко В. А., Хромовських С. А. Хромовських аспірант. Отримання губчастих лігатур методом твердофазного відновлення	23
Синегін Є.В., Журавльова І.В., Рубан В.О., Савчук Я.В. Перспективи використання МБЛЗ для розливання сортових заготовок дрібного перерізу на міні-заводах	24
Семенов Ю. С., Горупаха В. В. Перспективи використання у складі доменної шихти збільшеної частки окатишів	25
Тубольцев Л.Г. Перспективи декарбонізації металургійного виробництва сталі в Україні	28
Рубан В.О., Синегін Є.В., Стоянов О.М., Савчук Я.В., Савенко М.О. Підготовка і проведення фізичного моделювання дослідження впливу подачі газу через порожнистий електрод на зміну геометричних параметрів лунки	30
Меркулов О.Є. Чи є місце доменній печі в умовах «зеленого курсу»?	31
Електрометалургія	32
Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Дослідження впливу тривалості відпалу зразків зі сплаву на основі титану, виготовлених за 3-D технологією, на механічні властивості та мікроструктуру	32
Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Дослідження механічних властивостей зразків зі сплаву Co-Cr-Mo, виготовлених за технологією селективного лазерного плавлення з технологічною зупинкою	33
Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Шпак О.А. Обґрунтування режимів СЛП-технології з метою зниження залишкових напружень розрахунковим методом	34

Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Дементьєва Ж.А. Порівняльні дослідження механічних властивості зразків AlSi10Mg, виготовлених традиційним способом та за технологією вибіркового лазерного плавлення	35
Мисливченко О. М. Фазовий склад високоентропійного сплаву $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_{0.8}V_{0.6}$ отриманого методом дугового переплаву	36
Технології позапічної обробки чавуну та сталі	37
Кисляков В. Г., Тогобицька Д. М., Молчанов Л. С., Руденко О. Л., Петруша В. П. Досвід дослідження сепаратору природного газу неруйнівними методами контролю	37
Піптюк В. П., Греков С. В., Кукса О. В. Необхідність дегазації сталі на ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ»	40
Тогобицька Д. М., Поворотня І. Р., Піптюк В. П., Белькова А. І., Ходотова Н. Є. Розробка критерію оцінки процесу розподілу елементів у системі «метал - шлак» при позапічній обробці сталі	41
Шевченко А.П., Маначин І.О., Двоскін Б.В. Розробка розрахункових моделей питомих витрат магнію і вмісту сіри в чавуні при різних умовах інжекційної десульфурзації	42
Автоматизація та сучасні методи контролю металургійних процесів та якості металургійної продукції	43
Єгоров О. П., Рибальченко М. О., Маначин І. О. Адаптивна система управління швидкісним режимом вільної прокатки з нечітким регулятором	43
П'яник О. О., Саввін О. В. Аналіз заходів запобігання метановим вибухам на вугільних шахтах	45
Григор'єва Н.О., Мірошникова Т.П. Досвід дослідження сепаратору природного газу неруйнівними методами контролю	46
Потап О. Ю., Зінченко М. Д., Кисляков В. Г., Бутенко М. В. Модернізація системи автоматизованого налаштування швидкісного режиму секційного рольганга холодильника дрібносортового стана	47
Приходько І. Ю., Воробей С. О. Підвищення точності розрахунку енергосилових параметрів прокатки на товстолистовому стані	48
Металознавство та термічна обробка сталі	49
Меркулов О. Є., Подольський Р. В. Сафронова О. А., Клинова О. П. Аналіз зв'язку зносостійкості, структурного стану та твердості перліту високовуглецевої сталі	49
Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Перков О. М. Аналіз матеріалу гальмівних колодок рухомого складу	50
Штапенко Е. П., Сироватко Ю. В. Аномальне збільшення крайового кута змочування оловом сталльної підкладки в залежності від температури	51
Вакуленко І. О., Перков О. М., Плітченко С. О. Визначення впливу дисперсності перліту на витривалість за циклічного навантаження вуглецевої сталі	52
Губенко С. І., Парусов Е. В. Вплив активних середовищ і неметалевих включень на довговічність та механічні властивості підшипникових сталей	53
Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронов О. Л. Вплив вмісту вуглецю в сталях бейнітного класу на механічні властивості після нормалізації та відпуску	54
Борисенко А. Ю., Левченко Г. В. Вплив ліквідації на утворення графіту у чавунах	55
Ковзель М. А., Котова Т. В. Вплив режимів деформації на формування спеціальних границь в структурі ультранизьковуглецевої сталі	56
Луценко В. А., Голубенко Т. М., Луценко О. В. Вплив температури гартування на структуроутворення легованої сталі	57
Ниркова Л. І., Лісовський Ю. І., Файнберг Л. Й., Гончаренко Л. В. Вплив тонкоплівкової корозії на корозійно-механічну поведінку трубної сталі 10Г2ФБ в умовах катодного захисту	58

Ниркова Л. І., Лісовський Ю. І., Файнберг Л. Й., Гончаренко Л. В. Дослідження корозійного розтріскування зварних з'єднань для газонафтопровідних труб в нейтральному середовищі за катодного захисту	59
Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Шпак О. А. Дослідження особливостей мікроструктури сталі 316L, виготовленої за технологією селективного лазерного плавлення	60
Губенко С. І. Локалізація формування зеренної структури низьковуглецевих сталей за інтенсивної пластичної деформації	61
Чуйко І. М., Парусов Е. В., Бобирь С. В., Парусов О. В. Особливості та методи аналізу атермічного мартенситного перетворення в сталі 30ХГСА	62
Кононенко Г. А., Кімстач Т. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Перспективні шляхи підвищення властивостей товстолистового прокату	63
Бурова Д. В. Підвищення властивостей сталей термообробками з нагрівом у міжкритичний інтервал температур	64
Бобирь С. В., Парусов Е. В., Чуйко І. М., Барановська О. Є., Олійник Е. В. Порівняльний аналіз різних способів визначення аустеніту залишкового після термічного оброблення легованих сталей	66
Беженар М. П., Романенко Я. М., Пацик А. М. Про переваги та недоліки полікристалів кубічного нітриду бору системи CBN – AL, залежно від їх фазового складу	67
Балаханова Т. В., Парусов Е. В., Чуйко І. М., Олійник Е. В. Розроблення методики виявлення структури високобористої нержавіючої сталі феритного класу	68
Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Розробка пропозицій щодо вимог до кількості неметалевих включень у залізничних колесах при створенні нового національного стандарту	69
Борисенко А. Ю., Левченко Г. В. Спадковість сірих чавунів	70
Романенко Я. М., Пацик А. М., Беженар М. П. Термодинаміка хімічної взаємодії кубічного нітриду бору з алюмінієм і тугоплавкими сполуками титану	71
Перчун Г. І., Івченко А. О. Удосконалення технології виробництва арматурного прокату підвищеної міцності у мотках	72
Чорноіваненко К. О., Мовчан О. В. Формування коміркової структури міжфазної поверхні при стаціонарній $\alpha \rightarrow \gamma$ перекристалізації феритних сплавів заліза	73
Прогресивні технології обробки металу тиском	74
Ключніков К. Ю., Приходько І. Ю., Раздобреєв В. Г., Паламар Д. Г., Лещенко О. І. Вибір методики визначення енергосилових параметрів процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій	74
Івченко О. В., Перерва В. Я., Зуєв О. В. Виробництво арматурного прокату з низьколегованих модифікованих азотом сталей	75
Олійник Е. В., Парусов Е. В. Існуючі та перспективні способи охолодження сталей зварювального призначення в лінії прокатного стану	76
Болюбаш Є. С. Методика дослідження глибини проникнення кумулятивного струменя піротехнічного пристрою системи розділення ракети-носія	77
Каргін С. Б., Сухомлин С. А. Розробка засобу виготовлення технологічних мастил для обробки металів тиском	78
Король Р. М., Мироненко М. А. Спосіб виготовлення труб-заготовок для артилерійських стволів малих калібрів з жароміцних релаксаційностійких хромомолібденових сталей	79
Каргін С. Б. Удосконалення процесу кування прокатних валків	80
Моделювання та оптимізація технологічних процесів	81
Бабенко М. В., Тонкошкур Г. О. Дослідження методів розрахунку задачі моделювання процесу плавлення матеріалів	81
Мкртчян Є. А. Дослідження напружень у інструменті під час кування методами моделювання кінцевих елементів	82

Красніков К.С., Дейнека С.В., Лимар Н.М. Дослідження швидкості і споживання пам'яті для алгоритму взаємодії зірок на графічних прискорювачах	83
Вереньов В. В., Коренной В. В. Кореляційні поля крутного моменту в прокатних клітках	84
Сіренко К. А., Мазур В. Л. Моделювання процедури визначення шихти і коригування хімічного складу розплаву чавуну (ймовірнісний підхід із застосуванням методу Монте-Карло)	85
Соколан К. С., Ларіонов І. В. Оптимізація написання кодів обробки деталей на верстатах з чпк шляхом їх автоматичної генерації	86
Красніков К. С., Крихта А. О. Програмне забезпечення для дослідження гідродинаміки розплаву в промковші	87
Красніков К. С., Дудник С. В. Технології розробки програмного забезпечення для досліджень гідродинаміки в аеротенку	88
Екологічні проблеми чорної металургії	89
Єрьомін О. О., Гупало О. В. Впровадження найкращих доступних технологій в термічних печах в умовах дефіциту викопного палива	89
Грес Л. П., Гупало О. В., Єрьомін О. О., Кабакова Л. Б. Дослідження викидів оксидів азоту при нагріванні дуття в повітронагрівачах доменних печей	90
Машиністов В. Є., Романько Я. В., Мешкова А. Г., Сухарева М. В. Плавлення радіоактивно забрудненого металу – як складова в вирішенні екологічних проблем на металургійних підприємствах	91

УДК 669.184

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДАЛЕННЯ ВУГЛЕЦЮ З РОЗПЛАВУ НА РІЗНИХ
ЕТАПАХ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ

Арендач Н.А., Молчанов Л.С., к.т.н.

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

В сучасних умовах залізовуглецеві розплави і зокрема сталь лишаються одним з найрозповсюдженіших конструкційних матеріалів у світі. Виробництво сталі пов'язано з видаленням надлишкового вмісту домішок залізо-вуглецевого розплаву, зокрема вуглецю. При цьому існує значна кількість технологічних рішень з виробництва сталей різного сортаменту від ультра низько вуглецевих до легованих вуглецем.

Основним методом виробництва конструкційних сталей звичайної якості лишається киснево- конвертерний процес, який здійснюється за схемою з подачею кисню через верхню фурму і нейтрального газу через донні продувні блоки. Виробництво високовуглецевих сталей базується на використанні технології електроплавки за схемами індукційного нагріву або дугового, що пов'язано з низьким окислювальним потенціалом зазначених процесів. Виробництво сталей з вмістом вуглецю нижче критичної концентрації (0,01%) пов'язано зі складністю організації підведення вуглецю до місця окислення. Тому розроблені технічні рішення з додатковим введенням у ванну інтенсифікаторів масообміну (технології ГКР та АОД), а також проведення окислення вуглецю при низькому тиску. Зазначені процеси потребують спеціального складного устаткування і не дозволяють здійснювати виробництво сталей з низьким вмістом вуглецю на діючих металургійних підприємствах без значної модернізації устаткування і зміни технології виробництва. Відповідно до існуючих поглядів щодо механізмів окислення вуглецю в металевій ванні виділяють три ланки зазначеного процесу: 1) введення окислювача в розплав; 2) протікання хімічної реакції окислення; 3) підведення вуглецю до місця хімічної реакції.

У випадку концентрації вуглецю в розплав на рівні близькому до критичної швидкість протікання хімічної реакції лімітується саме підведенням вуглецю до місця її протікання. Таким чином, для забезпечення ефективного процесу видалення вуглецю з розплаву при концентраціях нижче критичної необхідно застосовувати методи інтенсифікації масообмінних процесів у металевій ванні. При цьому існують наступні методи інтенсифікації масообмінах просів: вимушене перемішування, вплив зовнішнього електромагнітного поля, продувка нейтральним газом. Серед зазначених методів інтенсифікації масообмінних процесів найбільш технологічним є продувка нейтральним газом.

Виходячи з наведеного вище пропонується здійснювати виробництво сталей з концентрацією вуглецю нижче критичної за наступною схемою: окислення вуглецю до критичної концентрації стандартними методами киснево-конвертерної плавки, до окислення вуглецю нижче критичної концентрації в розплаві за рахунок продувки розплаву сумішшю інертний газ – кисень на етапі позапічної обробки через донні продувні блоки спеціальної конструкції.

АНАЛІЗ УМОВ ЕФЕКТИВНОЇ АКТИВІЗАЦІЇ НІТРОГЕНВМІСНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКУ

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

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

Сьогодення металургійної галузі, як основного виробника конструкційного матеріалу, ставить нові підвищені вимоги до міцності сталей та покращення їх експлуатаційних якостей, як показника надійності та довговічності деталей та конструкцій. Способи поліпшення властивостей сталей досить різноманітні, проте важливе місце серед них займає легування. Легуючі елементи надають виробам жаростійкості та корозійної стійкості, підвищують механічні показники. Серед них слід виділити нітроген, введення якого дозволяє зменшити у сплавах вміст більш вартісних елементів нікелю, марганцю та інших аустенітоутворюючих елементів при збереженні заданої аустенітної або іншої структури та, відповідно, рівня феромагнітності сплаву; збільшити вміст у сплавах елементів феритоутворювачів, що позитивно впливає на механічні та корозійні характеристики сплавів; покращити характеристики технологічної пластичності внаслідок розширення інтервалу існування аустеніту у високотемпературній області; підвищити термічну стабільність аустеніту та знизити ймовірність його розпаду при нагріванні з утворенням нітридів та інших фаз; збільшити опір піттингової та ножової корозії, корозійного розтріскування під напругою, інтеркристалітної корозії; підвищити міцність сплавів шляхом використання деформаційного зміцнення при наклепі.

Нітроген достатньо розповсюджений хімічний елемент і як легуючий відомий давно, проте широкому використанню заважає його обмежена розчинність у залізних сплавах, особливо при високому вмісті інших компонентів. Для підвищення розчинності нітрогену використовують різні способи активізації газу. Авторами було досліджено варіант активізації шляхом створення електричного кистьового розряду.

Дослідження проведено на створеному на дослідній ділянці ІЧМ НАНУ фізичному стенді. Моделюванню підлягала ділянка фурми на виході для подачі продувного газу у якій було розміщено пристрій активізації газу закритого типу (шляхом створення кистьового розряду між металевим електродом та металевим наконечником фурми). Було досліджено два типи пристроїв: із занурюваним не ізольованим електродом та виступаючим практично повністю ізольованим електродом (розряд між наконечником фурми та неізольованим кінчиком електроду). Аналіз впливу тиску продувного газу та довжини дуги (відстані між електродами) на ефективність процесу іонізації потоку нітрогенвмісного газу (на прикладі повітря) показав, що при використанні розрядного пристрою із зануреним електродом сила струму, який формує активований газ, має квадратичну залежність від відстані між електродами з максимумом при відстані близько 15 мм та тиску продувного газу 0,25-0,3 МПа. При подальшому збільшенні тиску видимий розряд зникає і сила струму знижується.

За умов використання іншого типу розрядного пристрою, який відрізняється виступаючим електродом були отримані значно вищі показники сили іонізованого струму і при збільшенні дистанції розряду сила струму зростала. Крім того візуально розряд був видимий навіть при високих тисках продувного газу (0,6МПа) (із найбільшими показниками при низьких продувних тисках). Таким чином можна зробити висновок, що для активізації нітрогенвмісного газу найбільш перспективним є використання розрядного пристрою із виступаючим електродом.

ВИКОРИСТАННЯ АКТИВОВАНИХ ГАЗІВ, ЯК НАПРЯМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ

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

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

Технологічні операції виробництва сталі і металопродукції базується на окислювально-відновлювальних хімічних процесах (горіння палива, окислення та відновлення домішок). Особливе значення процесів хімічного окислення встановлене у процесах виробництва сталі, що пов'язано з видаленням зі складу розплавленої металошихти надлишкового вмісту кремнію, марганцю, вуглецю та фосфору. При цьому у якості основного окислювача в усталених технічних рішеннях використовується газоподібний кисень. В сучасних металургійних агрегатах досягнута максимальна ефективність протікання хімічних перетворень при використанні газоподібного кисню.

Швидкість хімічної взаємодії різних елементів з киснем визначається величиною енергії активації певного перетворення. Зокрема в активованому стані кисень формує молекулу озону, яка відрізняється більшою хімічною активністю ніж молекула газоподібного кисню. Це викликано наявністю в молекулі додаткового атому, який зміщує електронну щільність молекули та зменшує енергію активацію хімічних процесів за її участі.

Загалом активація газоподібних речовин відбувається під дією зовнішніх впливів, до яких можна віднести: вплив іонізуючих випромінень (УФ, α , β та γ спектрів); вплив надлишкової теплоти; вплив електричних розрядів. Механізм формування полягає у руйнуванні стабільних молекул газоподібної речовини та утворення іонів, які вступаючи у взаємодію з молекулами формують хімічні з'єднання. При цьому з технологічної точки зору найбільш вдалим методом активації газоподібних речовин є використання електричних розрядів. При цьому ефективність переведення речовини залежить як від конструкції іонізатора так і від потужності самого розряду. Зазначені особливості дають можливість у широких межах впливати на процеси, що протікають в обсязі конвертера.

В процесі виконання досліджень встановлено, що застосування активованого потоку сприяє підвищенню теплового рівня підфурменої області, що свідчить про більший, ніж на порівняльних плавках, розігрів ванни, ймовірно, за рахунок більш активного протікання реакцій окислення кремнію на початку продувки, вуглецю в середині продувки і допалювання формованого в ході продувки СО до СО₂ газу - в кінці продувки. При цьому аналіз зміни вмісту вуглецю і швидкості його окислення по ходу продувки плавки виявив збільшення частки кисню, що витрачається на окислення вуглецю при застосуванні активізованого кисневого потоку, з відповідним підвищенням швидкості окислення вуглецю по ходу продувки і скорочення тривалості продувки до падіння факела. Проведені дослідження рівня пиловиділення з конвертера на дослідних плавках показало зниження цього показника при використанні активізованого газового потоку на величину порядку 56,9% відн. в період наведення шлаку і на 69,5% відн. в період продувки під шлаком. Проведений за результатами лабораторних досліджень аналіз впливу кількості озону в продувному газі на кількість виділеної з агрегату пилу показав наявність зворотної залежності з мінімальним рівнем пиловиділення при продуктивності озону близько 25-30 г/т*хв. Отримані в роботі результати свідчать про високу значимість напрямку, що розробляється, для металургійної промисловості, а встановлені науково-технічні положення припускають продовження досліджень в частині конструювання розрядних пристроїв і більш глибокого вивчення взаємодії активізованих струменів з рідкою залізовуглецевою ванною.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВДУВАННЯ ВОДНЮ В ДОМЕННУ ПІЧ НА ВИКИДИ CO₂ ТА ВИТРАТУ КОКСУ

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

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

Ідея застосування водню та постановка проблеми його використання у промисловості була сформульована ще на початку 70-х років ХХ століття після першої нафтової паливної кризи. Слід зазначити, що в цей час й вітчизняні дослідники займалися питаннями застосування водню в доменному виробництві. У світі, на рівні державної політики, все більша увага приділяється розвитку водневого спрямування, і воднева енергетика набуває все більшої підтримки не лише на корпоративному, а й на державному рівні. Воднева енергія з її різноманітними джерелами, низькими викидами вуглецю, високою ефективністю та широким спектром застосування вважається найбільш багатообіцяючою та екологічно чистою енергією у 21 столітті та включена до національної стратегії розвитку енергетики багатьма країнами. Тому питання застосування водню в металургії в цілому та доменній печі зокрема, як найбільш енергоємного агрегату у циклі виробництва металу, є актуальним з погляду зменшення емісії діоксиду вуглецю.

З використанням вдосконалених моделей теплового та ексергетичного балансів доменної плавки виконано оціночні розрахунки впливу застосування різної витрати водню на викиди CO₂, техніко-економічні, теплові та ексергетичні показники доменної плавки.

Встановлено, що збільшення витрати водню на кожні ~50 м³/т дозволяє зменшити вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю на 2,4-2,6%, а застосування водню в кількості ~600 м³/т дозволить зменшити викиди CO₂ на 33,4-33,7%. Окрім зменшення викидів CO₂, застосування водню в доменній печі дозволяє зменшити витрати коксу на 0,46-0,48% на кожні 10 м³/т H₂, що еквівалентно зменшенню витрат коксу на 0,22-0,25 кг/м³ водню. Таким чином, вперше аналітичним шляхом встановлено коефіцієнт заміни коксу воднем при застосуванні водню в доменній плавці – 0,22-0,25 кг/м³.

За результатами дослідження визначено, що спільне вдування в горн доменної печі водню та ПВП дозволяє вирішити одночасно два завдання: зменшення викидів CO₂ (при збільшенні витрати водню) та забезпечити мінімальну собівартість чавуну та сталі (при збільшенні витрати ПВП).

В результаті аналізу визначено критичні витрати паливних добавок, при яких згідно з принципом Грюнера можна очікувати досягнення повного відновлення заліза тільки непрямым шляхом, а значить і мінімальної витрати палива при досягненні $r_d=0\%$:

- при витраті водню 585-600 м³/т та коксу 378-401 кг/т;
- при витраті ПВП 100 кг/т, водню 500 м³/т та коксу ~329 кг/т;
- при витраті ПВП 150 кг/т, водню 485-500 м³/т та коксу 268-289 кг/т;
- при витраті ПВП 200 кг/т, водню 450-485 м³/т та коксу 228-251 кг/т;
- при витраті ПВП 250 кг/т, водню – 421-450 м³/т та коксу 191-212 кг/т.

Вдування в горн попередньо нагрітого водню відкриває значні резерви зменшення викидів CO₂ та витрати коксу. Підігрів водню в кількості 100-500 м³/т на кожні 100°C дозволяє зменшити прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю на 0,37-1,35% та зменшити витрату коксу на 0,07-1,16%.

На основі вище наведеного встановлено, що використання водню в доменній печі є перспективним напрямом зменшення викидів CO₂ та зменшення витрати коксу та інших паливних добавок в доменній печі.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ДВОХФАЗНОГО ПОТОКУ У Т-ПОДІБНОМУ НАКОНЕЧНИКУ ФУРМИ

Єськов Д. В., Сігарьов Є. М., д.т.н., Крячко Г. Ю., к.т.н.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Перехід до використання ефективних, з точки зору збільшення інтенсивності введення та відповідно скорочення тривалості ковшової обробки чавуну, простоти обслуговування тощо, фурм з Т-подібним наконечником призвів до виникнення супутніх проблем, пов'язаних у тому числі з закупорюванням сопел та ускладненнями у перенаправленні газопорошкового потоку у сопла із робочого простору наконечника без втрат енергії при змінах швидкості й напрямків течії потоку, нерівномірністю зносу вогнетривкого захисту фурм по висоті, особливо у зонах, наближених до сопел, нестаціонарністю тиску газу-носію перед соплами наконечника фурми та т. ін.

У доповіді наведено результати досліджень газодинаміки двохфазного потоку у робочому просторі Т-подібного наконечника заглибної фурми та формування газопорошкових струменів на виході з сопел. Використані методики фізичного моделювання газодинаміки потоку з використанням прозорих моделей Т-подібного наконечника та результати досліджень макроструктури перетину сопла, «закупореного» у процесі вдування газопорошкових струменів на основі суміші вапна та магнію углиб розплаву чавуну з метою забезпечення видалення сірки.

Підтверджено, що процес рівномірного та безперервного вдування газопорошкових струменів углиб розплаву в ковші у значному ступені залежить від характеристик газопорошкового потоку у каналі фурми, робочому просторі наконечника та на виході з сопел. Характер макроструктури матеріалів «закупорки» сопла вказує на можливі втрати енергії газопорошкового потоку, що формується на виході з останнього. Це призводить до затікання металевого розплаву у внутрішній простір сопла з подальшим наморожуванням, зменшенням внутрішнього діаметру сопла, підвищенням опору системи з утворенням перешкод для виходу суміші десульфураторів у ванну. Останнє ускладнюється і внаслідок недостатнього імпульсу потоку та виникненню пульсацій в зоні витоку з сопел при переході від струминного до пазиркового режиму.

За результатами досліджень підтверджено, що кількість металевого розплаву, що потрапляє у сопла фурми при порушеннях розрахункового режиму вдування, зменшується при збільшенні швидкості витоку газу-носію і після досягнення певного критичного значення, близького до швидкості звуку, припиняється. При збільшенні витрат газу-носію відбувається перехід до струменевого режиму витікання і після його завершення доступ до сопла для рідини припиняється, а подрібнення струменя на пазирі відбувається на значній відстані від сопла фурми.

У даній роботі досліджено вплив конфігурації робочого простору (РП) наконечника на кут розкриття та довжину горизонтальної ділянки газопорошкового струменя. З метою зміни конфігурації РП використали різні форми днища у внутрішньому просторі прозорої моделі Т-подібного наконечника та його глибини (відстані від днища до осі сопел). Використали форми поверхні днища у формах напівсфери та увігнутої напівсфери, конуса та циліндра.

Особливості газодинаміки газопорошкового потоку у прозорій моделі наконечника вивчали зі застосуванням високошвидкісної (240 к/с) зйомки. Обробкою результатів експериментів встановлені відмінності та особливості переміщення твердих частинок різних фракцій у робочому просторі наконечника, довжина, діаметр та наповненість частинками горизонтальної ділянки потоку у соплі та сформованого струменя на виході з сопел наконечника. При високому ступеню завантаження потоку дрібні фракції, на відміну від «крупних», рухаються зі швидкістю газового потоку.

Запропоновано методику розрахунку раціонального кута нахилу поверхні днища РП Т-подібного наконечника для забезпечення мінімізації втрат енергії на перенаправлення частинок газопорошкового потоку, відбитих від днища, у сопла.

Встановлено, що зі зменшенням відстані між днищем у РП наконечника та віссю сопел густина газопорошкового потоку пропорційно зростає та в малому ступені залежить від форми днища. Співвідношення між довжиною горизонтальної ділянки газопорошкового струменя та його діаметром на відстані 18 кал. від зрізу сопла складає: 0,9 – для циліндричної форми днища, 1,33 – для «конуса», 2,0 – для «увігнутої напівсфери» та 2,4 – для напівсферичного днища відповідно.

Встановлено, що за профілем у газопорошковому струмені можна виділити горизонтальну та висхідну ділянки, де струмінь втрачає можливість проникнення у ванну. Для оптимізації процесу вдування необхідна достовірна інформація щодо кута розкриття газового струменя, глибини проникнення, структури шлейфу, турбулентності об'ємного потоку, які характеризують основні параметри струменя. Згідно з даними різних дослідників кут розкриття газового струменя у системі повітря-вода складає 20 град, у системі ртуть-повітря – 155 град. Таким чином, кут розкриття залежить від властивостей рідини (густини, поверхневого натягу). Для залізовуглецевих розплавів кут розкриття, напевне, може коливатися у вищевказаному діапазоні.

Стосовно розподілу частинок на горизонтальній ділянці газопорошкового струменя на виході з сопел можна відмітити наступне. Внаслідок суттєвої різниці між щільністю газової та твердої складових газопорошкового струменя спостерігається його сепарація з утворенням менш концентрованої (верхньої) газової та більш концентрованої (порошкової) частин. При цьому найбільш рівномірний розподіл частинок за профілем струменя у досліджених умовах спостерігали при використанні циліндричної форми днища. Кут розкриття газопорошкових струменів на виході з сопел відповідає наступним значенням: 10 град – для циліндричної форми днища, 12 град – для «конуса», 16 град – для «увігнутої напівсфери» та 22 град – для напівсферичного днища відповідно.

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТВЕРДІННЯ 205 ТОННОГО КОВАЛЬСЬКОГО ЗЛИВКА НА ХОЛОДНІЙ ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ

Протоковілов І. В.¹, к.т.н., Порохонько В. Б.¹, к.т.н., Абралов М. М.², к.т.н.

¹ Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

² Ташкентський державний технічний університет, м. Ташкент, Узбекистан

Основними споживачами великих ковальських зливків є енергетичне та важке машинобудування. З таких зливків виготовляють ротори турбін, деталі корпусів реакторів, вали гребних гвинтів та прокатних станів, деталі хімічного обладнання. Виходячи з умов експлуатації (динамічні навантаження, підвищені температури, агресивні середовища) до металу таких деталей пред'являються високі вимоги.

Умови твердіння великих ковальських зливків (великий об'єм рідкого металу і тривалий час його твердіння) призводять до значного розвитку в металевому розплаві ліквідаційних і усадкових процесів і, як наслідок – фізичної та хімічної неоднорідності литого металу. При подальшій термомеханічній обробці неоднорідність зливка успадковується поковкою і напівфабрикатами, які отримуються з нього. Тому проблема вдосконалення технологій виготовлення великих ковальських зливків досі залишається актуальною.

Експериментальні дослідження процесів, які відбуваються при твердінні великих зливків дуже складні і затратні. В цих умовах доцільно застосовувати методи фізичного моделювання на холодних прозорих моделях з дотриманням критеріїв подібності.

Метою даної роботи було визначення впливу параметрів електрошлакового обігріву (ЕШО) і підживлення прибуткової частини зливка та процес твердіння у виливниці 205 тонного сталевого ковальського зливка і розвиток у ньому дефектів усадкового походження.

Експерименти проводили на плоскій моделі, що імітує повздовжній переріз зливка. Модель виконана у масштабі 1:15 з дотриманням геометричної подібності до натурного об'єкту. У якості модельної рідини застосовано розчин тіосульфату натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) який твердіє по дендритному механізму. Температура плавлення тіосульфату натрію має складає $48,3^\circ\text{C}$ і він зберігає оптичну прозорість до повного твердіння, що дозволяє візуально спостерігати процеси формування кристалічної будови зливка. Фіксацію процесу твердіння проводили за допомогою фото- та відеозйомки. Температуру розплаву контролювали термopарами. Для оцінки теплових процесів при кристалізації зливка проводили термометрування поверхні моделі протягом всього часу твердіння з використанням тепловізора Wintact WT3160.

Було встановлено, що застосування ЕШО призводить до зміщення теплового центру у прибуткову частину зливка і збільшення кута нахилу V-подібного фронту кристалізації, через що покращується підживлення осьової зони зливка рідким металом. В цих умовах поступово збільшується вертикальна складова просування твердої фази, яка на заключному етапі твердіння зливка починає переважати над горизонтальною складовою. Це забезпечує сприятливі умови для усунення осьової пористості та зменшення ліквідаційних процесів. При цьому помітного впливу ЕШО на структуроутворення нижньої частини модельних зливків (від донної частини до висоти $0,5...0,6 \times H_{\text{зл}}$, де $H_{\text{зл}}$ – висота зливка) виявлено не було. Це дає підставу вважати, що ЕШО можна починати не одразу після розливання металу у виливницю, а через певний проміжок часу.

Показано, що ЕШО з температурою шлакової ванни на рівні $1,15 \times T_{\text{пм}}$ (де $T_{\text{пм}}$ – температура плавлення металу) і підживленні рідким металом з температурою $1,2 \times T_{\text{пм}}$ і об'ємом $1,5...2\%$ від загального об'єму зливка, забезпечує повне усунення осьової пористості і усадкової раковини в прибутковій частині зливка. В реальних умовах це дозволить зменшити на 70% об'єм прибуткової частини зливка і тим самим зекономити до 25 тон металу, який іде на обріз. При цьому загальний час твердіння зливка збільшується в середньому на $15...20\%$. На основі проведених досліджень були рекомендовані попередні режими ЕШО з підживленням рідким металом 205 тонного ковальського зливка.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛОК КАНТУЮЧИХ ХОЛОДИЛЬНИКІВ НА МАШИНІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

Волох В. І., Мазур І.А., к.т.н.

Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро

Вступ. За надійною та безпечною експлуатацією металоконструкцій машини неперервного лиття заготовок (МБЛЗ) виконується традиційними, неруйнівними методами контролю, а саме: візуально – оптичний, ультразвуковий, радіаційний, капілярний, магнітопорошковий. На сучасному етапі розвитку технологічних процесів та комплексної оцінки діагностування машин та механізмів явно недостатньо.

У останні роки великий інтерес проявляється до непрямим магнітним методам контролю напружено-деформованого стану (НДС) сталевих конструкцій. Які засновані на тісній кореляційній залежності магнітних та механічних властивостей параметрів металу. Запропонований метод контролю вимірювання НДС за допомогою величини коерцитивної сили H_c який має значні переваги для діагностування.

У роботі досліджувались балки кантуючих холодильників на МБЛЗ. За допомогою трьох гідроциліндрів відбуваються процес переміщення заготовок. Балки кантуючих холодильників постійно переміщують заготовки, де таким чином відбувається процес охолодження заготовок на повітрі. В процесі роботи балки піддаються навантаженням до 150 - 180 тон. В зоні кріплення гідроциліндрів до балки, почали з'являтися видимі тріщини.

Балки кантуючих холодильників виготовлена з марки сталі 09Г2С.

Вимірювання коерцитивної сили виконувалась магнітним структуроскопом КРЦ-К2М на верхній та нижній частині балки через 0,6 метрів та в зоні кріплення гідроциліндрів.

За результати вимірювання встановлено, що вище точки $H_c=6,7A/cm$, пластичної деформації $Q=5,6$ т знаходяться деформовані ділянки балки. Коерцитивна сила у зоні кріплення циліндрів ділянок досягає величини $H_c 7,8-7,9 A/cm$, що значно вище точки плинності для даної марки сталі. Це показує, що є зони підвищеної концентрації напруження як на верхній та і на нижній частині балки, та особливо в зоні кріплення гідроциліндрів.

Висновки: у результаті проведених експериментів вставлена залежність коерцитивної сили від прикладеного навантаження. Виготовлений експериментальним шляхом еталоний зразок з марки сталі 09Г2С. На основі проведених магнітних досліджень проведені слідуєчи ремонтні роботи:

- розроблені тріщини та виконано їх зварювання;
- встановлені металеві накладки в зоні кріплення гідроциліндрів, товщиною, $\delta = 20$ мм, для розвантаження напруження та запобігання виникнення тріщин надалі.

По вимірюванням можливо обґрунтовано судити про відпрацьований ресурс та точніше спрогнозувати остаточний ресурс до начало руйнування. Перевищення H_c вище певного значення (для кожної марки) є зараз єдиним вісником втомних змін у металі балки. Покращення достовірності оцінки втомленого стану металу при діагностиці самих різних об'єктів дає корисний ефект при діагностиці металоконструкцій що дозволяє своєчасно вивести об'єкт з експлуатації та тим самим попередити руйнування.

Літературні джерела

1. Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу: МВ 0.00- 7.01-05.-Х., 2005.-77с.
2. Агинеі Р.В., Кузьбожев А.С. Особенности контроля технического состояния газопроводов по коэрцитивной силе металла. // Контроль, Диагностика №1.2006. С 18-24.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОТОКУ ШИХТИ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

Лебідь В.В., к.т.н.

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

Застосування безконусних завантажувальних пристроїв (БЗП) на доменних печах різного об'єму, збільшення конструктивних варіантів завантажувального апарата і його розподільного лотка, вимагають урахування в алгоритмах моделей параметрів потоку матеріалів, що сходять із розподільника.

Розроблено розрахунковий метод оцінки розподілу щільності потоку шихтових матеріалів, що сходять із лотка БЗП, при їх завантаженні в піч [1]. Для оцінки адекватності результатів розрахунків виконано експериментальні дослідження параметрів потоку матеріалів. Удосконалено експериментальний спосіб із застосуванням сенсорного вимірювального зонда, що дозволило перевірити результатів розрахунків у промислових умовах. Корпус зонда монтується в пічному просторі в межах циліндричної частини колошника за допомогою спеціальної опорної конструкції на відмітці, відповідній до робочого рівня засипу шихти. Експериментально встановлено, що ширина потоку матеріалів, які вивантажуються при використанні кутів нахилу лотка в діапазоні 30°-48° відрізняється незначно й на рівні засипу шихти 1,0 м становить близько 0,8 м, а розподіл щільності потоку по його ширині нерівномірний – найбільш інтенсивна частина зміщена в напрямку до осі печі.

Розроблено спосіб експериментальної оцінки траєкторій шихтових матеріалів у робочому об'ємі печі на основі формування геометричних «гребенів» за допомогою вивантаження порцій шихтових матеріалів із заданих кутових положень лотка з наступним вимірюванням профілю засипу шихти в печі безконтактним способом, отримано патент [2,3].

Нові розрахунково-експериментальні дані про закономірності розподілу щільності потоку завантажуваних шихтових матеріалів дозволили уточнити метод вибору раціональних кутів нахилу лотка в робочих кутових положеннях і вдосконалити математичну модель радіального розподілу шихтових матеріалів.

Літературні джерела

1. Методика расчета параметров потока шихтовых материалов / В.И.Большаков, В.В.Лебедь, А.А.Жеребецкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. - №. 6– С. 99-104.
2. Исследование поверхности засыпи шихтовых материалов в доменной печи во время ее остановки / В.И.Большаков, В.В.Лебедь, А.А.Жеребецкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. - №6. – С. 58-61.
3. Патент на винахід №114553. Спосіб завантаження доменної печі шихтою / В.І.Большаков, В.В. Лебідь, А.О.Жеребецький, О.Л.Чайка / Заявл. 28.09.15. Опубл. 25.02.17. Зарег. 26.06.17.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТЕПЛОІЗОЛЮЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ – РЕЗЕРВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕТАЛУРГІЇ

Мазур В. В.

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

Однією з актуальних задач металургійних, машинобудівних, ливарних підприємств України у воєнний і повоєнний періоди та на перспективу є поширення використання ефективних теплоізолюючих матеріалів з метою енергозбереження у виробництві. Науковцями України розроблено і реалізовано на заводі «СИНТИЗ» промислове виробництво ефективних теплоізолюючих матеріалів із мулітокремнеземистого волокна, які працездатні при температурах до 1600 °С [1–5]. Температура застосування виробів із мулітокремнеземистого волокна може регулюватися залежно від вмісту сполук алюмінію, хрому, цирконію у шихті для виплавлення мулітокремнеземистого матеріалу. Виконаними дослідженнями встановлено, що при застосуванні волокнистих вогнетривких матеріалів, наприклад, для футерування металургійних електропечей періодичної дії на $\sim \frac{1}{3}$ зменшуються втрати тепла і, відповідно, витрати електроенергії. Теплові втрати, зумовлені акумуляцією тепла кладкою з волокнистих матеріалів, менші на 20–40 %, ніж за цегляного футерування. Економія теплової енергії внаслідок зменшення теплового потоку через стіни печі складає (8...10) %. Розроблено заходи щодо розвитку технології і автоматизації виробництва теплоізолюючих мулітокремнеземистих матеріалів і виробів з них різного сортаменту.

Літературні джерела

1. Мазур В.Л., Рябов А.И., Мазур В.В. Энергосбережение, теплоизоляция, «мягкие» огнеупоры. *Металл и литье Украины*. 2009. № 6. С. 27–33.
2. Мазур В.Л., Рябов А.И., Мазур В.В. Проблемы теплосбережения и теплоизоляции в металлургии и пути их решения. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 1. С. 68–71.
3. Мазур В.Л., Рябов А.И., Мазур В.В. «Мягкие» огнеупоры – эффективный путь тепло- и энергосбережения в металлургии. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 2. С. 82–86.
4. ВАТ «Український науково-дослідний інститут вогнетривів імені А.С. Бережного» – 75 років. Харків: Прапор. 2002. 272 с.
5. Приходько Э.В., Мазур В.Л., Хамхотько А.Ф., Мазур В.В. Прогнозирование вязкости расплавов горных пород. *Металл и литье Украины*. 2006. № 1. С. 94–98.

КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ У СУЧАСНІЙ МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

Юшкевич П.О., к.т.н.

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

Металургія є однією з провідних галузей економіки України [1-4], до 2022 року становила другу за обсягом та прибутком статтю українського експорту [2]. Сталеплавильне виробництво є другою ланкою в загальному виробничому циклі чорної металургії [3]. Загалом Україна є одним із лідерів держав-виробників сталі у світі [1, 3]. У 2021 році Україна займала 14 [1] місце в глобальному рейтингу світових виробників сталі за даними World Steel Association (WSA) [1]. За 2021 рік в Україні було вироблено 21366 тис. тонн сталі [1].

У сучасній металургійній галузі України основними способами виплавки сталі є киснево-конвертерний, мартенівський і електросталеплавильний процес [3]. Співвідношення у загальному виробництві сталі між цими видами технологічних процесів змінюється кожного року [3]. Треба відзначити, що одержання сталі за киснево-конвертерним технологічним процесом є найбільш поширеним у світі і Україні. Вже у 2011 році, доля сталі отриманої в кисневих конвертерах складала приблизно 70% від інших способів виробництва сталі у світі [5]. Станом на 2017 рік в Україні доля конвертерної сталі складала 71,7% [6] від загального виробництва [5,6]. За киснево-конвертерним способом переважно одержують марки сталі масового призначення.

Киснево-конвертерне виробництво сталі має потенціал для подальшого розвитку в Державі та збільшення виробництва. За даними [3-6], на сьогодні конвертерна сталь є найвигіднішою за собівартістю порівняно з іншими основними способами виробництва сталі в Україні. Наприклад електросталь, що одержується за процесом виплавки в дугових сталеплавильних печах (ДСП), марок аналогічних до сортаменту марок конвертерної сталі, може бути дорожча у межах від 7,8 % до 95,6 % [4]. Мартенівська сталь дорожча за конвертерну від 24,5 % до 99 % [4]. Такі данні свідчать за доцільність переважного використання для марок сталі масового сортаменту саме киснево-конвертерного способу.

Вище наведені свідчення та те, що киснево-конвертерне виробництво сталі в Україні є єдиним, котре загалом, не потребує таких паливних ресурсів як природний газ, кокс для одержання сталі, є важливими аргументами для концентрації на його подальшому розвитку у чорній металургії України для виробництва сталей масового сортаменту. Конвертерна сталь за основними характеристиками та якістю не поступається аналогічній електросталі та мартенівській сталі та може бути кращою з виробництвом за прогресивним технологічним процесом [1-6].

КОРИГУВАННЯ СУЛЬФІДНОЇ ЄМНОСТІ КОВШОВОГО ШЛАКУ

Сігарьов Є. М., д.т.н., Єськов Д. В., Матина І. М., Коваленко Д. А.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Наведено результати розрахунків зміни сульфідної ємності шлаку, що формується по ходу ковшової десульфурзації переробного чавуну за коінжекційною схемою з використанням суміші на основі вапна та магнію. Перед початком вдування реагентів-десульфураторів на поверхні ковшової ванни, зазвичай залишається 0,6-1,2 % від маси металу шлаку, що потрапив у ківш із чавуном при випуску з доменної печі або при переливі із мікзера. Склад першого («первинного») суттєво відрізняється від складу доменного шлаку та характеризується зниженою основністю й незначною сульфідною ємністю.

Шлак після десульфурзації чавуну складається із залишків первинного та продуктів реакцій видалення та перерозподілу сірки, залишків незасвоєного вапна (CaO , MgO , CaS та ін.). Внаслідок протікання масообмінних процесів $\text{CaO} \rightarrow \text{MgS}_{\text{ТВ}} \rightarrow \text{CaS} \rightarrow \text{MgO}$ хімічний склад та фізичні властивості шлаку безперервно змінюються. Видалення шлаку після десульфурзації ускладнене збільшенням його обсягу, зміни консистенції та необґрунтованими втратами чавуну, вміст якого у вигляді корольків різних фракцій сягає 68-80 %.

Підвищення вмісту CaO та MgO в шлаку збільшують його основність, температуру плавлення та в'язкість, призводить до зміни поверхневого натягу. Формування більш рідкого шлаку з метою створення умов для повернення частини корольків зі шлаку у ванну можливе за рахунок використання модифікаторів (плавикового шпату, кремнезему, карбонату калія, хлориду натрію, колеманіту, нефелінового сіеніту, алюмінату кальцію та ін.), що містять принаймі один з компонентів сформованого ковшового шлаку системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$.

В доповіді представлено результати розрахунків для визначення можливості коригування основності, в'язкості, температури плавлення та сульфідної ємності «первинного» та кінцевого ковшових шлаків при використанні відходів сталеплавильного виробництва – кінцевих шлаків десульфурзації сталі на агрегатах «ківш-піч» (за умов обмеження вмісту S в останніх). Відомий позитивний промисловий досвід використання таких шлаків у якості модифікатору ковшового шлаку.

Відомо, що найбільш легкоплавкі евтектики ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ + тридиміт; $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), на відміну від покровних шлаків ковшової десульфурзації чавуну з інжекцією сумішей на основі CaO та магнію, плавляться при температурі ~ 1300 °С. Маса сірки, що може бути видалена зі шлаком («продуктивність» шлаку по сірці) відрізняється від «сульфідної ємності» шлаку, отриманої розрахунками з на основі термодинаміки. Незважаючи на існування різноманітних механізмів та причин втрат заліза при ковшовій десульфурзації: винесення Fe у потоці відхідних газів; вильот крапель Fe за межі ковша при руйнуванні спливаючих газових пузирів на границі метал-газ; затягування шлаку у металеву ванну потоками у барботажній зоні із захопленням рідкого металу; видалення Fe зі шлаком, що скачують з поверхні ванни після обробки, найбільші втрати (0,4-2,6% від маси металу) обумовлені саме останнім варіантом.

Авторами доповіді досліджено умови зміни та характеристики шлаку десульфурзації чавуну на УДЧ у 230-т заливальних ковшах конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь». У технологічному маршруті виробництва сталі на ПрАТ «Камет-Сталь» задіяні агрегати «ківш-піч» (АКП); відходами доведення сталі на яких є малоокиснений шлак (ШАКП₁) з підвищеним вмістом CaO та вмістом сірки від 0,2 до 0,9%. Склад шлаку ШАКП₁, %: 65-68 CaO , 24-26 SiO_2 , 4,4-5,3 MgO , 2,21-4,23 Al_2O_3 , 0,1-0,13 P_2O_5 . Використання шлаку ШАКП₁ у якості модифікатору «первинного» шлаку сприятиме також вирішенню екологічних завдань (утилізації відходів) та зменшенню собівартості обробки і втрат заліза. У шлаках з основністю CaO/SiO_2 нижче 0,93 (що відповідає молярному співвідношенню $\text{CaO/SiO}_2=1$) утворення CaS уповільнене внаслідок відсутності

вільних іонів O^{2-} й потребує додаткових витрат вапна. Введення ШАКП₁ з вмістом CaO > 60% здатне забезпечити економію коштовного флюїдизованого вапна.

За результатами досліджень механізму десульфурації чавуну показано, що максимальною рідкотекучістю володіють легкоплавкі шлаки евтектичного складу, а їх адсорбційна ємність залежить від ступеня структурно-хімічного розпорядження [1]. Відомо, що присадки MgO та Al₂O₃ знижують температуру плавлення шлаку у визначених інтервалах їх вмісту.

Авторами доповіді виконані розрахунки зміни хімічних складів «первинного» та кінцевого ковшового шлаку УДЧ ПрАТ «Камет-Сталь» при введенні ШАКП₁ у кількості 0,05-0,3% від маси чавуну, визначені їх сульфідна ємність, плавкість та в'язкість після модифікування. В'язкість та плавкість досліджених шлаків визначали з використанням потрійних діаграм.

Прогнозування сульфідної ємності (C_s) модифікованих шлаків виконано з використанням оптичної основності (A), запропонованої Duffy та Ingram. Для розрахунку величини A використані моделі, запропоновані Duffy *et al.*, Tsao *et al.*, Hao & Wang, Sosinsky & Sommerville, Young *et al.*, Zhang *et al.*, Shankar *et al.* При розрахунках A та визначенні змін фізико-хімічних властивостей враховували основні компоненти шлаків (CaO, SiO₂, Al₂O₃) та присутність до 10% MgO. Використані моделі дають відмінні результати (значення $\log C_s$) для модифікованих введенням ШАКП₁ шлаків (діапазон від -2,3 до -5,15), але в цілому відповідають даним відомих досліджень. Зважаючи на те, що шлаки десульфурації зазвичай не є гомогенними та містять певну кількість твердого CaS, прогнозування C_s може бути недостатньо точним для промислових умов, але придатним для вибору напрямків оптимізації складу покривного шлаку з використанням CaO та Al₂O₃-містячих відходів.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ШИХТИ І КОРИГУВАННЯ
ХІМІЧНОГО СКЛАДУ РОЗПЛАВУ ЧАВУНУ
(ймовірнісний підхід із застосуванням методу Монте-Карло)**

Сіренко К. А., Мазур В. Л., чл.-кор. НАН України, д.т.н.

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

Відомі методи вибору компонентів і розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну дозволяють у першому наближенні визначати відсотковий вміст кожного компонента у складі шихти, виходячи із вимог стандарту до хімічного складу чавунного литва та технічних можливостей ливарного виробництва на конкретних підприємствах. Деякі з названих методів передбачають можливість оптимізувати витрати на шихту. Недоліком розповсюджених на практиці методів визначення складу шихти є те, що при їх застосуванні не враховується нестабільність хімічного складу компонентів шихти (металобрухту, феросплавів, карбюризаторів тощо). Це суттєво погіршує достовірність, точність розрахунків шихти і, відповідно, ступінь надійності прогнозування хімічного складу виплавленого чавуну. Відомі методи визначення шихти для виплавлення чавуну полягають в тому, що всі вони орієнтовані на забезпечення середніх величин відсоткового вмісту елементів у складі готового чавуну. Але на практиці випадки хімічного складу готового чавуну за межі, регламентовані стандартом, обумовлюються відхиленнями вмісту будь-якого елемента в менший бік від його мінімального значення у стандарті чи внаслідок відхилення в бік перевищення максимально допустимої величини його вмісту. Навіть при тому, що середні величини відсоткового вмісту елементів можуть співпадати з середніми значеннями відповідних діапазонів їх вмісту, визначених у стандартах чи технічних умовах на чавунні вироби. Зазначене створює значні труднощі для виробників. Саме тому відомі методи розрахунку складу шихти для виплавлення чавуну чи інших сплавів потребують розвитку у напрямі, який позбавляє їх зазначеного недоліку. Враховувати вплив нестабільності хімічного складу компонентів шихти на вміст хімічних елементів у складі виплавленого чавуну дозволяє методика моделювання процедури визначення складу шихти, заснована на ймовірнісному підході із застосуванням методу Монте-Карло [1–4].

Важливо відмітити, що у наукових працях українських вчених О.І. Пономаренко, С.Г. Пелиха з колегами ще у сімдесятих роках минулого століття наголошувалося на доцільності використання при моделюванні ливарних технологічних систем імітаційно-ймовірнісних підходів та методик. Так у книзі [5] Семесенко М.П. і Пелиха С.Г., яка була опублікована у 1975 році, увага науковців і інженерно-технічних фахівців ливарних цехів була акцентована на необхідності поширення застосування ймовірнісно-статистичних підходів у практиці ливарного виробництва. Зокрема – при розрахунках і прогнозуванні параметрів оптимальної шихти для виплавлення залізвуглецевих сплавів. Можна очікувати, що підходи, методології, методика і методи розрахунку складу шихти і регулювання вмісту хімічних елементів у розплаві безпосередньо в процесі виплавлення чавуну, у тому числі із застосуванням методу Монте-Карло [1–4], отримують найближчим часом подальший розвиток.

Літературні джерела

1. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну у процесі виготовлення литва. Метал та лиття України. 2021. Т. 29. № 4 (327). С. 44–54.
2. Сіренко К.А. Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах. Процеси лиття. 2022. № 1 (147). С. 3–10.
3. Сіренко К.А. Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах. Метал та лиття України. 2022. Т. 30. № 2 (329). С. 20–29.
4. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві. Процеси лиття. 2023. № 3 (153). С. 49–60.
5. Семесенко М.П., Пелых С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. Донецк : Донбасс, 1975. 96 с.

НОВИЙ МЕТОД ОБҐРУНТОВАНОГО КОРИГУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

Муравйова І. Г., д.т.н., Іванча М. Г., Щербачов В. Р., Вишняков В. І.

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

Результати численних досліджень підтверджують важливу роль режиму завантаження доменної печі у формуванні пластичної зони та вплив параметрів режиму завантаження на її характеристики.

З використанням розробленого у ІЧМ методу визначення форми та положення пластичної зони виконані дослідження з встановлення взаємозв'язків параметрів пластичної зони з температурою газу над поверхнею засипу шихти на основі реальних даних роботи діючої доменної печі. Виявлені в результаті досліджень взаємозв'язки вертикальних координат точок лінії плавлення з температурою газу над поверхнею засипу та рудним навантаженням у рівних за площею кільцевих зонах доменної печі показали можливість контролю положення та форми пластичної зони з використанням даних термовимірювальних зондів, а також обґрунтованого корегування параметрів цієї зони шляхом зміни розподілу рудного навантаження по радіусу колошника доменної печі. Встановлено, що зв'язок вертикальної координати лінії плавлення у кільцевій зоні з рудним навантаженням у цій зоні характеризується достатньо високими значеннями коефіцієнтів достовірності апроксимації степеневою функцією $0,72 - 0,80$.

Обмежуючі пластичну зону лінії розм'якшення та плавлення визначаються відповідними температурами. В умовах завантаження доменної печі багатокомпонентною шихтою температури розм'якшення та плавлення шихтових матеріалів у конкретній кільцевій зоні визначаються складом суміші матеріалів у цій зоні та їх індивідуальними високотемпературними властивостями. В якості регулюючого параметру при корегуванні температурного рівня поверхонь розм'якшення та плавлення у різних кільцевих зонах доменної печі може використовуватися відношення кількості окатишів і агломерату у цих зонах. Основою для цього є високий коефіцієнт достовірності апроксимації взаємозв'язку різності температур розм'якшення та плавлення з вказаним відношенням, який складає $0,977 - 0,999$.

Управління параметрами пластичної зони, вибір напрямку та величини управляючого впливу у кожному конкретному випадку повинні базуватися на результатах математичного моделювання розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника, визначенні складу сумішей компонентів шихти у різних зонах печі, прогнозуванні їх високотемпературних властивостей та тенденцій зміни цих властивостей при зміні компонентного складу суміші. Для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізородної порції по радіусу колошника у якості управляючого параметру може бути використана уставка розташування дози цього компонента в об'ємі порції (подачі) на конвеєрі або у скіпі. Отримано формули для визначення цієї величини при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті для доменних печей з різною структурою системи завантаження.

Результати досліджень дозволили встановити зв'язки параметрів пластичної зони (розрахованих за допомогою запропонованого методу їх визначення) з показниками розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі. Встановлені зв'язки показників розподілу шихти по радіусу колошника, таких, як рудне навантаження та вміст компонентів шихти в кільцевих зонах колошника, з параметрами пластичної зони є основою для розробки методу обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі.

ОСОБЛИВОСТІ ТВЕРДОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОМАРГАНЦЕВИХ РУД

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

Український державний університет науки та технологій

За обсягом загальних запасів марганцевих руд Україна посідає друге місце у світі після ПАР. Карбонатні марганцеві руди України – низької якості, з коефіцієнтом співвідношення марганцю до заліза менше трьох, характеризуються високим вмістом фосфору та важкозбагачувані. Запаси ПАР, Бразилії та деяких інших країн складаються з більш цінних руд з високим вмістом марганцю. Марганцеві руди України є, по суті, комплексними, що містять залізні та марганцеві мінерали. У зв'язку з цим за існуючою технологією з таких руд неможливо отримати стандартні марки марганцевих феросплавів. При виробництві марганцевих сплавів із таких руд крім поділу марганцю та заліза проблемою є також видалення фосфору. З цих причин для виробництва стандартних марганцевих сплавів в Україні марганцеві руди високої якості доводиться імпортувати. Тому визначення умов твердофазного відновлення заліза та фосфору з переходом їх у металеву фазу при збереженні марганцю в оксидній фазі є актуальним завданням.

Досліджені зразки марганцевих руд різної якості: багаті руди ($Mn/Fe \approx 6$), залізомарганцевого концентрату з високим вмістом заліза ($Mn/Fe \approx 1,6$) та залізомарганцевої руди з відносно високим вмістом заліза та фосфору ($Mn/Fe \approx 2,3$, $P/Mn \approx 0,004$). Досліджували вплив температури та тривалості відновлення зразків, в якості відновників використовували монооксид вуглецю та твердий вуглець.

Результати відновного нагріву в контакті з графітом або тільки у відновлювальній атмосфері приблизно аналогічні. Відмінність полягає лише в тому, що в контакті з твердим вуглецем перетворення в рудних зразках мають глибший характер. Після відновного випалу на поверхні та всередині зразка виявляються виділення металеві фази, що містить залізо. Залишкова оксидна фаза складається з оксидів марганцю і фосфору, причому слід зазначити, що виділення металевих фаз спостерігаються тільки в бідніших зразках, в багатій марганцевій руді в атмосфері СО виділення металевих частинок не відбувається, залізо відновлюється тільки твердим вуглецем і лише в силікатній фазі.

При підвищенні температури та часу витримки зразків у атмосфері СО відновлюється як залізо, так й фосфор, а у багатій руді – частково ще й марганець. При ще більшій тривалості витримки зразка в атмосфері СО та з твердим вуглецем спостерігається зменшення маси зразків, обумовлене відновленням заліза та перетворенням вищих оксидів марганцю в монооксид.

Результати твердофазного відновлення показали, що при відносно низькій температурі (нижче за температуру плавлення оксидної фази марганцевих руд) можна використовувати твердофазне відновлення заліза. Після відновлювального випалу при температурі $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ рудах виявляється виділення металевого заліза. При цьому відновлення монооксидом вуглецю СО призводить до переходу в металеву фазу тільки заліза у лише бідніших марганцевих зразках. У багатій марганцевій руді монооксид на відміну від твердого вуглецю не відновлює навіть залізо. Підвищення температури призводить до відновлення в атмосфері СО не тільки заліза, а й фосфору, причому підвищення тривалості витримки призводить до підвищення вмісту фосфору в металевій фазі. У контакті з твердим вуглецем при цій температурі у металеву частину переходять не тільки залізо і фосфор, а й частково марганець, причому зі збільшенням тривалості витримки збільшується і кількість відновленого марганцю. У зв'язку з цим використання при твердофазному відновленні СО є більш ефективним порівняно з твердим вуглецем, оскільки це сприяє збереженню марганцю в оксидній фазі та одержанню багатшого на марганець шлаку після розділової плавки. При цьому в оксидній фазі після відновного випалу у всіх зразках виявляється індивідуальний монооксид марганцю, а також марганець у складі силікатної фази.

ОТРИМАННЯ ГУБЧАСТИХ ЛІГАТУР МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ**Гришин О. М., к.т.н., Надточій А. А., к.т.н., Петренко В. А., д.т.н., Хромовських С. А.****Український державний університет науки та технології, м. Дніпро**

Пріоритетним напрямком розвитку чорної металургії нині є виробництво якісних марок сталі і композиційних матеріалів. Реалізація таких технологій потребує забезпечення високоякісними легуючими добавками, які повинні відповідати певним вимогам щодо складу та фізико-хімічних властивостей. Губчасті лігатури (ГЛ) використовуються, в тому числі, при виплавці спеціальних марок сталі і в порівнянні з традиційними феросплавами володіють рядом переваг: одностадійна технологія отримання, значно нижча енергоємність їх отримання, більш високий рівень вилучення легуючого компонента з вихідної сировини, висока швидкість розчинення у ванні рідкого металу. Дедалі ширше застосування у виробництві якісних марок сталі знаходить хром у вигляді губчастого ферохрома. Технології виробництва цих матеріалів досить близькі, але мають певні відмінності. При виробництві лігатур на феросплавних заводах використовують переважно металотермічні процеси відновлення шихт алюмінієм.

Одним із найбільш ефективних способів економії легуючих матеріалів є зниження чаду. Використовуючи технологію твердофазного відновлення, можливе отримання металевих губчастих лігатур одностадійним способом, знижуючи при цьому витрати, підвищуючи ступінь вилучення елементів і регулюючи властивостями губчастих лігатур. Завдяки оптимізації таких найважливіших технологічних параметрів, як вміст вуглецю в кінцевому продукті, ступінь вилучення легуючого елемента, а також деяких фізичних характеристик губчастої лігатури (щільність), можлива економія матеріальних та енергетичних ресурсів при виплавці сталі [1].

Металізований губчастий матеріал порівняно легко подрібнюється. Метод твердофазного відновлення технологічно кращий, тому що не потребує складної попередньої підготовки шихти. Можна виділити його переваги:

1. Ступінь відновлення брикетів при металізації у шахтної печі 96,9-98,3 %.
2. Зростає продуктивність процесу відновлення.
3. При легуванні сталі швидкість його розчинення змінюється в інтервалі від 5 до 24 хвилин, залежно від вмісту елемента в металізованому продукті.
4. Засвоєння легуючого компонента розплавом змінюється в межах від 92,1 до 94,9 %, що значно вище, ніж при легуванні розплаву сталі концентратом, що становить 84,6%.
5. Скорочуються до 0,5 % мас. механічні втрати компонентів шихти та, отже, втрати лігатури.

Використання технології твердофазного відновлення дозволяє за допомогою оптимізації параметрів процесу забезпечити зниження вмісту сірки та фосфору в продукті ~ в 4-6 разів.

Твердофазний напрямок включає різні технологічні рішення, серед яких можна виділити технологію спільної металізації металооксидних техногенних відходів та концентратів за допомогою теплової обробки брикетів у капсулі, поміщеній у нагрівальну піч (у шахтних печах, індукційному нагріванні брикетованої шихти та інших пічних агрегатах). Температура нагрівання капсули не перевищує 1523 К при швидкості нагрівання 8-12 К/хв. Кінцевий продукт має рівень відновлення близько 96 % [1]. Використання в якості компонента шихти циклонного пилу та окалини швидкорізальних сталей дає високі якісні показники губки. Технологічні властивості губчастої лігатури (щільність, вміст провідного елемента та ін.), що використовується при виплавці сталі, можуть регулюватися за допомогою співвідношення компонентів шихти, а також режиму відновлення.

Літературні джерела

1. Острик П. Н., Гасик М. М., Пирог В. Д. Металлургия губчатых и порошковых лигатур. К.: Техника. 1992. 128 с.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МБЛЗ ДЛЯ РОЗЛИВАННЯ СОРТОВИХ ЗАГОТОВОК ДРІБНОГО ПЕРЕРІЗУ НА МІНІ-ЗАВОДАХ

Синегін Є. В. к.т.н., Журавльова І. В., Рубан В. О.

Український державний університет науки технологій, м. Дніпро

Ще з кінця минулого сторіччя в світі спостерігається стійка тенденція до будівництва металургійних міні-заводів замість величезних металургійних комбінатів із повним циклом металургійного виробництва. Такі міні-заводи зазвичай орієнтовані на переробку металобрухту та металізованої сировини [1]. Особливої актуальності впровадження міні-заводів набуває в умовах курсу на перехід до «зеленої» металургії. Невелика продуктивність таких підприємств (40-2000 тис. т сталі на рік) та невеликі обсяги замовлень з часто доволі різним марочним сортаментом продукції роблять можливим використання міні МБЛЗ зазвичай горизонтального типу для розливання заготовки, переріз якої дорівнює або максимально близький до перерізу готової продукції. Такі МБЛЗ дозволяють зменшити кількість чистових клітей прокатного стану, що зменшує енергоємність виробництва продукції, площу цехів та капітальні витрати на будівництво. Перевагами таких МБЛЗ є також менші витрати допоміжних матеріалів, таких як футерівка, шлакоутворюючі суміші, води на охолодження тощо. Характерною рисою багатьох міні МБЛЗ є використання графітованих кристалізаторів замість мідних, як у традиційних МБЛЗ, що є дешевшими у виробництві.

Літературні джерела

1. Металлургические мини-заводы: Монография / Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохова Л.В., Цупрун А.Ю. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – 469 с.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ У СКЛАДІ ДОМЕННОЇ ШИХТИ ЗБІЛЬШЕНОЇ ЧАСТКИ ОКАТИШІВ

Семенов Ю. С., к.т.н., Горупаха В. В.

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

В останні роки у металургійній галузі України приділялася значна увага екологічній складовій виробничого циклу. Одним із найбільш вагомих чинників антропогенного тиску є негативний вплив пилоподібних техногенних відходів. Дрібнодисперсний пил промислового походження без наявності належних аспіраційних установок істотно забруднює атмосферу і накопичується в водоймах. В даний час економіка металургійної галузі в умовах військового стану не дозволяє в належній мірі приділяти увагу екологічним програмам, таким як, наприклад, модернізація ливарних дворів доменних цехів, обладнання агломераційних фабрик із встановленням сучасних газоочисних установок, що було раніше успішно реалізовано на металургійних підприємствах м. Маріуполь до повномасштабного російського вторгнення.

Агломераційна фабрика підприємства «Камет-сталь» (м. Кам'янське), що функціонує в даний час, вимагає глобальної модернізації, як для підвищення техніко-економічних показників виробництва агломерату, так і для забезпечення відповідним сучасним екологічним вимогам. В умовах, що склалися, економічно доцільним є скорочення виробництва агломерата на фабриці з поступовим збільшенням у складі доменної шихти окатишів.

З урахуванням того, що доменні печі (ДП) підприємства «Камет-сталь» застарілої конструкції були спроектовані для роботи на агломераті, актуальною задачею стала розробка положень та заходів, спрямованих на перехід доменного виробництва з використанням у складі шихти збільшеної частки окатишів – 70% і більше у суміші з агломератом, або без нього. Дана робота була виконана Інститутом у 2023 р. Далі представлені основні положення, необхідні для переходу існуючих ДП на технологію зі збільшеною часткою окатишів у складі шихти.

Відповідно до вітчизняного та зарубіжного досвіду проектування ДП під використання у складі шихти збільшеної частки окатишів, через бічні розпираючі зусилля, що виникають, по мірі їх опускання та відновлення в ДП [1–3], раціональними діапазонами кутів нахилу шахти є $\alpha_{\text{шахт}} = 81\text{--}83^\circ$ при максимальних кутах нахилу заплечиків – $\alpha_{\text{запл}} = 74\text{--}76^\circ$. Тому необхідною стала зміна кутів нахилу шахти та заплечиків профілю ДП, що досягається шляхом заміни кожуха печі зі збільшенням діаметра розпару.

Першочерговим заходом є питання заміни існуючої системи охолодження елементів ДП технічною водою на систему охолодження з хімічно очищеною водою (ХОВ), що дозволить забезпечити як ефективність процесу охолодження, так і продовжити термін служби елементів системи охолодження. Речовини (солі жорсткості), розчинені в воді підживлення системи охолодження, при нагріванні і взаємодії з металом поверхні утворюють відкладення на стінках поверхні і випадають у вигляді шламів. Високі витрати технічної води дозволяють вимивати шламові відкладення на початковій стадії експлуатації системи охолодження технічною водою. Однак у міру збільшення товщини відкладень на стінках труб, збільшується температура поверхні стінки холодильника з боку робочого простору ДП, збільшення теплового потоку веде до збільшення перепаду температур води і кількості шламів, що випадають, і досягаючи критичного рівня відбувається зниження витрати води в окремих лініях холодильних плит і, зрештою, їх прогар. З іншого боку, зниження можливості тепловідведення та збільшення температури поверхні холодильної плити веде до її прискореного зношування. Тому зниження жорсткості води в системі охолодження високотемпературних та теплонавантажених зон має бути у пріоритеті.

Далі, у зв'язку з сучасними тенденціями, було рекомендовано розглянути питання заміни сталевих холодильників низу шахти та заплечиків на вертикальні мідні, а також збільшити на два ряди кількість холодильників середини шахти, які можуть бути як сталевими, так і чавунними двоплощинними з ХОВ (кілька паралельних змійовиків у тілі холодильника). Крім цього, для

організації підпору обтяженого стовпа шихти з придушенням периферійного газового потоку було рекомендовано підвищувати стійкість футерівки карбідкремніевою цеглою на рівні заплечиків, на який впливає активна вага шихти, що збільшується зі зростанням частки окатишів.

Важливою складовою ефективності технології із застосуванням збільшеної частки окатишів є проведення шоткретування внутрішнього профілю ДП. Рекомендована частота шоткретування шахти, розпару та заплечиків карбідкремніевою футерівкою на рівнях сталевих холодильників та верхньої частини шахти – вогнетривким бетоном з високим вмістом глинозему на основі шамоту складає – не рідше одного разу на 1,5 роки.

Особливу увагу необхідно приділяти розподілу газового потоку із забезпеченням розвиненого центрального газового потоку. Плинність окатишів на поверхні засипу в ДП може призводити до надмірної концентрації їх в осьовій зоні ДП, тому для формування розвиненої осьової віддушини при використанні в шихті збільшеної частки окатишів доцільно передбачити або установку (в пріоритеті) безконусного завантажувального пристрою [4, 5] або конусних завантажувальних пристроїв з можливістю завантаження коксу у центральну зону ДП [6].

Далі представлені деякі технологічні рекомендації для технології зі збільшеною часткою окатишів. Для досягнення задовільних техніко-економічних показників необхідно приділяти особливу увагу якості шихтових матеріалів, стабільності їх використання у шихті, стабільності газо-дуттєвих параметрів та паливних добавок. Необхідно враховувати, що зменшення виходу шлаку при збільшенні вмісту заліза в залізорудній частині шихти знижує тепловий запас горна і будь-яку незначну зміну складу шихти необхідно компенсувати збільшенням нагріву, зміна якості шихтових матеріалів повинна бути мінімальною.

Працюючи з часткою окатишів у шихті до 30–40 % доцільно збільшувати основність агломерату до 1,6–1,8 од., подальше збільшення основності агломерату – недоцільно, оскільки промисловий досвід показує, що виробництво агломерату основністю понад 1,8 од. супроводжується збільшеною нестабільністю за хімічним складом, а також, у ряді випадків, сильним погіршенням його характеристик міцності. Тому зі збільшенням частки окатишів до 70–100% основність шлаку забезпечується збільшенням питомої витрати вапняку, який повинен відповідати вимогам $\text{CaO} + \text{MgO} = 53,8\text{--}54,5$ і мати низький вміст сірки – до 0,050 [7].

Збільшення в шихті ДП окатишів і відповідне збільшення активної ваги шихти, веде до збільшення тиску на кокс, у тому числі на коксову насадку і горновий кокс, що веде до додаткового його руйнування в нижній та центральній зоні, додаткового збільшення опору газовому потоку. Для компенсації цього, а також забезпечення центрального ходу ДП необхідно використовувати кокс підвищеної якості, при роботі ДП з часткою окатишів у шихті на рівні 30–40% міцності коксу по CSR не нижче 46%, при частці окатишів 60–100% – не нижче 55%. З урахуванням тенденції останніх півтора року ця вимога набула особливої актуальності, оскільки характеристики коксу по CSR знизилися до 37–40%.

При збільшенні частки окатишів у шихті підвищується показник реакційної здатності і знижується гаряча міцність коксу за рахунок відновлення на його поверхні дрібнодисперсного пилу, присутнього при стиранні окатишів і руйнуванні їх при відновленні в шахті печі. Виходячи з цього, пред'являються окремі вимоги до використання в шихті, коксу з низькою реакційною здатністю (не більше 30%), а також забезпечення максимального ступеня відсіву окатишів з метою мінімізації кількості дрібнодисперсного пилу.

Збільшення частки окатишів понад 40 % викликає нестабільний хід ДП (при існуючій низькій якості коксу, використанні неофлюсованих окатишів, високоосновного агломерату з можливим зниженням характеристик міцності), що фактично нівелює техніко-економічний ефект від збільшення Fe в шихті і зниження виходу шлаку. При необхідності збільшити частку окатишів понад 40% рекомендовано поетапно збільшувати частку окатишів до 60% і більше. Режим роботи ДП із співвідношенням вмісту в шихті окатишів/агломерату близьким до 50%/50% характеризується суттєвою нестабільністю.

Як зазначається в літературі [8], і підтверджується практичними спостереженнями, збільшення частки окатишів понад 30-40% необхідно проводити поетапно. При цьому кожен крок збільшення (або зменшення) частки окатишів бажано витримувати тривалістю – не менше проплаву двох-трьох об'ємів шихти в залежності від інтенсивності.

Враховуючи менший вміст у кислих окатишах MgO, ніж в агломераті, для підтримки плинності шлаку необхідно при зменшенні частки агломерату в шихті та зниженні виходу шлаку, використовувати комбінований флюс: вапняк + доломіт, для підтримки вмісту MgO у кінцевому шлаку 5–7%. Перспективною покращеною сировиною для ДП при збільшенні частки окатишів понад 40-50 %, можуть виступати частково офлюсовані окатиші, у тому числі, з підвищеним вмістом магnezії.

Дотримання наведеного розробленого комплексу положень щодо внесення конструктивних змін та технологічних рекомендацій дозволить досить ефективно застосувати у найближчій перспективі технологію доменної плавки зі збільшеною часткою окатишів у шихті при зменшенні обсягів виготовлення власного агломерату на агломераційній фабриці, з перспективою її повної зупинки.

ПЕРСПЕКТИВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ В УКРАЇНІ

Тубольцев Л.Г., к.т.н.

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

У стані війни з російською агресією металургія у Україні 2022-2023 роках втратила свої традиційні переваги. Більше половини металургійних підприємств зруйновано, інші значно зменшили виробництво, втратили доступ до експортного та внутрішнього ринку. Тому в таких жорстких умовах перед металургійними підприємствами України постають проблеми не тільки фізичного відновлення, але й оптимізації витрат і підвищення ефективності виробництва. Відповідно до цього ключовим фактором слід вважати технологічний аспект, як інструмент перспективного виживання і розвитку металургійної галузі України (EU 2022).

Метою даної доповіді є аналіз стратегічних аспектів технологічного розвитку металургійної промисловості на основі трансферу технологій та розробка теоретико-методологічних основ його аналізу. Для вирішення поставленого завдання використано системний підхід до аналізу взаємозв'язку технологій і факторів розвитку металургійних технологій.

Сучасне металургійне виробництво характеризується складними схемами переробки металургійної сировини. Тому ми також повинні враховувати результати досліджень, які визначають перелік майбутніх пріоритетів чорної металургії (екологія, технологічна зміна фізичної структури чорних металів, видалення та переробка твердих відходів, прогнозування властивостей, моделювання та впровадження сучасних високопродуктивних виробничих процесів) (ГМК центр 2022).

У сучасному металургійному виробництві 90 % сталі виробляється з використанням технологічної схеми «Доменна піч – кисневий конвертер». Доменна піч являє собою агрегат, що у максимально доступній мірі використовує процеси виробництва сталі з мінімальними енергетичними витратами вуглецю. Проте, сучасні екологічні вимоги потребують зменшення «вуглецевого сліду» у виробництві металургійної продукції, внаслідок чого у світі активно розвивається технологія виплавки металів без використання доменних печей. Перспективним вважається заміна вуглецю, як відновника оксидів заліза та енергоносія, на інші альтернативні джерела енергії, зокрема на водень. У той же час, науковий та експериментальний розвиток нових металургійних технологій ще недостатній для широкого впровадження водневих технологій у промислове виробництво. Така перспектива оцінюється у терміни 2030-2050 роки (Wang et al. 2020).

Виходячи із завдань перспективи розвитку процесів декарбонізації виробництва сталі, стратегію технологічного розвитку металургії доцільно взаємопов'язано розглядати на наступних рівнях:

внутрішній корпоративний трансфер технологій. В умовах ринкових відносин інноваційний розвиток підприємств металургійної промисловості спирається на власні інвестиційні ресурси (амортизаційні відрахування та частину чистого прибутку, яку підприємства можуть спрямовувати на інвестиційне забезпечення інноваційної діяльності);

міжгалузевий рівень: налагодження зв'язків між металургами та споживачами продукції, коли нові металургійні технології можуть дати значний ефект для інших галузей промисловості;

формування державної промислово-технологічної платформи розробки, виробництва та використання матеріалів і технологій металургії.

Розглянемо можливі варіанти декарбонізації виробництва сталі.

Уловлювання вуглецю є однією з найбільш реальних альтернатив для досягнення цієї мети (Спеціальний доклад МГЭИК 2018). Ця технологія ґрунтується на стратегії рециркуляція доменного газу за рахунок його повернення у саму доменну піч, що дозволяє скоротити викиди CO₂ до 8 %, споживання вугільного палива на 12 %, а також можливість виробляти додаткову

електроенергію. Такі результати показують важливість проведення майбутніх досліджень щодо впровадження уловлювання вуглецю та перетворення електроенергії на газ у промисловому секторі. Технологія уловлювання вуглецю з вихідних газів дозволяє також отримувати теплову енергію за рахунок споживання частини паливних газів, що утворюються в коксовій печі, доменній печі та кисневому конвертері, замість використання додаткового викопного палива.

Використання сучасних процесів доменної плавки дозволяє зменшити витрати вуглецю (коксу), проте не дозволяє забезпечити сучасні екологічні вимоги до зменшення викидів вуглекислого газу (Chaika et al. 2022). Теоретично заміна вуглецю на водень може дозволила видалити кисень із залізної руди, при цьому результатом реакції відновлення оксидів заліза є водяна пара замість вуглекислого газу. Проте, експериментальні дослідження показують, що використання водню у сучасних ДП не дозволяє зменшити викиди вуглецевого газу більш ніж на 20 %.

Докорінно змінити екологічну ситуацію та зменшити викиди CO₂ у металургійному виробництві можливо за рахунок застосування технології прямого відновлення заліза (DRI) з використанням водню та наступної плавки продукту в електродуговій печі. У світі проведено багато експериментальних досліджень такої технології (DRI + EAF), проте донині ці технології не отримали широкого застосування, передусім через обмеженість енергетичних ресурсів. Такі технології планують застосувати і в Україні замість порушеного війною парку доменних печей. Проте, на даний час існує деяка проблеми щодо застосування технології DRI + EAF в Україні.

1. Орієнтація металургійного комплексу України на використання інтегрованого способу виробництва сталі не дозволила мати хоч-який досвід роботи з новими технологіями, що може суттєво вплинути на організацію роботи з технологією DRI + EAF.

2. Наукові дослідження в Україні не були орієнтовані на дослідження нових технологій декарбонізації виробництва сталі, що потребує переорієнтації наукових досліджень в металургійному секторі. Використання іноземних досліджень, як показує попередній досвід, неможливе без урахування конкретних умов сировинної бази України та без участі вітчизняних науковців.

3. Організація в Україні виробництва сталі з мінімальним вуглецевим слідом можлива тільки за рахунок об'єднання зусиль держави, приватизованих металургійних підприємств, споживачів металургійної продукції та вітчизняних науковців.

Таким чином, перехід в Україні на виробництво сталі з мінімальним вуглецевим слідом є безальтернативною реальністю і потребує концентрації наукових досліджень на цьому напрямку розвитку металургії на наступні 10-30 років.

Літературні джерела

GMK центр 2022, Decarbonization of steel industry requires a stable supply of green energy <https://gmk.center/member/galina-ermolenko>.

EU climate targets: how to decarbonise the steel industry https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en.

Wang R.Q, Jiang L, Wang Y.D et al (2020) Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: a review. J Clean Prod 274:122997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122997>.

Chaika O., Kornilov B., Merkulov O., Moskalyna A., Лебідь В., Ізюмський М. (2022) Analysis of trends in the development of ideas and technologies aimed at reducing carbon dioxide emissions in blast furnace production. ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 30, 2022. № 2 (329). https://www.researchgate.net/publication/363650935_Analysis_of_trends_in_the_development_of_ideas_and_technologies_aimed_at_reducing_carbon_dioxide_emissions_in_blast_furnace_production

Спеціальний доклад МГЭИК 2018, Улавливание и хранение двуокиси углерода https://web.archive.org/web/20120513142517/http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_ru.pdf.

ПІДГОТОВКА І ПРОВЕДЕННЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОДАЧІ ГАЗУ ЧЕРЕЗ ПОРОЖНИСТИЙ ЕЛЕКТРОД НА ЗМІНУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛУНКИ

Рубан В.О., Синегін Є.В., Стоянов О.М., Савчук Я.В., Савенко М.О.

Український державний університет науки технологій, м. Дніпро

Режим роботи трансформатора установки «ківш-піч» має прямий вплив на довжину електричної дуги, під дією якої утворюється лунка на границі шлак-метал. Реакційної зона, яка виникає при взаємодії електричної дуги з металевою ванною під електродом має форму «меніску».

Для оцінки комбінованого впливу імпульсу електричної дуги та подачі газу через канал графітованого порожнистого електрода (ГПЕ), було проведено попередні розрахунки щодо геометричних параметрів цієї лунки. Такі параметри як глибина і радіус залежать від значення довжини дуги яка була визначена в роботі [1].

Далі за розрахованими критеріями подібності розроблено план експерименту, створено експериментальну установку на якій проведено дослідження. Під час проведення експерименту змінювалися такі параметри як інтенсивність подачі газу каналом ГПЕ, висота шлакового покриву, та висота розташування порожнистого електрода над рівнем дзеркала металу. Відео-фіксація даних відбувалась фронтально на границі метал-шлак і знизу. Контролювались такі параметри: діаметр та глибина утвореної лунки, тиск газу, товщина шлаку і висота розташування ГПЕ.

На основі проведеного фізичного моделювання, на ізотермічній моделі, представляється можливим отримати аналітичні вирази, що показують спільний вплив імпульсу електричної дуги і газового струменю, які впливають на характеристику теплообміну.

Літературні джерела

1. Ruban, V. Investigating cavity formation in an electric arc zone during out-of-furnace processing of steel / V. Ruban, O. Stoianov, K. Niziaiev, Y. Synehin, S. Zhuravlova, K. Malii // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 4/1. – P. 134–142. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284884>.

ЧИ Є МІСЦЕ ДОМЕННІЙ ПЕЧІ В УМОВАХ «ЗЕЛЕНОГО КУРСУ»?

Меркулов О.Є., д.т.н.

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

З даних [1] випливає, що технологічний маршрут одержання сталі доменна піч – кисневий конвертер (BF-BOF) має істотний резерв по зменшенню викидів CO₂ до значень порівнянних з технологіями прямого відновлення заліза.

Для “зеленого переходу” потрібна “зелена” сталь, іншими словами – металургія потребує декарбонізації, але й декарбонізація інших галузей залежить від металургії. Згідно даним ArcelorMittal будівництво 1 МВт потужностей сонячної електростанції вимагає від 35 до 45 т сталі, вітрової електростанції – від 120 до 180 т [2]. Тому декарбонізація галузей енергетики й транспорту, як основних джерел викидів CO₂, повинна відбуватися паралельно з декарбонізацією металургії, щоб давати можливість рухатися в одному напрямку. Тим більше, що технології виробництва сталі з низькими викидами CO₂ не одержали поширення раніше, тому що сполучені з більш високими виробничими витратами. У порівнянні із традиційним маршрутом доменна піч–конвертер (BF-BOF) виробництво тони сталі по низьковуглецевим технологіям обійдеться до 80% дорожче [3]. Ця обставина також наводить про необхідність збереження й модернізації BF-BOF як мінімум, поки не зменшаться викиди CO₂ в енергетиці та транспорті до порівнянних з металургією значень.

Рациональний і системний підхід можна продемонструвати на прикладі металургії Японії. В планах розвитку найбільшої металургійної корпорації Японії Nippon Steel [4] немає відмови від маршруту BF-BOF на відміну, наприклад, від української металургійної компанії Metinvest [5]. Навпаки, Японська федерація чавуну й сталі [6] просуває ідею, виражену в тому, що нехай доменна піч (BF) для відновлення залізної руди при виробництві сталі виявляє більш сильний вплив на навколишнє середовище, чим метод плавки сталевого брухту в електродуговій печі (EAF) для виробництва сталі, однак маршрут BF-BOF створює сталеву продукцію, у результаті якої утворюється брухт, який за рахунок переробки приводить до скорочення викидів CO₂. Оскільки ефект переробки брухту компенсує викиди CO₂ у процесі BF-BOF, вплив маршрутів BF-BOF і EAF на навколишнє середовище в цілому таке ж, як і при багаторазовій переробці сталі [6]. Цей підхід знайшов відображення в японському стандарті JIS Q 20915 «Life cycle inventory of steel products».

Літературні джерела

1. Oleksii Chaika, Bohdan Kornilov, Michael Alter and et al. Analysis of new and existing technologies for reducing carbon dioxide emissions based on the energy balance of blast furnaces. In: *METEC & 6th ESTAD 2023 Conf.* (12-16 June 2023, Düsseldorf, Germany).
2. <https://corporate-cm-uat.arcelormittal.com/media/case-studies/steel-is-the-power-behind-renewable-energy>
3. Simplified levelised cost of competing low-carbon technologies in steel production, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/simplified-levelised-cost-of-competing-low-carbon-technologies-in-steel-production>
4. Nippon Steel Corporation integrated report 2021 https://www.nipponsteel.com/en/ir/library/pdf/nsc_en_ir_2021_a3.pdf
5. «Бізнес та життя під час війни з Юрієм Риженковим» https://youtu.be/s_YeZUFO5jg?si=YVjltDCvfRyC9teY
6. Toshio ISOHARA. CRÈME Webinar on “Carbon Footprint of Steel Products” *The Japan Iron and Steel Federation*. 2021.

УДК 672.259 : 623.32.006.83

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРИВАЛОСТІ ВІДПАЛУ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ НА ОСНОВІ ТИТАНУ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА 3-D ТЕХНОЛОГІЄЮ, НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА МІКРОСТРУКТУРУ**Аджамський С. В., Ph.D, Кононенко Г. А., д.т.н. Подольський Р. В. Ph.D****Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро
Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро
ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

Аддитивне виробництво, зокрема вибіркоче лазерне плавлення (ВЛП) - сучасний метод виготовлення деталей та вузлів складної геометрії з металевого порошку, які складно або неможливо відтворити в умовах традиційного виробництва. Особливістю даної технології є залишкові напруження, що утворюються на етапі виробництва деталей. Оскільки титанові сплави характеризуються низькою теплопровідністю, то проблему формування залишкових напружень для них є особливо актуальною, а термічна обробка для їх зняття - обов'язковою для виробів, виготовлених за ВЛП-технологією. Оскільки структурний стан виробів, отриманих за ВЛП-технологією відрізняється від такого, що формується при застосування традиційних технологій, то необхідні дослідження впливу відпалу для зняття залишкових напружень на механічні властивості та мікроструктуру сплаву Ti6Al4V, отриманого за ВЛП технологією. Досліджували зразки після відпалу з тривалістю витримки 1...5 годин при 800 °С. Встановлено, що тимчасовий опір після термічної обробки протягом 1...5 годин зазнає зменшення в порівнянні з вихідним станом після виготовлення на 20,55...-23,03%, відносно подовження – збільшення 31,33...+35,57%. При цьому характер зміни значень відносного звуження – нерівномірний: відпал з витримкою 1 година не завдає значних змін; зі збільшенням часу витримки до 2, 3 та 4 годин, спостерігається зменшення даної характеристики на 9,03%; 45,97%; 62,56% відповідно порівняно з вихідним станом; після витримки 5 годин значення відносного звуження зазнає приросту даної характеристики в порівнянні зі значеннями після витримки 4 години на ~26,12%. За результатами кореляційного аналізу значень механічних властивостей та параметрів мікроструктури, встановлено, що коефіцієнт форми пластин α -фази має високу кореляцію зі значеннями тимчасового опору, а кількість α -фази найбільше корелює зі значеннями відносного звуження при статичному розтягуванні.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ СО-CR-МО, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ З ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЗУПИНКОЮ

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

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро
Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро
ТОВ «Аддитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

У сучасному виробництві деталей з металевого порошку широкого поширення набув метод селективного лазерного плавлення – Selective Laser Melting (SLM). В Україні розробкою обладнання для створення деталей із металевих порошків за SLM-технологією займається компанія ТОВ «Аддитивні лазерні технології України». В даний час для даного обладнання актуальним завданням є розробка методики вибору параметрів процесу плавлення металевого порошку, що забезпечують необхідні механічні та експлуатаційні властивості деталей. Для досліджень були виготовлені у вертикальному напрямі три дослідні циліндричні зразки зі сплаву Co-Cr-Mo для випробування на розтягування за ISO 6892:2019 – діаметр робочої зони 5 мм, з контрольованою зупинкою на висоті 18 мм від початку робочої зони, загальна довжина якої 28 мм. В результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що тимчасовий опір дослідних зразків з контрольованою зупинкою протягом 24 год. сплаву Co-Cr-Mo, виготовленого за SLM- технологією, зазнає зменшення в порівнянні зі зразками, виготовленими без контрольованої зупинки – на ~13%, відносне подовження –на ~1% та відносного звуження – на ~17%. Встановлено, що для дослідних зразків з зупинкою в процесі побудови відхилення значень від середніх значень складало: для тимчасового опору ~11 %, відносного подовження ~62% та відносного звуження ~ 21%. Це обумовлено руйнуванням одного зі зразків в місці зупинки. Використання деталей з дефектом виробництва (зупинка побудови) має бути суттєво обмежено, відповідно до можливого значного зменшення та окрихчення виробу.

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ СЛП-ТЕХНОЛОГІЇ З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ РОЗРАХУНКОВИМ МЕТОДОМ

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

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро
Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро
ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

Удосконалення режимів технології селективного лазерного плавлення на основі розрахункової моделі для зниження рівня залишкових напружень та запобігання відхилень в геометрії деталі є актуальним завданням. Приводяться результати моделювання на універсальній воксельній структурі і спрощеному об'єкті для прогнозування поведінки металу в залежності від щільності питомої енергії в області кордонів металевої деталі з Inconel 718. Проведено експеримент для вивчення впливу різних стратегій і режимів процесу на викривлення деталей в результаті впливу залишкових напружень з метою їхньої мінімізації. Друк здійснювався на 3D-принтері «Alfa-150» (ТОВ «ALT Україна») при постійній потужності і відстані між треками в кожній зоні (up-skin, down-skin, in-skin) зі зміною швидкості руху променя лазера, а також різними схемами нарощування зразків способом 3D-принтингу з поворотом 67° кожного нового шару відносно попереднього. З метою визначення дефектів і відхилень від вихідної моделі до твердого тіла (зразок) був виконаний металографічний аналіз за допомогою оптичної мікроскопії (Carl Zeiss AXIOVERT 200M). Встановлено, що симуляція процесів друку, виконана на платформі Magics, за допомогою розбивки моделі на воксельну структуру дає можливість аналітичної оцінки напружень і деформацій. Аналіз зовнішнього вигляду дослідних зразків показав, що найкращі показники down-skin формуються при потужності 80 Вт і щільності питомої енергії (40...38 Дж/мм³). При використанні стратегії друку в шаховому порядку з поворотом 67° при оптимальній щільності питомої енергії можливо мінімізувати залишкові внутрішні напруження, що призводять до викривлення виробу. У майбутньому результати можуть бути доповнені дослідженнями впливу залишкових напружень сил стиснення при впливі променя лазера при постійній підведеній потужності. З використанням розрахункової моделі, яка дозволяє обчислювати залишкові напруження при нанесенні наступного шару в залежності від швидкості руху лазера, потужності і відстані між нанесеними треками можливе отримання високоточних деталей з заданими властивостями. Виконано адаптацію моделі, яка дозволяє отримати кількісну оцінку залишкових термічних напружень в залежності від швидкості пересування і потужності лазера для жароміцного сплаву Inconel 718. Визначено оптимальні режими для мінімізації цих напружень і зменшення викривлення деталі.

**ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ
AlSi10Mg, ВИГОТОВЛЕНИХ ТРАДИЦІЙНИМ СПОСОБОМ ТА ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ
ВИБІРКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ**

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

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро
Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро
ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро**

Вибіркове лазерне плавлення (ВЛП) - технологія адитивного виробництва, також відома як 3D-друк, останнім часом все частіше застосовуються, а також розширюється кількість матеріалів і методів, які можна використовувати.

В рамках роботи необхідно встановити раціональні режими виготовлення зразків з алюмінієвого сплаву AlSi10Mg при товщині шару 40 мкм за ВЛП-технологією, дослідження їх механічних властивостей, та порівняння зі зразками, виготовленими за традиційним способом виробництва. Для визначення структурного стану сплавів використовували оптичну мікроскопію, гранулометричний аналіз проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу, механічні властивості визначали за стандартною методикою з застосуванням розривної машини.

Встановлено, що при збільшенні швидкості сканування до 1200 мм/с значну роль в отриманні високої щільності відграє саме відстань між треками. З аналізу механічних властивостей встановлено, що зразки виготовлені за ВЛП-технологією мають вище значення тимчасового опору на 28%, та менші значення характеристик пластичності (відносне подовження та відносне звуження) на 17,4% та 31,7% відповідно в порівнянні зі зразками, виготовленими за традиційним способом виробництва.

Встановлено залежність зміни щільності дослідних зразків виготовлених за ВЛП-технологією з AlSi10Mg від параметрів виготовлення. Встановлено, що при швидкості сканування 1000...1100мм/с зразки мають розмір пор в середньому від 2...7 мкм; зразки, виготовлені при швидкості сканування 1200мм/с - від 1 до 5 мкм.

Застосування отриманих результатів дозволить виготовляти деталі з підвищеними характеристиками міцності.

ФАЗОВИЙ СКЛАД ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ $\text{AlCr}_{0.5}\text{FeCo}_{1.75}\text{Ni}_3\text{W}_{0.5}\text{Ti}_{0.8}\text{B}_{0.6}$ ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

Мисливченко О. М., к.т.н.

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

У 2004 році було опубліковано роботи в яких описано новий тип матеріалів-високоентропійні сплави (ВЕС) [1-2]. В процесі розробки і дослідження ВЕСів було показано, що ці сплави є перспективними зносостійкими матеріалами оскільки в них одночасно можуть бути високими такі характеристики як в'язкість руйнування, твердість, стійкість до високих температур, чудове поєднання високої міцності та пластичності. В даній роботі наведено результати досліджень ВЕСу наступного складу $\text{AlCr}_{0.5}\text{FeCo}_{1.75}\text{Ni}_3\text{W}_{0.5}\text{Ti}_{0.8}\text{B}_{0.6}$.

Досліджуаний сплав отримували методом дугового переплаву, використовуючи як вихідні компоненти метали чистотою більше за 99,5 атомних відсотків та порошок дибориду титану. TiB_2 використовується як сировина, оскільки термічні властивості та щільність бору значно відрізняються від інших металів. Плавку проводили невитратним вольфрамовим електродом на мідній водоохолоджувальній подині. На першому етапі в дуговій печі були сплавлені метали Ni, Ti, Al, Cr, W, Fe та Co у відповідних пропорціях. Отримані злитки механічним шляхом подрібнювалися до порошкового стану, після чого до суміші було додано порошок TiB_2 і повторно переплавлено шість разів для гомогенізації складу.

Рентгеноструктурний аналіз литого сплаву $\text{AlCr}_{0.5}\text{FeCo}_{1.75}\text{Ni}_3\text{W}_{0.5}\text{Ti}_x$ показав, що він кристалізується з утворенням простих твердих розчинів на основі фаз з ОЦК- і ГЦК-структурами, періоди ґратки яких складають $a=0,2920$ та $a=0,3615$ нм відповідно. Після додавання до цього сплаву порошку дибориду титану та повторного переплаву відбувається суттєве зменшення кількості ОЦК і фіксується наявність бориду зі структурою типу W_2CoB_2 (127 просторова група). Також після додавання TiB_2 прослідковується розділення твердого розчину на основі фази з ОЦК-структурою на два компоненти ОЦК₁ та ОЦК₂ з періодами ґратки близькими до вольфраму та заліза. Згідно даних рентгеноструктурного аналізу кількість фази ГЦК після додавання TiB_2 залишилася незмінною, що свідчить про те що борид утворився на основі ОЦК. Варто зазначити, що періоди ґраток твердих розчинів на основі фаз з ОЦК₁- і ГЦК-структурами дещо зростають після додавання TiB_2 , що може свідчити про часткове розчинення бору в них.

Літературні джерела

1. Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., ... & Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced engineering materials*, 6(5), 299-303.
2. Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., & Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375, 213-218.

УДК 669.162.267.6

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ, ЩО ОПИСУЮТЬ ПРОЦЕСИ ПОЗАПІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЧАВУНУ

Кисляков В. Г.^{1,2}, к.т.н., Тогобицька Д. М., д.т.н., Молчанов Л. С., к.т.н.,
Руденко О. Л., к.т.н., Петруша В. П.

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

² Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро

Десульфуратія гарячого металу є основним процесом видалення сірки у виробництві сталі. Типовими реагентами, що зазвичай використовуються в промисловості, є карбід кальцію, вапно, магній, сода та їх суміші.

Математичні моделі кінетики реакцій еволюціонували від спрощених рівнянь швидкості до більш складних моделей, заснованих на явищах, які надають корисну інформацію про вплив фізико-хімічних властивостей і робочих параметрів на ефективність десульфуратії. В останні роки явища течії рідини здебільшено вивчалися за допомогою фізичного та чисельного моделювання.

Математичні моделі були класифіковані відповідно до основних принципів моделювання. Фундаментальні моделі мають на меті описати динаміку процесу за допомогою фізико-хімічних основ і можуть бути розділені на підкатегорії залежно від того, як описується кінетика. Моделі мінімізації вільної енергії системи припускають, що весь спостережуваний об'єм перебуває в термодинамічній рівновазі в будь-який момент. Моделі реакційного об'єму наближено описують гетерогенні реакції, враховуючи масообмін між об'ємом і одним або кількома реакційними об'ємами, які досягають своєї термодинамічної рівноваги в будь-який момент. У моделях реакційної рівноваги збереження імпульсу не враховується, а масові потоки між об'ємами вважаються довільними. Моделі реакції кінцевого об'єму розв'язують рівняння імпульсу в заданій геометрії і таким чином забезпечують фізичну основу для масових потоків між спостережуваними об'ємами. Ще однією категорією фундаментальних моделей є моделі поділу реакцій, які описують гетерогенні міжфазні реакції за допомогою теорії прикордонного шару. Ключовими параметрами таких реакцій є розмір міжфазної площі, ефективність масопереносу до та від поверхні розділу та швидкість міжфазної реакції.

Емпіричні моделі відрізняються від фундаментальних тим, що для моделей такого типу ідентифікація параметрів моделі проводилася певною мірою на основі лабораторних або промислових даних процесу. Ступінь точності опису процесу залежить від рівня експертних знань, доступних у системі. Подальша кластеризація моделей, керованих даними, може бути зроблена на основі структури моделі, яка або походить від фізико-хімічних явищ (моделі параметризованих реакцій), або має загальну математичну форму (моделі лінійної або нелінійної регресії та моделі штучної нейронної мережі).

Фундаментальна модель, запропонована Deo and Boom [1] фокусується на десульфуратії за допомогою CaC_2 у торпедному ковші. Загальна швидкість десульфуратії вважається сумою постійних (метал-шлак) і тимчасових (метал-реагент) реакцій. Припускаючи гарне змішування в металевій ванні, швидкість постійної реакції була сформульована відповідно до виразу швидкості першого порядку, в якому передбачалося, що швидкість масопереносу контролюється масопереносом у дифузійному прикордонному шарі металеві фази.

Zou [2] запропонував модель десульфуратії чавуну за допомогою CaC_2 , Mg або їх суміші. Вважалося, що десульфуратія, при застосуванні CaC_2 , складається з тимчасових і постійних реакцій, тоді як реакції магнію з розчищеною сіркою були розділені на гетерогенну реакцію першого порядку з твердим Mg і очевидну гомогенну реакцію другого порядку з розчиненим Mg.

Результати моделювання Zou припускають, що внесок CaC_2 і Mg у загальну швидкість десульфурації змінюється з часом. У досліджуваному випадку швидкість десульфурації CaC_2 зменшувалася майже лінійно як функція часу інжекції, тоді як крива десульфурації, що відноситься до Mg , мала приблизено до параболічній траєкторії, яка перевершувала траєкторію CaC_2 .

Українськими спеціалістами в Інституті чорної металургії стосовно технології десульфурації зернистим магнієм, удосконалена інтелектуальна система підтримки прийняття рішень по керуванню технологічними процесами обробки чавуну шляхом розробки інформаційно-математичного забезпечення для Експертної системи «Позапічна обробка чавуну». Розроблені адекватні моделі розрахунку питомої витрати реагентів при цнжектуванні магнію або суміші магнію та вапна [3].

Важливу роль у описі процесів, які протікають під час позапічної обробки чавуну, відіграє фізичне моделювання. Під час фізичного моделювання вивчаються розподілення газового потоку, пермішування вани, поведінка газопорошкового струменю, заглиблення часток реагенту, поведінка бульбашок. Різними авторами стосовно обраної технології проведено ряд досліджень на основі фізичного моделювання процесу десульфурації.

Tirpathi та ін.[4] використовував фізичне моделювання для вивчення впливу семи різних конструкцій фурми випадку десульфурації CaC_2 . Було виявлено, що бульбашки газу піднімаються в основному поруч із фурмою через ефект поверхневого натягу. При використуванні пряма фурма забезпечує значно меншу дисперсію бульбашок порівняно з більш складними конструкціями фурми.

Farias and Irons [5] зробили узагальнення поведінки течії рідини струминних частинок газу, що має значення для десульфурації чавуну. Вони відзначили, що при високому вмісті частинок дрібні частинки зазвичай рухаються зі швидкостями, що відповідають швидкості газового потоку.

В Інституті чорної металургії проведено гідрогазодинамічні дослідження рідкометалевої ванни під час інжекційного рафінування розплаву через занурювальну фурму на холодній моделі ковша [6]. Застосована методика комп'ютерного опрацювання відеокадрів процесу газорідинної взаємодії, що дало змогу провести кількісну оцінку ефективності газорозподілу в об'ємі рідиннометалевої ванни при вдуванні газопорошкового струменя під різним кутом.

Також в Інституті чорної металургії виконаний великий обсяг досліджень по розробці математичної моделі для оцінки занурення частинок реагенту з газом у розплав чавуну під час десульфурації [7]. Закономірності поведінки та взаємодій двофазних струменів (транспортуючий газ+реагент) з розплавом чавуну складні, оскільки втрачаються індивідуальні динамічні характеристики окремої частинки. З гідродинамічної точки зору задачі проникнення тіл у рідину відносяться до класичного типу гідродинамічних задач і актуальні й в наш час. На основі рівнянь гідро- і аеродинаміки, рівнянь Нав'є-Стокса розроблені математичні методи для знаходження динамічних характеристик тіла, що занурюється у рідину з урахуванням каверни, що за ним утворюється.

Висновок.

Зроблений огляд аналітичних, експериментальних та модельних досліджень десульфурації чавуну. З збільшенням даних, зростає інтерес до застосування методів, керованих даними, для підвищення точності прогнозування. Моделі, що керуються даними, виявилися ефективними, особливо при десульфурації чавуну, оскільки деякі явища процесу неможливо точно визначити кількісно за допомогою сучасних технологій.

Літературні джерела

1. B. Deo and R. Boom, *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*, Prentice Hall International, Hertfordshire, United Kingdom 1993, p. 300.
2. Z. Zou, Y. Zou, L. Zhang, N. Wang, *ISIJ Int.* 2001, 41, S66.
3. Інформаційно-математичне забезпечення технології десульфурації чавуну / Д.М. Тогобицька, Л.С. Молчанов, О.С. Вергун, В.Г. Кисляков, Ю.М. Ліхачев, Н.Є. Ходотова // Сб. научн. пр. ИЧМ «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії», 2020. – Вип. 34. – С. 62–72.

4. P. Tripathi, D. S. Kumar, R. Sah, V. R. Sekhar, Ironmak. Steelmak. 2017, 44, 421.
5. L. R. Farias, G. A. Irons, Metall. Trans. B 1985, 16, 211.
6. Моделирование заглубленной продувки чугуновозного ковша. параметры газораспределения. / А.П.Толстопят, Л.А.Флеер, В.И.Елисеєв, Т.А.Рузова, А.Ф.Шевченко, С.А.Шевченко. // Сб. научн. пр. ИЧМ «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії», 2008. – Вип. 17. – С. 97–110.
7. Оцінка параметрів занурення частинок реагенту з газом у розплав при інжекційній позапічній десульфурації чавуну . / В. І. Єлісеєв, І. О. Маначин, А. П. Шевченко, С. А. Шевченко. // Сб. научн. пр. ИЧМ «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії», 2022. – Вип. 36. – С. 172

НЕОБХІДНІСТЬ ДЕГАЗАЦІЇ СТАЛІ НА ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ»

Піптюк В. П., к.т.н., Греков С. В., Кукса О. В., к.т.н.

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

Перспективи розширення марочного сортаменту сталі що виробляється на ПрАТ «Каметсталь» потребують зокрема розвитку технологій позапічної обробки в частині забезпечення можливостей додаткового підвищення якості металу. Виробництво осьової та інших вуглецевих і високовуглецевих марок сталі пов'язано з ймовірністю утворення флокенів у безперервнолитій заготовці. Причиною цього є наявність вмісту надлишкового водню та інших газів після обробки металевого розплаву на установках ківш-піч. Відсутність в конвертерному цеху підприємства обладнання для дегазації сталі скорочує умови виробництва якісного металу, обмежує марочний перелік заказів і звужує потенційні можливості великого виробника металопродукції.

Сучасні технологічні маршрути позапічної обробки сталі в світовій металургії в переважній більшості випадків включають вакуумування рідкого металевого розплаву в сталерозливному ківші в якості однієї з важливих, необхідних і передостанніх перед розливом операцій. Наявність відповідного обладнання і здійснення такої операції при виробництві сталі обумовлена не лише можливістю забезпечення необхідних вимог відносно вмісту водню, кисню, азоту та вуглецю, остаточного корегування її хімічного складу але й отриманням «чистого» по неметалевим включенням металу.

Різноманіття існуючих і застосовуваних у сталеплавильному виробництві способів позапічної (ковшової) обробки дозволило отримувати сталь з необхідними вимогами, забезпечило більш ефективне використання дорогих енергетичних та матеріальних ресурсів і підвищило конкурентоспроможність металопродукції що виробляється.

В останні десятиліття тривала розробка нових марок сталі з заданими властивостями та з регламентованим вмістом шкідливих домішок і легуючих елементів, так званих «чистих сталей» [1, 2], які вироблялись з використанням різних технологій позапічної обробки.

Аналіз напрямів вдосконалення устаткування для ковшової обробки сталі свідчить про збереження тенденцій в розробці і використанні багатофункціональних комплексів для здійснення процесів вакуумування, рафінування і доведення сталі (склад і температура) при мінімізації витратних складових.

У світовій металургійній практиці значне поширення отримала дегазація сталі в сталерозливному ківші (VD, VOD – камерні способи; DH – порційний і RH – циркуляційний способи та їх модифікації; RM – пульсаційне перемішування (спосіб вакуумування)).

З врахуванням проаналізованих даних для умов конвертерного цеху ПрАТ «Каметсталь» рекомендовано до подальшого розгляду в якості прийняттого варіанту прямий технологічний маршрут (конвертер – установка ківш-піч – вакуумний дегазатор – МБРС) виробництва сталі з позапічною вакуумною дегазацією.

Літературні джерела

1. Тенденции развития технологии производства стали высокой чистоты и огнеупорного производства / А. Бур, Р. Брукхауз, Р. Фандрих, К. Даннерт // Черные металлы. Апрель 2017. – С. 29-37.
2. Past development and future prospects of secondary refining technology / Semura K., Matsuura H. // Tetsu to Hagane. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. 2014. 100. №4. – С. 456-471.

РОЗРОБКА КРИТЕРІЮ ОЦІНКИ ПРОЦЕСУ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕМЕНТІВ У СИСТЕМІ «МЕТАЛ - ШЛАК» ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ

Тогобицька Д. М., д.т.н., Поворотня І. Р., к.т.н., Піптюк В. П., к.т.н.,
Белькова А. І., к.т.н., Ходотова Н. Є.

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

Сучасні розширені погляди на фізико-хімічні процеси між металом та шлаком, властивості хімічних елементів і закономірності формування їх з'єднань, змінені умови виробництва, сировинної бази й модернізація сталеплавильних агрегатів вимагають врахування нових чинників, що обумовлюють перехід елементів у системі «метал-шлак» та спрощення форми запису і тривалості розрахунків. В ІЧМ НАНУ структуроформування моделей з метою визначення кінцевого вмісту кремнію, марганцю, сірки, фосфору здійснюється на основі поєднання встановлених інформативних фізико-хімічних параметрів металевих, шлакового розплавів та добавок, їх комплексних співвідношень і технологічних параметрів, що відображає новий підхід до обґрунтування рішень щодо оцінки їх ефективності засвоєння. Рівноважні значення розподілу сірки та фосфору розраховувались по моделям Приходько Е.В. та Тогобицької Д.М. [1], які розроблені на основі аналізу накопиченої інформації у базах даних. Результати порівняльного аналізу фактичного розподілу з рівноважним відображає ступінь віддаленості та наближення до стадії спокою (завершення іонообмінних процесів) системи «метал-шлак». Як показує аналіз даних, частина вибірки даних марки сталі 09Г2С та її модифікацій наблизились до рівноважного значення по сірці, проте значна частина плавів знаходиться на стадії значного віддалення.

Оцінка ефективності процесу розподілу елементу проводилась по наступному критерію: $\xi = \frac{Le_{кін} - Le_{поч}}{Le_{поч}} \cdot 100\%$, де $Le_{кін}$ – значення розподілу елементу між кінцевими металом та шлаком,

$Le_{поч}$ – дані розподілу елементу між початковими металом й шлаком. У разі, коли значення $\xi \geq 1$, то процес видалення сірки проходить з виведенням її зі шлаковою фазою, чим більша відмінність від 1, тим ефективніше протікає процес десульфурації, але у випадку, якщо $\xi \leq 1$, відбувається сегрегація сірки у металевому розплаві. Проведений розрахунок по критерію ξ для оцінки розподілу сірки показав, що значення його для усієї вибірки даних більше одиниці, при цьому мінімальна позначка на рівні $\xi_{min} \approx 3,5$, а максимальна $\xi_{max} \approx 730,9$.

Значення критерію ξ залежать від процесів перезарядки сірки між металом та шлаком і виражаються параметром міжатомної взаємодії, який вираховується, як різниця між зарядом сірки у металевому та шлаковому розплавах: $\Delta Zc^S = Zc^S_{мет} - Zc^S_{шл}$. Чим менші значення ΔZc^S , тим відповідно вищі показники критерію ξ та наближення системи до рівноважного стану. У результаті відбору найбільш віддалених по рівноважному значенні сірки даних, при вираженні прогнозних моделей типу $\lg L_{Sфакт} = f(\rho_{шлаку}, \Delta Zc^S)$ $R^2 = 0,7$, що підтверджує продовження протікання кооперативних іонообмінних процесів у них, на відміну від плавів ближчих до рівноваги на яких даний параметр не має суттєвого інформаційного значення $R^2 = 0,089$.

Запропонований критерій демонструє ефективність використання фізико-хімічного апарату концепції спрямованого хімічного зв'язку для опису складних металургійних процесів, зокрема аналізу повноти протікання фізико-хімічних взаємодій у системі «метал-шлак», що є важелем впливу для одержання конкурентоздатного металу затребуваної якості металоспоживачами.

Літературні джерела

1. Приходько Э.В. Физико-химического моделирование процессов межатомного взаимодействия в металлургических расплавах / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая // Вестник ПГТУ. - Вып.7. - Мариуполь. -1998. - С.72 – 83.

РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ПИТОМИХ ВИТРАТ МАГНІЮ І ВМІСТУ СІРКИ В ЧАВУНІ ПРИ РІЗНИХ УМОВАХ ІНЖЕКЦІЙНОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

Шевченко А. Ф., д.т.н., Маначин І. А., к.т.н., Двоскин Б. В., к.т.н.

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

Українська технологія процесу інжекційної десульфурації чавуну зернистим магнієм розроблена Інститутом чорної металургії та Інститутом титану спільно з низкою організацій [1,2,3]. Умови застосування позапічної десульфурації чавуну на цих підприємствах дуже різні: за масою чавуну в ківшах, за необхідними обсягами десульфурації, за вихідним та необхідним кінцевим вмістом сірки. На підставі отриманих та наявних фактичних показників та параметрів десульфурації чавуну сформовано банк даних понад 3000 контрольних обробок чавуну - з отримання сірки у вихідному чавуні, як правило, перебувати в межах 0,03-0,06-0,07%. Маса чавуну в ковшах становить від 40 до 350 т. Вміст сірки в чавуні після десульфурації знаходиться в основному в межах 0,002-0,010%. У практиці створення та освоєння процесу десульфурації чавуну вдуванням магнію потрібно надійне прогнозування очікуваних величин кінцевого вмісту сірки в чавуні при варіюванні вихідного вмісту сірки в чавуні, питомої витрати магнію та типорозмірі ковшів, в яких знесірчується чавун. З цією метою, використовуючи отриманий масив фактичних даних були розроблені моделі прогнозування параметрів необхідних витрат магнію для кінцевих вмістів сірки в чавуні при змінних величинах вихідного вмісту сірки в чавуні, питомої витрати, що змінюється магнію, різної маси чавуну в ковшах. Ці дані представлені відповідними розрахунковими моделями :

$$q_{Mg} = 0,36 + 8,5 * (S_{поч} - 0,02) - ((\ln(S_{кін}) - \ln(0,015)) / 11,5) - \text{ковші з масою чавуну менше 75 т}$$

$$q_{Mg} = 0,206 + 7,5 (S_{поч} - 0,02) + (\ln(0,02) - \ln(S_{кін})) / 10,5 - \text{ковші з масою чавуну 80-130 т}$$

$$q_{Mg} = 0,200 + 7,0(S_{поч} - 0,02) + (\ln(0,02) - \ln(S_{кін})) / 9,1 - \text{ковші з масою чавуну понад 140 т}$$

Розроблені розрахункові моделі перевірені на всіх діючих комплексах десульфурації чавуну. Підтверджено їхню правомірність. Ці результати роботи та дослідження з'явилися невід'ємною частиною технічних і технологічних регламентів діючих та новостворюваних потужностей з десульфурації чавуну.

Літературні джерела

1. Шевченко А.Ф., Маначин І.А., Вергун А.С. и др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология, исследования, анализ, совершенствование. – Днепро-ВАЛ. – 2017. – 252 с.
2. Шевченко А.Ф., Маначин І.А., Шевченко А.М. Технологии внепечной десульфурации чугуна. Черные металлы. – 2015. - № 3. - С.18-23.
3. Воронова Н.А. Лесульфурация чугуна магнием. М.: Металлургиздат. – 1982. – 239 с.

Автоматизація та сучасні методи контролю металургійних процесів та якості металургійної продукції

УДК 621.771.685.5

АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСНИМ РЕЖИМОМ ВІЛЬНОЇ ПРОКАТКИ З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

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

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Найкращим швидкісним режимом прокатки на дрібносортних станах є режим вільної прокатки з петлеутворенням у чистових групах клітей [1]. Стабілізація петлі здійснюється системою керування частотою обертання валків прокатних клітей за інформацією датчика положення петлі.

Збільшення петлі прокату залежить від частот обертання валків суміжних клітей і коефіцієнта витяжки прокату в кліті, наступної за регульованим проміжком.

Для налаштування системи необхідно знати числові характеристики впливів, що обурюють і впливають на величину петлі прокату.

Було досліджено зміну частоти обертання двигуна головного приводу клітей при стабілізації величини петлі прокату в міжклітьовому проміжку клітей чистової групи безперервного прокатного стану [2]. Зміна частоти обертання валків характеризує сумарні дії режиму прокатки на величину петлі.

Дослідження показали, що у не стаціонарній реалізації можна виділити тренд, який описується цілком детермінованою залежністю, та проводити аналіз випадкової стаціонарної реалізації щодо цього тренду.

Була розроблена структурна схема контуру регулювання положення петлі прокату (регулятори розраховані за методикою [3]). Ця схема включає: електропровід з контуром струму, контуром швидкості, регулятором швидкості, петлею прокату, регулятором положення петлі, компенсатором обурювальних впливів. Компенсатор виконан на базі Fuzzy контролера [4] і виробляє керуючий вплив залежно від неузгодженості в контурі петлерегулювання. Цим самим відстежується та компенсується низькочастотна складова обурення за швидкістю прокату, яка може досягати 10% від швидкості прокатки.

Отримані дані зміни величини петлі без компенсуючого контуру та з ним. Величина петлі в системі без компенсуючого контуру при прокатуванні більш потовщеної задньої частини прокату досягає максимально допустимого розміру. В системі з компенсуючим контуром цього не відбувається.

Стабілізувати величину петлі в заданому діапазоні можна або збільшуючи коефіцієнт регулятора, погіршуючи при цьому динаміку всієї багатозв'язкової системи управління швидкісним режимом прокатки, або використовуючи запропонований метод адаптивної компенсації обурення.

Запропонований метод компенсації за допомогою адаптивного регулятора суттєво покращує динамічні процеси у системі. При моделюванні роботи системи керування швидкісним режимом прокатки відхилення довжини петлі не перевищило 0,02 м.

Літературні джерела

1. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография / А.С. Бешта, В.Н. Куваев, О.Е. Потап, А.П. Егоров. - Днепропетровск: Журфонд, 2014. - 283 с.

2. Егоров А.П. Совершенствование систем автоматического управления многосвязными электроприводами группы клетей при прокатке с петлерегулированием: дис. ...канд. техн. наук: Днепропетровск, 1981. 145 с.
3. Єгоров О.П., Рибальченко М.О., Маначин І.О. Цифрові методи дослідження та розрахунку регуляторів в системах автоматичного керування: Навчальний посібник. Україн. Держ. Ун-т науки і технолог.-Дніпро, 2022.-124 с.
4. Єгоров О.П., Михайловський М.Н. Проектування систем управління в середовищі Fuzzy Logic Toolbox : Навчальний посібник. – Дніпро: НМетаУ, 2020. – 85 с

АНАЛІЗ ЗАХОДІВ ЗАПОБІГАННЯ МЕТАНОВИМ ВИБУХАМ НА ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

П'яник О. О., Саввін О. В., к.т.н.

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Коксохімічна промисловість є складовою важкої промисловості і включає в себе процес хімічної обробки кам'яновугільної сировини за допомогою методу коксування.

Кам'яновугільне коксування відбувається у спеціальних печах. Цей процес розкладає паливо на легкі продукти та кокс. Основним результатом коксування є кокс, який використовується у металургії як відновник і паливо.

Головну роль у вугільній промисловості України відіграють шахти ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Найбільша шахта Західного Донбасу (шахта-гігант) "Західно-Донбаська" - вуглевидобувне підприємство у місті Тернівка Дніпропетровської області. Глибина проведення робіт становить 480-585 метрів.

19 квітня 2012 року на шахті «Західно-Донбаська» стався вибух метану, внаслідок якого загинув працівник шахти. Встановлено, що вибух стався через порушення правил безпеки. Було порушено режим вентиляції гірничих виробок, що призвело до накопичення вибухонебезпечної кількості метану.

Запобігання вибуху метану на вугільній шахті потребує суворого дотримання безпечних практик та використання спеціалізованого обладнання.

Кілька заходів, які можуть допомогти запобігти вибуху метану на вугільній шахті:

- а) встановлення систем вентиляції; б) моніторинг газів (ці системи можуть попередити про можливу небезпеку та автоматично включити системи вентиляції або сигналізацію);
- г) використання метаногорілок (дозволяють спалювати метан, що виділяється у шахті, у безпечній формі); д) профілактичні ізоляційні заходи (волога обробка або закачування інертних газів (азоту) в шахту, щоб знизити ймовірність утворення сумішей метану та повітря).

Літературні джерела

1. В.І. Саранчук, М.О. Ільяшов, В.В. Ошовський, В.С. Білецький. Основи хімії і фізики горючих копалин. - Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. - с. 600.
2. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т./за ред. В. С. Білецького. - Донбас, 2004. - 640 с.
3. Гірничий енциклопедичний словник, т. 3. / За ред. В.С. Білецького. - Донецьк: Східний видавничий дім, 2004. - 752 с.
4. Коксохімічне виробництво/Фізичні та хімічні основи галузевого виробництва: Навчальний посібник. / Смирнов В.О., Білецький В.С. - «Новий Світ-2000», 2022. - 148 с.

ДОСВІД ДОСЛІДЖЕННЯ СЕПАРАТОРУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НЕРУЙНІВНИМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЮ

Григор'єва Н.О., Мірошникова Т.П.

Фаховий коледж зварювання та електроніки імені Є.О. Патона, м. Дніпро

Діагностика устаткування дозволяє замовнику дізнатися про проблеми в устаткуванні і своєчасно вжити заходів до їх усунення. Діагностичні роботи - включають в себе профілактичний огляд устаткування та виявлення можливих дефектів (або необхідність у регулюванні) вузлів і механізмів устаткування. Разові діагностичні роботи проводяться за фактом несправності. Діагностичні роботи за графіком більш переважні. Вони, як правило, дозволяють запобігти поломку обладнання, а, отже, і його тривалий простій.

Неруйнівний контроль – це комплекс властивостей і методів об'єктів, при яких руйнування об'єкта дослідження не потрібно. Тобто об'єкт дослідження повністю зберігає свої властивості, може бути використаний за призначенням.

В рамках досліджень використовуються наступні методи з проведення діагностування неруйнівного контролю сепаратора природного газу:

- візуально-вимірний контроль;
- ультразвуковий контроль та товщинометрія;
- магнітопорошковий метод контролю;
- визначення твердості методом ударного відбитку.

Сепаратор природного газу - складнотехнічний пристрій, призначений для очищення газових потоків від механічних домішок, фракцій води та інших сторонніх включень. Він використовується для оснащення газопереробних підприємств, компресорних та розподільних станцій. Додаткова функція такого обладнання полягає у підтримці тиску в системі на оптимальному рівні.

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАЛАШТУВАННЯ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ СЕКЦІЙНОГО РОЛЬГАНГА ХОЛОДИЛЬНИКА ДРІБНОСОРТНОГО СТАНА

Потап О. Ю., к.т.н., Зінченко М.Д., к.т.н., Кисляков В. Г., к.т.н., Бутенко М. В.

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Безаварійне укладання стрижнів прокату на холодильник безперервного дрібносортового стана забезпечується відповідним налаштуванням швидкісного режиму секційного рольгангу, що підводить. Оптимальним вважається режим, згідно з яким в момент підходу переднього кінця розкату до перетину першого клапану скидача холодильника задній кінець відрізаного стрижня, що гальмується, пересуваючись на клапанах скидача, перебуває у тому ж перетині, а клапани підняті на «висоту відсікання», що гарантує надійне розділення суміжних стрижнів на вході холодильника [1].

Технічні рішення щодо автоматизованого налаштування швидкості секцій рольгангу, що підводить, базуються на припущенні про зневажливо малу тривалість переходу стрижнів з однієї швидкості на іншу в процесі розгону [2]. В роботі було здійснено перевірку виправданості такого припущення шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання роботи відповідної АСУ. Доведено, що для певних значень швидкості прокатки і довжини стрижнів, що транспортуються, нехтування тривалістю перехідних процесів розгону стрижнів на рольгангу є неприпустимим з огляду на виникнення аварійних ситуацій через нерозділення суміжних стрижнів на вході холодильника.

За результатами багатofакторного активного експерименту на створеній моделі процесу транспортування стрижнів було отримане рівняння множинної регресії, що пов'язує довжину просторового розриву ΔS між кінцем попереднього та початком наступного стрижнів з такими параметрами процесу, як швидкість \bar{V}_0 прокатки, швидкості \bar{V}_1 та \bar{V}_2 – першої та другої секцій рольгангу та довжина стрижнів, яке після визначення значущості коефіцієнтів набуло вигляду

$$\Delta S = 2,62 + 0,39\bar{V}_1 + 0,42\bar{V}_2 + 0,07\bar{V}_1\bar{V}_2 - 1,5\bar{V}_0,$$

де \bar{V}_0 , \bar{V}_1 та \bar{V}_2 відносні нормовані значення відповідних швидкостей.

Запропонована модернізація існуючої АСУ полягає у визначенні оптимальних значень швидкості секцій рольганга, виходячи зі зазначеного рівняння.

Імітаційне моделювання модернізованої АСУ секційним рольгангом виявило її ефективність та доцільність впровадження, зокрема, на дрібносортовних станах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Літературні джерела

1. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография / А.С. Бешта, В.Н. Куваев, О.Е. Потап и др. Днепропетровск: Журфонд, 2014. 283 с.
2. Кузьменко А. Г. Производство мерного проката на непрерывных мелкосортных станах. М.: Металлургия, 1997. 310 с.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОКАТКИ НА ТОВСТОЛИСТОВОМУ СТАНІ

Приходько І. Ю., д.т.н., Воробей С. О., д.т.н.

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

Дослідження було проведено на одному з товстолистових станів (ТЛС) 3600. Програма для розрахунків енергосилових параметрів прокатки застосовується в системі автоматичного керування процесом прокатування листів. Від точності розрахунків залежить оптимальність параметрів прокатки і якість продукції. Існуючий на стані 3600 алгоритм і комп'ютерна програма використовують, так звані «криві твердості», які визначають залежність коефіцієнтів твердості від температури деформації для групи сталей. При всій своїй простоті такий підхід забезпечує в більшості випадків непогані результати прогнозних розрахунків енергосилових і температурних параметрів процесу прокатки. Однак при цьому не враховується ряд важливих факторів, зокрема, зміну хімічного складу сталі в межах однієї марки. Окрім цього, існуючи зараз 25 кривих твердості охоплюють близько 780 різних марок сталей і вони згруповані в такий спосіб, що здатні в деяких випадках привести до високої похибки розрахунків.

В Інституті чорної металургії розроблена і перевірена в умовах широкоштабових станів гарячої прокатки програма розрахунку температурних та енергосилових параметрів прокатки. Розроблена програма враховує такі додаткові фактори, які не враховані в алгоритмі ТЛС 3600:

- конкретний вміст основних хімічних елементів в сталі (через вуглецевий еквівалент);
- швидкість деформації, яка змінюється від 3 до 50 с⁻¹ і тому суттєво впливає на величину опору деформації;
- вплив тертя та позаконтактних зовнішніх зон – через коефіцієнт напруженого стану в осередку деформації, який адаптовано до умов чистової кліті стану 3600;
- динамічне і статичне знеміцнення сталі в залежності від часу пауз між проходами;
- вплив пружних деформацій робочих валків.

З урахуванням структури системи автоматизації стана 3600 єдиним ефективним методом адаптації існуючої моделі є корекція коефіцієнтів кривих твердості в умовах конкретного режиму прокатки, при якому відомі кількість проходів, обтискання, температурні та силові параметри процесу. Такий підхід дозволяє адаптувати криві твердості, як за нашою (умовно точною) моделлю перед прокаткою першого листа партії, так і за фактично виміряними температурно-деформаційними та енергосиловими параметрами у другому та наступних проходах.

Розроблений алгоритм адаптації коефіцієнтів кривої твердості у вузлових температурних точках враховує лінійну інтерполяцію даних, передбачену існуючим алгоритмом.

Обробка даних показала, що адаптована модель дозволила підвищити точність розрахунків приблизно в 1,3 рази. Так, середньоквадратичне відхилення сили прокатки склало при застосуванні існуючої моделі 12,4 МН, а розробленої і адаптованої моделі – 9,6 МН.

УДК 669.017 :668.08.014.296.3

АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКУ ЗНОСОСТІЙКОСТІ, СТРУКТУРНОГО СТАНУ ТА ТВЕРДОСТІ ПЕРЛІТУ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ**Меркулов О. Є., д.т.н., Подольський Р. В., PhD, Сафронова О. А., Клинова О. П.****Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро**

Експлуатаційні властивості залізничних рейок, виготовлених з конструкційних сталей, в першу чергу залежать від механічних властивостей. Слід зазначити, що зносостійкість залізничних рейок в системі колесо- рейка є однією з найважливіших характеристик її працездатності. Зносом прийнято вважати зміну профілю поверхні по колу катання колеса поверхні головки рейки від сил взаємодії колеса з рейкою в процесі експлуатації. Твердість традиційно використовувалася для оцінки зносостійкості перлітних рейкових сталей. Це не означає, що висока твердість є прямою причиною високої зносостійкості. У перлітних сталях зносостійкість зростає в міру збільшення вмісту вуглецю і зменшення міжпластинчастої перлітної відстані. Перліт складається з пластин фериту і карбіду заліза що чергуються і має відстань між пластинами, яка змінюється в залежності від температури утворення в міру охолодження рейки після прокатки. У міру збільшення швидкості охолодження відстань між рейками перліту зменшується, отже, збільшується твердість, яка забезпечується в рейках з загартованою головкою. Збагачений дислокаціями шар з ущільненою структурою твердого карбіду сам по собі, ймовірно, підвищує зносостійкість.

Таким чином, в перлітних сталях зносостійкість забезпечується за рахунок високого вмісту вуглецю і малої відстані між пластинами перліту (що досягається за рахунок процесу термічного оброблення головки рейки), які обидва підвищують твердість. На підтвердження вторинного впливу твердості на знос, Хіракава і інші підвищили твердість зразків з перлітною структурою за рахунок зниження температури відпуску, але в лабораторних випробуваннях дане твердження не підтвердилось (не збільшили зносостійкість).

АНАЛІЗ МАТЕРІАЛУ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК РУХОМОГО СКЛАДУ**Вакуленко І. О.¹, д.т.н., Плітченко С. О.¹, к.т.н., Перков О. М.², к.т.н.**¹**Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**²**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро**

При виборі матеріалу для гальмівних колодок рухомого складу, окрім коефіцієнту тертя, слід враховувати виникнення градієнту температур по товщині самої колодки та ободу залізничного колеса. За умов інтенсивного гальмування, температура на поверхні кочення колеса може перебільшувати значення початку фазових перетворень в сталі. На підставі цього, в металі поблизу з поверхнею кочення колеса, починаючи від середнього інтервалу температур, збільшення ступеня пластичної деформації та неоднорідності її розподілу, буде сприяти підвищенню гетерогенності в розвитку процесів структурних перетворень металу. Випадковий характер дії визначеної кількості чинників впливу на пару гальмівна колодка – поверхня кочення залізничного колеса, практично не уможливорює передбачити характер зміни комплексу властивостей металу. Додатковим ускладненням загальної картини структурних перетворень в металі колеса, є циклічний характер зміни температури нагріву при експлуатації рухомого складу. Таким чином, при визначенні матеріалу гальмівної колодки окрім коефіцієнту тертя, слід враховувати можливі зміни властивостей металу залізничного колеса після кожного акту гальмування. Більше цього, сучасне вирішення питань підвищення питомого навантаження на колісну пару, за рахунок використання залізничних коліс після термічного зміцнення, суттєво ускладнює вибір матеріалу гальмівних колодок. Дійсно, при формуванні структури вуглецевої сталі без примусового охолодження ободу залізничного колеса, ступінь пересичення атомами вуглецю феритного прошарку перлітної колонії практично не відрізняється від фериту сталі після відпалу. З іншого боку, застосування прискореного охолодження для збільшення міцності сталі, супроводжується не тільки підвищенням дисперсності перлітної колонії але і ступеня пересичення фериту перліту на вуглець. В цьому випадку, відповідно підвищенню характеристик міцності сталі, буде зростати чутливість таких коліс до нагріву при гальмуванні. В результаті, коефіцієнт теплопровідності матеріалу (λ) колодки набуватиме вагомого значення. Так, збільшення концентрації вуглецю в цілому сприяє зниженню λ чавуну. Однак, обумовлено це скоріш за все збільшенням об'ємної частки метастабільної високо вуглецевої фази. Дійсно, пропорційно збільшенню об'ємної частки цементиту, спостерігається зниження коефіцієнту теплопровідності. З іншого боку, присутність в структурі чавуну графітових включень має якісно протилежний вплив на λ . В результаті, зміна співвідношення між кількістю графіту та цементиту в структурі чавуну, може розглядатися як чинник впливу на величину λ . Окрім дисперсності структурних складових, визначеного значення набуває їх морфологія. Після заміни графітових включень сірого ливарного чавуну на пластівці ковкого чавуну, підвищення коефіцієнту теплопровідності може досягати 20%. В порівнянні з чавуном, широкого застосування отримали композиційні матеріали, з високим рівнем коефіцієнту тертя. Чисельні спроби застосування наштовхуються на визначені труднощі. Окрім, складнішої технології виготовлення колодки, композитні матеріали мають дуже низький коефіцієнт теплопровідності. В результаті цього, виникають обмеження сезонного характеру їх використання. В порівнянні з чавуном, меншого розповсюдження отримали сплави типу бронз з додатковими фазами графіту та кераміки. Це дозволило збільшити в декілька разів коефіцієнт теплопровідності, в порівнянні з сірим чавуном. Однак, підвищена твердість такого матеріалу збільшує знос колеса по поверхні кочення, а вміст легуючих хімічних елементів, підвищує його собівартість. Наведені відомості можуть бути корисними для продовження пошуку оптимального структурного стану і хімічного складу матеріалу для гальмівних колодок рухомого складу.

АНОМАЛЬНЕ ЗБІЛЬШЕННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ОЛОВОМ СТАЛЬНОЇ ПІДКЛАДКИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

Штапенко Е. П.¹, д. ф.-м. н., Сироватко Ю. В.², к. ф.-м. н.

¹Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

²Дніпропетровська філія державної установи «Інститут охорони ґрунтів України»,
м. Дніпро

Дослідження температурної залежності крайового кута змочування краплею розплаву твердої підкладки має практичний інтерес і використовується в багатьох сферах промисловості. Наприклад, при просоченні композиційних матеріалів для забезпечення кращого змочування між структурними складовими необхідно визначення температури порога змочування системи. У деяких дослідженнях [1, 2] були відзначені випадки аномального збільшення контактного кута зі збільшенням температури систем крапля розплаву-тверда підкладка. Автори [1, 2] припускають, що збільшення крайових кутів відбувається внаслідок утворення нових хімічних з'єднань між контактуючими речовинами або внаслідок зміни структури поверхні. Цей феномен досліджувався нами у системі олов'яна крапля – підкладка зі сталі 12Х15Г9НД.

Крайовий кут змочування рідким оловом підкладки зі сталі визначали методом лежачої краплі. Для запобігання формуванню небажаних з'єднань, нагрівання проводили в атмосфері азоту. Для побудови кожної наступної точки залежності крайового кута від температури подавали і досліджували нову окрему краплю олова на підкладку. Розрахунок крайового кута змочування проводили скануючи цифрові фотографії краплі за допомогою програми TLC-manager. При дослідженні після проведення експерименту рентгенофлуоресцентним та атомно-абсорбційним аналізами на поверхні краплі олова не було виявлено атомів заліза. Виявлено незначну кількість оксидів азоту на поверхні краплі олова іон-селективним методом. Однак це не могло суттєво вплинути на залежність крайового кута від температури.

У процесі проведення експерименту було встановлено, що на початку дослідження при температурі 525 К значення крайового кута змочування складало 130°. При підвищенні температури крайовий кут змочування зменшувався і при 650 К його значення крайового кута складало 55°. Однак при подальшому підвищенні температури до 725 К значення крайового кута знов збільшувалось до 112°. Можна припустити, що збільшення контактного кута в системі олово-сталь спостерігається внаслідок зміни енергії взаємодії між атомами розплаву та підкладки. Змочування у системах рідке олово – сталева підкладка раніше досліджувалося у роботі [3]. Однак у роботі [3] феномен аномального збільшення кута не виявлено, оскільки досліджували залежність крайового кута від температури, безперервно нагріваючи систему до високих температур. Таким чином, в [3] після зменшення крайового кута змочування краплею розплаву твердої підкладки, подальшого збільшення кута при підвищенні температури не спостерігалось. У нашому дослідженні для побудови кожної точки залежності крайового кута від температури подавалася і вивчалася щоразу нова крапля олова. Тому в кожній точці залежності крайовий кут формувався заново, що не виключало його вищі значення в порівнянні зі значеннями кутів змочування попередніх крапель підкладки при нижчій температурі.

Літературні джерела

1. Reaction induced anomalous temperature dependence of equilibrium contact angle of TiZr based glass forming melt on Al₂O₃ substrate / B. Zhang et al. *Materials Science and Technology*. 2013. Vol. 29, no. 3. P. 332–336. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284712y.000000015>
2. Mettu S., Kanungo M., Law K.-Y. Anomalous Thermally Induced Pinning of a Liquid Drop on a Solid Substrate. *Langmuir*. 2013. Vol. 29, no. 34. P. 10665–10673. DOI: <https://doi.org/10.1021/la400991y>
3. Non-wetting to Wetting Transition Temperatures of Liquid Tin on Surfaces of Different Steel Samples Corresponding to their Spontaneous Deoxidation / Varanasi D. et al. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2021. Vol. 66, no. 2. P. 469-476. DOI: <https://doi.org/10.24425/amm.2021.135880>

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНОСТІ ПЕРЛІТУ НА ВИТРИВАЛІСТЬ ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Вакуленко І.О.¹, д.т.н., Перков О.М.², к.т.н.

Плітченко С.О.¹, к.т.н.

¹Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

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

За експериментальних досліджень вуглецевої сталі товщина феритного прошарку перліту набуває визначеного впливу не тільки на витривалість при втомі але і на вигляд самої діаграми циклічного навантаження. Умовний розподіл кривих на області мало - та багато циклової втоми обумовлений якісними змінами в механізмі розповсюдження пластичної деформації в структурних складових сталі. В результаті, перехід від однієї ділянки кривої циклічного навантаження до іншої, достатньо часто, супроводжується виникненням значних порушень її монотонного ходу. За зовнішнім виглядом порушень кривої навантаження, їх часто називають «точками розриву», з координатами по вісі абсцис (N_d) та ординат (σ_a), хоча в дійсності область порушення має визначений розмір. Більше цього, в залежності від структурного стану вуглецевої сталі та умов циклічного навантаження, положення вказаної ділянки на кривій може суттєво зсуватися та змінювати свої розміри і вигляд. Стосовно причин їх виникнення не має однозначного тлумачення. За різноманітними результатами досліджень, найбільш частіше, причиною вважаються порушення в розвитку процесів структурних перетворень, однорідності розподілу пластичної деформації або зміни системи ковзання дислокацій за циклічного навантаження. Існують припущення про зміну напруженого стану металевому матеріалу перед фронтом зростаючої тріщини. Вважається, що за умов відносно низького ступеня циклічного перевантаження, метал знаходиться переважно у плоско деформованому стані. Інші умови зростання тріщини відповідають ділянці мало циклової втоми (область високого ступеня циклічного перевантаження). Цьому випадку відповідає плоско напружений стан. За аналізом кривих циклічного навантаження вуглецевої сталі з перлітною структурою визначено, що зменшення дисперсності перліту, супроводжується зсувом положення перехідної ділянки у бік збільшення витривалості, з одночасним зниженням розкиду значень амплітуди циклу. Для визначення характеру накопичення дефектів кристалічної будови за цикл навантаження, в залежності від дисперсності перліту, було використане співвідношення, $\sigma_a = K(N_i)^{-m}$, де σ_a – амплітуда циклу, N_i – витривалість при втомі, K – постійна, m – показник ступеня. Після перетворення вказаного співвідношення, стало можливим оцінити швидкість зміни амплітуди циклу ($d\sigma_a/dN_i$), що є дотичною кривої циклічного навантаження за визначеного значення витривалості. Для відповідної товщини феритного прошарку перлітної колонії, вимірювання щільності накопичення дислокацій (ρ), показало існування співвідношення $d\sigma_a/dN_i \sim 1/\rho$. Його використання дозволило обґрунтувати механізм структурних перетворень за циклічного навантаження. При зниженні σ_a , пропорційно зменшується щільність рухомих дислокацій, що необхідна для підтримки умов без перервного розповсюдження деформації за цикл. Низькому ступеню приросту ρ відповідає підвищена рівномірність розташування дислокацій в структурних складових сталі. В результаті, момент виникнення осередків з немонотонним розташуванням дислокацій і перетворення їх в зародок руйнування, зсувається у бік підвищених значень витривалості при втомі. Для мало циклової області кривої, структурні зміни в металі мають якісно інший характер. Високий приріст дислокацій для забезпечення відповідного ступеня деформації за цикл, сприятиме прискоренню процесу виникнення осередку з немонотонним розташуванням дислокацій в структурі сталі. Відповідно цьому, момент утворення зародку руйнування за циклічного навантаження, буде зсуватися у бік низьких значень витривалості при втомі.

ВПЛИВ АКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩ І НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІДШИПНИКОВИХ СТАЛЕЙ

Губенко С. І.^{1,2}, д.т.н, Парусов Е. В.¹, д.т.н.

¹ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро
² Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро

Досліджено вплив типів неметалевих включень на рівень їх активності у зародженні корозійних пошкоджень та механічні властивості підшипникових сталей. Застосовували прискорені методи корозійних випробувань, що дозволяють за короткий час спричинити очевидне руйнування сталей ШХ15 та ШХ15СГ спеціально отриманих плавок, програмно забруднених різними типами неметалевих включень [1-5]. Випробування на малоциклову втому проводили на повітрі та у корозійних середовищах. Застосовували прискорений метод випробувань схильності сталей до корозійного розтріскування на установці «ІМ-12». Випробування на втомну міцність проводили на машині типу «НУ» при базі $N=3 \cdot 10^6$ циклів навантажень.

За випробуваннях на малоциклову втому N на повітрі сталей ШХ15 і ШХ15СГ спостерігається вплив типу неметалевих включень на втомні характеристики: найнижча величина N отримана для сталей, забруднених сульфідами, потім вона збільшується за наявності відповідно корунду і шпінелей, силікатів і, нарешті, карбонітриду титана. Корозійне середовище призвело до суттєвого зниження довговічності сталей за малоциклової втоми, проте тип включень суттєво впливає на цей показник. Визначено коефіцієнти впливу середовища β_s , що становлять відношення довговічності сталі на повітрі до аналогічного показника у корозійному середовищі. Показано, що більше величина цього коефіцієнта, то сильніше знижують неметалеві включення малоциклову довговічність. Встановлено спадний ряд, що показує ступінь шкідливого впливу включень на зародження та розвиток корозійних пошкоджень: сульфідів (Fe, Mn)S, FeS-MnS → корунд і шпінелі Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, $(Mn, Mg)O \cdot Cr_2O_3$ → силікати SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$ → карбонітриди титану TiCN.

Швидкісні випробування для визначення схильності до корозійного розтріскування показали, що механічні властивості сталей залежали від типу неметалевих включень за випробуваннями на повітрі. Випробування у корозійних середовищах сприяли перерозподілу відносного впливу типу включення на механічні властивості підшипникових сталей. Границя міцності сталі σ_B , опір відриву S_k , характеристики пластичності δ і ψ найбільш значно зменшилися для плавки з сульфідами, для інших типів включень це зменшення було менш значним.

Показано та обґрунтовано найшкідливішу роль сульфідів у зниженні довговічності та механічних властивостей підшипникових сталей в активних середовищах.

Літературні джерела

1. Gubenko S. I., Sychkov A. B., Parusov E. V., Denisenko A. I., Zavalishchin A. N. Corrosive damage close to nonmetallic inclusions in bearing steels. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. № 3. pp. 197–201. DOI: [10.3103/S0967091218030063](https://doi.org/10.3103/S0967091218030063).
2. Gubenko S. I. Influence of nonmetallic inclusions and corrosion products on the wear resistance of railroad wheels. *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. № 6. pp. 427–431. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091219060068>.
3. Gubenko S. I., Pinchuk S. I., Belaya E. V. Investigation of non-metallic inclusion effect on corrosion behavior of wheel steel. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. № 3(2). pp. 63–66.
4. Pinchuk S., Gubenko S., Belaya E. Correlation between electrochemical corrosion and structural state of steel by simulation of operation conditions of railway wheels. *Chemistry & Chemical Technology*. Publishing House of Lviv Polytechnic National University. 2010. № 4(2). – pp. 151–158.
5. Gubenko S., Pinchuk S., Proidak Y., Belaja E., Kozlowsky A., Shramko A. Some peculiarities of corrosion of wheel steel. *Transport Problems*. 2009. Vol. 4. № 3(2). pp. 5–14.

ВПЛИВ ВМІСТУ ВУГЛЕЦЮ В СТАЛЯХ БЕЙНІТНОГО КЛАСУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІСЛЯ НОРМАЛІЗАЦІЇ ТА ВІДПУСКУ

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

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

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

З літературного аналізу було встановлено, що бейнітні сталі не можуть утворювати зношений поверхневий шар, збагачений карбідом. Крім того, оскільки деформаційне зміцнення посилюється присутністю другої фази (такої як карбід), можна очікувати, що низьковуглецеві бейнітні сталі будуть деформуватися менше, ніж перлітні сталі. Наслідком цього є те, що, хоча бейнітна сталь може мати початкову більш високу об'ємну твердість, ніж перлітна сталь, бейнітно загартована зношена поверхня може бути м'якше, ніж перлітна. Такий ефект був помічений в лабораторних випробуваннях на зношування.

Після нормалізації та відпуску встановлено, що відхилення середніх значень тимчасового опору після відпуску чотирьох дослідних сталей з 0,37...0,47 %С (крок зміни вмісту вуглецю 0,025%) має зменшення значень на -15,46, -9,55, -7,94 та -2,52% відповідно, в порівнянні зі середніми значеннями після нормалізації. Границя плинності дослідних сталей 1...4, в свою чергу, має значення -16,31, +14,62, -12,42 та +29,75% відповідно, в порівнянні зі значеннями дослідних сталей після нормалізації. Відносно подовження дослідних сталей 1...4 має підвищення значень на +15,12, +1,68, +24,91 та +22,18% відповідно, в порівнянні зі середніми значеннями дослідних сталей після нормалізації. Відносно звуження дослідних сталей 1...4 має значення на +28,73, +18,72, -32,74 та +32,15% відповідно, в порівнянні з дослідними сталями після нормалізації.

ВПЛИВ ЛІКВАЦІЇ НА УТВОРЕННЯ ГРАФІТУ У ЧАВУНАХ

Борисенко А. Ю., д.т.н., Левченко Г. В., д.т.н.

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

Виникнення хімічної, фазової та різного рівня структурної гетерогенності в конденсованих середовищах – актуальна наукова проблема теорії фазових та структурних перетворень при кристалізації та у твердому стані металевих сплавів, вирішення якої необхідне для спрямованого формування їх властивостей. Різного роду гетерогенність вихідних фаз металевих сплавів при наступних перетвореннях передвизначає закономірне утворення кінцевої мікроструктури з властивою їй гетерогенністю хімічного складу, видом та розподілом дефектів кристалічної будови, внутрішніх напружень та інших складових внутрішньої будови та стану речовин, що впливають на їх властивості. Очевидно, що в ливарних сплавах, серед яких сірі чавуни займають важливе місце, спадковий вплив вихідної фазової гетерогенності на їхню кінцеву структуру та властивості має бути найбільш вираженим.

Представлені результати аналітичних досліджень зв'язку хімічної неоднорідності сірих чавунів із структурою графіту.

Для визначення значень хімічної неоднорідності що обумовлена ліквідацією при кристалізації металевих сплавів, необхідно використовувати не розрахункові значення коефіцієнтів ліквідації на підставі термодинамічних розрахунків чи аналізу діаграм стану, а експериментальні дані, отримані металографічними методами аналізу. Ступінь та напрямок ліквідації залежать від складу сплаву та умов кристалізації. Найбільший вплив на ступінь ліквідації має вміст вуглецю, збільшення якого призводить до зростання ліквідації більшості елементів.

Кристалізація високовуглецевих чавунів (більше 2,8–3,0% C) призводить до зворотної ліквідації з концентрацією кремнію в тих ділянках аустеніту, які раніше виділяються з рідини, тобто в дендритах первинного аустеніту та в центральних ділянках евтектичних колоній. У маловуглецевих (1,5–2,0% C) кремнійвмісних чавунах ліквідація кремнію пряма: у серцевині дендритних гілок кремнію менше, ніж у матриці графітної евтектики та на периферії колоній. У маловуглецевих чавунах ліквідація кремнію в евтектичних колоніях порівняно невелика і виявляється складніше, ніж у високовуглецевих чавунах.

Утворення графіту відбувається у ліквідаційних ділянках, збагачених кремнієм та вуглецем. Причини графітізуючої дії в ліквідаційних ділянках одних хімічних елементів та відсутність такого ефекту в інших хімічних елементів залишаються не з'ясованими та вимагають подальших досліджень.

Найбільш поширені у складі сірих чавунів легуючі елементи: Ni, Cr, Mo, Cu, Al не суттєво впливають на будову графіту та евтектичних колоній. Основне вплив цих елементів полягає в регулюванні структури металевої матриці в твердому стані. Mn, Cr, Mo та As схильні до прямої ліквідації, тобто вони збагачують периферійні ділянки дендритних гілок та евтектичних колоній. Ni, Cu і Al подібно до кремнію схильні до зворотної ліквідації з концентрацією в середині гілок і евтектичних колоній. Пояснення причин відсутності дії цих елементів, за силою порівнянного з дією кремнію та сірки, на утворення графіту при існуванні принципово однакових закономірностей їх ліквідації відсутнє.

Впливаючи на фазово-концентраційну неоднорідність сірих чавунів, що кристалізуються, через спрямовану зміну хімічного складу, обробку розплаву та умови його кристалізації можна керувати структурою графіту і металевої матриці з метою досягнення необхідних властивостей виливків.

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФОРМУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ГРАНИЦЬ В СТРУКТУРІ УЛЬТРАНИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Ковзель М.А.¹ к.т.н., Котова Т.В.², к.т.н.

¹Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз
Міністерства Юстиції України, м. Дніпро

²Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Актуальною проблемою в дійсний час є покращення якісних характеристик та здатності до глибокої витяжки тонколистового прокату з ультранизьковуглецевих сталей, який використовується для виготовлення методом холодної штамповки деталей конструкцій в автомобіле- та машинобудуванні [1]. Перспективним є метод підвищення комплексу властивостей металопродукції з полікристалічних матеріалів – принцип зернограничного конструювання. Вказаний метод полягає в розробленні температурно-деформаційних режимів, які сприяють формуванню структури з максимально можливою кількістю спеціальних низькоенергетичних границь зерен типу $\Sigma 3^n$, та базується на концепції решіток співпадаючих вузлів [2].

Представляє науковий інтерес визначення взаємозв'язку між режимами температурно-деформаційних обробок, питомою поверхнею спеціальних границь зерен сімейства $\Sigma 3^n$ та підвищенням властивостей низьколегованих і високолегованих сталей. Вперше встановлено наявність спеціальних границь зерен у фериті з об'ємноцентрованою кубічною кристалічною решіткою низьколегованих феритно-перлітних сталей [3].

В даній роботі за допомогою EBSD-аналізу визначено вміст спеціальних границь $\Sigma 3 60^\circ \langle 111 \rangle$ в структурі сталі 01ЮТ, деформованої в аустенітній та феритній областях температур з охолодженням на повітрі. Встановлено, що вміст спеціальних границь $\Sigma 3 60^\circ \langle 111 \rangle$ в структурі сталі 01ЮТ досягає максимального значення 13,2% після прокатки в аустенітній області із ступенем деформації 32,3%. Збільшення вмісту спеціальних границь $\Sigma 3 60^\circ \langle 111 \rangle$ в структурі сталі, обробленої за один прохід при температурі 970-980°C, в зрівнянні з деформацією за два проходи та закінченням прокатки в феритній області при температурі 730-740°C (ступінь деформації 62,9%), сприяє підвищенню здатності до глибокої витяжки гарячекатаної сталі 01ЮТ. Визначення раціональних температурно-деформаційних режимів дозволить керувати властивостями металопрокату шляхом підвищення вмісту спеціальних границь в структурі ультранизьковуглецевої сталі для отримання якісного тонкого листа, здатного до глибокої витяжки.

Літературні джерела

1. Куцова В.З., Камкін В.Ю., Кнапинський М.Г., Пройдак С.В., Варіцев А.О. Технологія виплавки чистої сталі та особливості позапічної обробки. Теорія і практика металургії, 2019. №3. С. 5-13. ISSN 1028-2335.
2. Opryszko L.V., Suchomlin G.D., Stradomsky Z., Deyneko L.N. The influence of deformation scheme on grain boundaries structure of carbon steel boiler tubes. Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 2014. Т. 81. № 5. S. 308-313.
3. Большаков В.І., Сухомлин Г.Д., Дергач Т.О. Методичні основи дослідження зернограничної структури у сталях з α -, γ - і $\alpha+\gamma$ фазовим станом. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2017. № 3. С. 10-21. ISSN 2312-2676.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ГАРТУВАННЯ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Луценко В. А., д.т.н., Голубенко Т. М., к.т.н., Луценко О. В., к.т.н.

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

Основні механічні властивості металовироби з легованої сталі набувають після термічного оброблення. Порушення температурно-часового режиму обробки та надмірне нагрівання металовиробів часто призводить до отримання продукції зі зміною розміру початкових аустенітних зерен. В подальшому зміна розміру аустенітних зерен може відобразитись на мартенситній структурі, яку отримують при кінцевій термічній обробці. Зміна морфології мартенситу впливає на зниження механічних властивостей: ударної в'язкості, границі плинності, твердості тощо. Тому були проведені дослідження впливу збільшення температури аустенізації на мартенситну структуру сталі 31CrMoV9. У нормалізованому стані структура даної сталі складається з бейніту та мартенситу.

Для дослідної сталі характерним є те, що зі збільшенням температури з 850°C до 1050°C при нормалізації зростає кількість мартенситу в структурі з ~10 до ~50% відповідно. В основному відбувається збільшення загальної площі, зайнятої мартенситом, без зміни його морфології. Після нагрівання до температур 850°C, 950°C і 1050°C, гартування та відпуску, структура сталі 31CrMoV9 складається з відпущеного мартенситу і залишкового аустеніту.

В міру збільшення температури вихідний середній діаметр зерен аустеніту збільшується, а також збільшуються розміри блоків і пакетів у мартенситі. Розмір голок мартенситу після загартування від температури 850°C має значення в середньому 4 мкм, від 950°C – 10 мкм, та для гартування від 1050°C – 18 мкм. Розмір аустенітного зерна впливає на мартенситне перетворення за рахунок зміни щільності зародків і стабілізації аустенітної фази в міру розвитку перетворення. З підвищенням температури гартування також спостерігається збільшення мікротвердості ліквіційних ділянок, при цьому загальна середня мікротвердість сталі знижується з 4060 МПа при нагріву 850°C, 3960 МПа – при 950°C, до 3894 МПа для 1050°C. Така зміна мікротвердості, ймовірно, пов'язана зі збільшенням кількості залишкового аустеніту, бо підвищення температури загартування підвищує кількість та ступінь метастабільності залишкового аустеніту, збагачення його вуглецем і легуючими елементами, що обумовлює зниження температур початку мартенситного перетворення і, як наслідок, збільшення кількості залишкового аустеніту. При гартуванні від 1050°C спостерігається найширший інтервал між мінімальними та максимальними значеннями мікротвердості, що в подальшому може негативно відобразитися на властивостях сталі 31CrMoV9. Тому для дослідної сталі рекомендовано призначати температуру загартування 850°C, що дасть змогу додатково економити ресурси.

ВПЛИВ ТОНКОПЛІВКОВОЇ КОРОЗІЇ НА КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНУ ПОВЕДІНКУ ТРУБНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ В УМОВАХ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

Ниркова Л.І., д.т.н., Осадчук С.О., к.т.н., Гончаренко Л.В., Браточкін О.В.

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

Одним з найвагоміших чинників корозійного розтріскування трубопроводів у вологому ґрунті є корозія в тонких шарах електроліту під відшарованим захисним покритвом. Перебіг цих процесів може стати причиною аварій на магістральних газопроводах.

Проведено електрохімічні та корозійно-механічні дослідження низьколегованої трубної сталі 10Г2ФБ в умовах, що моделюють тонкоплівкову корозію у середовищах з рН близьким до нейтрального (розчин NS4 складу: 0,122 г/л KCl + 0,483 г/л NaHCO₃ + 0,181 г/л CaCl₂ + 0,131 г/л MgSO₄, рН 8,3). Дослідження корозійного розтріскування проводили за періодичного змочування розчином NS4 (50 хв у розчині та 10 хв у повітрі) та у ґрунтовому середовищі (піску, змоченому NS4 до вологості 20 %) за мінімального -0,750 В та максимального -1,050 В захисних потенціалів, що нормуються ДСТУ 4219.

За результатами електрохімічних досліджень встановлено: потенціал корозії сталі у розчині NS4 становить -0,780 мВ, у ґрунтовому середовищі -0,744 В; анодні нахили дорівнюють 0,036 та 0,029 В, граничний дифузійний струм відновлення кисню 0,128 та 0,071 А/м², відповідно. Потенціал відновлення водню становить -0,98 В для розчину NS4 та -1,23 В для ґрунтового середовища. Електрохімічні дані задовільно корелюють із результатами визначення швидкості корозії, яка у ґрунтовому середовищі нижча, ніж у розчині – 0,029 та 0,036 мм/рік, відповідно. Така різниця обумовлена утрудненням доставляння кисню до поверхні, що кородує, та відведенням продуктів корозії.

Результати корозійно-механічних випробувань з малою швидкістю деформації 10⁻⁶ с⁻¹ за мінімального захисного потенціалу -0,750 В у NS4 та ґрунтовому середовищі продемонстрували переважно в'язке руйнування зразків з відмінностями схильності до корозійного розтріскування, оціненої за коефіцієнтом K_S (відношення відносного звуження зразків у повітрі ψ_n до відносного звуження у розчині ψ_p) дорівнювали 1,03 та 1,0, відповідно. Фрактографія рельєфу вказувала на в'язкий характер руйнування як у NS4, так і ґрунтовому середовищі. Структура складових поверхні зламу утворилася за рахунок об'єднання дрібних пор у фрагменті й деформації зсуву у пластичній області та мало відрізнялася від зламу зразка, зруйнованого на повітрі.

Руйнування у NS4 за максимального захисного потенціалу -1,050 В мало переважно крихкий характер. Відмічено зростання K_S до 1,15. У ґрунтовому середовищі виявлено меншу пластичну деформацію зразка, ніж за мінімального захисного, та зростання K_S до 1,24. Фрактографічний аналіз зламу у NS4 показав змішаний характер руйнування: поряд з дрібними ямками виявлені елементи крихкого руйнування – фасетки сколу внутрішньозеренного руйнування (максимального діаметра приблизно 30 мкм), глибокі ямки (діаметром приблизно 20 мкм) та дрібніші ямки від міжзеренного руйнування на дні яких проявляється карбідна фаза. Частка ямкового в'язкого руйнування значно менша у порівнянні з крихким руйнуванням. У ґрунтовому середовищі на поверхні руйнування відзначено зміну стану металу в окремих локальних зонах діаметром приблизно 110 мкм, які крупніші ніж ті, що утворилися на поверхні руйнування зразка під час випробувань у розчині NS4. Зроблено припущення, що це є наслідком вибіркового проникнення водню у метал.

Таким чином механізм руйнування від в'язкого за мінімального захисного потенціалу (-0,750 В) змінюється за максимального захисного потенціалу (-1,050 В) в більшості, на крихкий. Виявлено підвищення схильності до корозійного розтріскування в нормованому діапазоні захисних потенціалів в умовах тонкоплівкової корозії, оціненої за коефіцієнтом K_S, від 1,03 та 1,00 до 1,15 та 1,24 відповідно у NS4 та ґрунтовому середовищі.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОГО РОЗТРІСКУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ДЛЯ ГАЗОНАФТОПРОВІДНИХ ТРУБ В НЕЙТРАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗА КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

Ниркова Л.І.д.т.н., Лісовський Ю.І., Файнберг Л.Й., Гончаренко Л.В.

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

Досліджено корозійне розтріскування зварних з'єднань з низьколегованої трубної сталі 10Г2ФБ категорії міцності Х70. Односторонні контрольні шви зварювали на апараті А 909 М по V-образній розробці кромки розміром $90^\circ \times 4$ мм. Зварювання виконували під флюсом ОК 10-74 дротами Св-08Г1НМА та S3Mo-TiB на режимі: $I=850-890$ А; $U=38$ В; $V_{зв}=25$ м/год; $V_{пл}=110$ м/год (швидкість подачі зварювального дроту). Завдяки застосуванню зазначених дротів отримано зварні з'єднання з підвищеними в'язкими властивостями: ударна в'язкість металу шва за температури -20°C становила 199 та 150 Дж,см², що вище, ніж для основного металу (128,3 Дж/см²).

Мікроструктура основного металу є сумішшю фериту і перліту з ознаками деформації, розмір феритного зерна становить від 6 мкм до 11 мкм згідно з ДСТУ 8972. В структурі шва, виконаного дротом Св-08Г1НМА, є суміш голчастого фериту (65-70%), дрібного внутрішньозеренного полігонального фериту розміром до 12 мкм, міжзеренного полігонального фериту та бейніти утворення. Відмінною ознакою шва, виконаного дротом S3MoTiB, є більш тонкі міжзеренні прошарки полігонального фериту та більша частка голчастого фериту – приблизно 80 %.

Електрохімічні та корозійно-механічні дослідження проводили у модельному ґрунтовому електроліті NS4 (склад у г/л: 0,122 KCl + 0,483 NaHCO₃ + 0,181 CaCl₂ + 0,131 MgSO₄). Стаціонарні значення потенціалів корозії становили: -0,699 В для сталі 10Г2ФБ та -0,716 та -0,628 В для металу швів, виконаних дротами Св-08Г1НМА та S3MoTiB. Тобто метал шва S3MoTiB менш корозійно-активний ніж основний метал, шва Св-08Г1НМА – більш корозійно-активний, але різниця потенціалів сталі 10Г2ФБ та шва Св-08Г1НМА становить 0,017, що не перевищує допустиму нормативними документами різницю потенціалів 0,05 В. Нахили анодних кривих дорівнювали 0,052 В для сталі 10Г2ФБ та 0,050 та 0,115 В для зварних швів.

Корозійно-механічні випробування зварного з'єднання проведено за мінімального -0,75 В та максимального -1,05 В захисних потенціалів (відносно хлоридсрібного електроду порівняння). Схильність до корозійного розтріскування сталі та зварного з'єднання оцінювали за коефіцієнтом K_s (відношення відносного звуження зразків у повітрі ψ_n до відносного звуження у розчині ψ_p). З аналізу діаграм руйнування встановили, що розрив зразків зварних з'єднань у повітрі відбувається за меншого відносного подовження порівняно з основним металом. В корозивному середовищі за катодної поляризації спостерігається прискорення процесу руйнування, як основного металу, так і зварного з'єднання, причому скорочується тривалість цього процесу, а розрив відбувається за меншого відносного подовження.

Як у повітрі, так і у корозивному середовищі, розрив зварних з'єднань відбувається по основному металу, не торкаючись зварного шва. Лінія руйнування зразків зварного з'єднання проходить на відстані 5-5,8 мм від лінії сплавлення, що цілком закономірно, оскільки шов має більш високу міцність у порівнянні з основним металом: твердість основного металу становить (190-200) HV₅, металу шва (210-225) HV₅.

Таким чином, при зростанні захисного потенціалу від -0,750 В до -1,050 В виявлені відмінності корозійно-механічних властивостей досліджених зварних з'єднань: схильність до корозійного розтріскування за катодного захисту, оцінена за коефіцієнтом K_s , для зварного з'єднання, виконаного дротом Св-08Г1НМА зростає інтенсивніше (від 1,1 до 1,35), ніж для зварного з'єднання, виконаного дротом S3MoTiB (від 1,17 до 1,28).

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ МІКРОСТРУКТУРИ СТАЛІ 316 L, ВИГОТОВЛЕНОЇ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ

Аджамський С. В.^{1,2}, PhD, Кононенко Г. А.^{1,3}, д. т. н.,
Подольський Р. В.^{1,3}, PhD, Сафронова О. А.³, Шпак О. А.³

¹ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро,
²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро,
³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Корозійностійкі сплави та сталі знаходять широке застосування у медичній, хімічній, харчовій галузі, автомобілебудуванні, а також в аерокосмічній техніці. Сучасна технологія селективного лазерного плавлення (СЛП-технологія) надає додаткові можливості щодо реалізації складної геометрії та проектування металовиробів. Відомо, що спосіб виробництва суттєво впливає на мікроструктуру, яка визначає комплекс механічних та експлуатаційних властивостей. Метою роботи було дослідити особливості структурного стану неіржавкої сталі 316 L, що формується при виготовленні за СЛП-технологією.

З мікроструктурних досліджень встановлено, що сталь складається переважно з аустеніту, в поперечному та повздовжньому перерізі середня мікротвердість – 268 кг/мм², встановлено наявність невеликої кількості пор розміром 1 – 7 мкм та гарячих мікротріщин. При дослідженні мікроструктури після травлення за допомогою реактиву Мерблі було виявлено границі первинних аустенітних зерен та встановлено направленість формування первинного зерна аустеніту у вигляді дугоподібної структури ванни розплаву, що характерна повторювальному гаусівському розподілу енергії лазера при проплавленні. Слід зазначити, що при травленні даним реактивом не було виявлено двійників первинного аустенітного зерна.

При дослідженні мікроструктури зразків після травлення реактивом Каллінга було виявлено нетипову різнобічно орієнтовану внутрішньозерену субструктуру, яка переважно знаходиться в області простору між верхівками треків наступного шару в ділянці перекриття треків попереднього шару. Мікротвердість в області зазначеної вище структури вздовж напрямку побудови складає 239...251 кг/мм², а при контролі в поперечному перерізі даної ділянки твердість складала 286...317 кг/мм², що свідчить про анізотропію властивостей.

При застосуванні диференціального інтерференційно-контрастного освітлення та призми Номарського було встановлено наявність видовжених стовбчастих зерен, що розповсюджуються через границі ванни розплаву, та мають епітаксіальний зріст у напрямку максимального температурного градієнту. Встановлено, що кути направлення даних стовбчастих зерен - 15° до напрямку побудови. Ймовірно це пов'язано з поворотом наступного шару побудови відносно попереднього. За довжиною ці зерна мають розмір 140±мкм, що вказує на проплавлення близько 3 шарів нанесеного порошку.

Таким чином при аналізі мікроструктури встановлено, що сталь 316L, виготовлена за ВЛП-технологією, має дугоподібну аустенітну структуру, що характерна при проплавленні за нормальним розподілом енергії лазера.

ЛОКАЛІЗАЦІЯ ФОРМУВАННЯ ЗЕРЕННОЇ СТРУКТУРИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ЗА ІНТЕНСИВНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Губенко С. І., д. т. н.

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро**

Інтенсивна пластична деформація є одним із перспективних методів отримання ультрадрібнозернистої структури металевих матеріалів, що дає змогу отримати високоміцний стан, а також унікальні функціональні властивості цих матеріалів без зміни хімічного складу [1]. Досліджено локальні процеси структуроутворення, що відбуваються в низьковуглецевих сталях поблизу неметалевих включень за інтенсивної пластичної деформації методом рівноканального кутового пресування. Зразки сталей 08Ю, 08Х18Н10Т, 09Г2С розмірами $\varnothing 20 \times 80$ мм піддавали пластичному деформуванню методом РКУП за чотири проходи (один прохід з кутом перетину каналів 90° і три проходи з кутом 120°), що відповідав істинній деформації 3,2 [2, 3]. Структурний аналіз проводили за допомогою оптичного мікроскопа Olympus PME 3, а також електронних мікроскопів JEM 100СХ і JXA-50F; нанотвердість сталеві матриці вимірювали на установці Nano Indenter II при навантаженні 10 мН.

Встановлено, що в сталевій матриці, поблизу включень та на міжфазних границях включення-матриця змінюється характер напруженого та деформованого станів, збільшення деформації визначається кутом повороту включення за його рухом в пластичній ділянці. Різні варіанти просторового розвитку деформації реалізуються шляхом зміни положення зсувних площин, характер якого залежить від ступеня пластичності включення. Поблизу включень формуються зони локалізованої деформації, що містять утруднені викривлені фрагментовані смуги зсуву, висячі субграниці, мікродвійники та вихорові утворення за рахунок ротаційної локалізації та утворення дискретних розорієнтувань. Мезосмуги деформації поблизу включень є двофазними, в окремих зонах мезосмуг розвивається, так звана, холодна динамічна рекристалізація. У досліджених сталях структуроутворення за інтенсивної пластичної деформації пов'язане з утворенням орієнтованих структурних елементів, що мають розміри 100...260 нм і розділені великокутовими границями, для яких характерна наявність дисперсних викривлених мезосмуг деформації, а в сталі 08Х18Н10Т – ще й мартенситні пластини. Зі збільшенням числа проходів відбувалося дроблення мезосмуг деформації, що призводило до значного дроблення зерен. Поблизу включень розміри зерен значно менше, ніж далеко від них, і становлять 75...100 нм. Значення нанотвердості сталеві матриці поблизу включень були на 25...40 % вище аналогічних значень далеко від включень. Поблизу пластичних включень сульфідів і силікатів значення нанотвердості нижче, ніж поблизу оксидів і карбонітридів титану, що не деформуються, і це пов'язано з певною деформаційною релаксацією напружень в системі пластичне включення-матриця. У випадках локалізації динамічної холодної рекристалізації поблизу включень нанотвердість сталеві матриці знижувалася приблизно на 10 %.

Вплив неметалевих включень на локальне подрібнення мікроструктури сталі є важливим ефектом за інтенсивної пластичної деформації, що дозволяє отримати додаткове наноструктурне зміцнення поблизу включень при загальному подрібненні зерен до субмікрокристалічного стану.

Літературні джерела

1. Valiev R. Z., Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Bulk Nanostructured Materials : Fundamentals and Applications : John Wiley & Sons, Inc. 2014. 456 p.
2. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали : монография, Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
3. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации : Germany-Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT academic publishing. 2020. 341 с.

ОСОБЛИВОСТІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ АТЕРМІЧНОГО МАРТЕНСИТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В СТАЛІ 30ХГСА

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

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

Проведено порівняльний аналіз кінетики атермічного мартенситного перетворення у низьколегованій конструкційній сталі 30ХГСА дилатометричним і розрахунковими методами з використанням моделі Койстінена-Марбургера [1] і за власною авторською методикою [2]. Встановлено, що на початковому етапі зсувного перетворення модель Койстінена-Марбургера достатньо добре узгоджується з експериментальними (дилатометричними) даними, але при подальшому зниженні температури дає суттєву похибку у результатах розрахунків утвореної об'ємної частки мартенситу. У момент фактичного завершення мартенситного перетворення модель Койстінена-Марбургера визначає наявність в структурі значної кількості залишкового аустеніту (~ 12 % об.), що свідчить про певну її недосконалість для описання кінетики атермічного перетворення у досліджуваній сталі.

Авторська методика, запропонована у роботі [2], враховує не тільки температуру початку, але й температуру завершення зсувного перетворення аустеніту, що дозволяє отримати набагато кращий кореляційний зв'язок з дилатометричними даними сталі 30ХГСА у порівнянні з моделлю Койстінена-Марбургера. Одне із запропонованих експоненційних рівнянь можна вважати універсальним з точки зору загального аналізу кінетики мартенситного перетворення у дослідній сталі, а інше рівняння слід використовувати у випадках, коли пріоритетним є точне визначення співвідношення фаз (аустеніт/мартенсит) на кінцевому етапі атермічного перетворення.

Встановлені особливості слід враховувати під час вдосконалення існуючих або проектування нових режимів термічного оброблення, що включають перерване загартування, наприклад, сталей з TRIP-ефектом або двофазних сталей, для запобігання отримання помилкового прогнозного визначення фазового складу і, як наслідок, невідповідності механічних властивостей металу цільовим показникам.

Літературні джерела

1. Koistinen D. P., Marburger R. E. A general equation prescribing the extent of the austenitemartensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. *Acta Metallurgica*. 1959. Vol. 7. P. 59–60.
2. Bobyr S. V., Parusov E. V., Levchenko G. V., Borisenko A. Yu., Chuiko I. M. Shear transformation of austenite in steels considering stresses' effects. *Progress in Physics of Metals*. 2022. Vol. 23. No. 3. P. 379–410. DOI: 10.15407/ufm.23.03.379

ПЕРСПЕКТИВНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

Кононенко Г. А.¹, д.т.н., Кімстач Т. В.^{1,2}, к.т.н., Подольський Р. В.¹ к.т.н., Сафронова О. А.¹

¹ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро,
²Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Листовий прокат є одним з основних видів продукції чорної металургії, що споживається у великих обсягах усіма галузями промисловості. З постійним розвитком виробництва вимоги до комплексу механічних властивостей та живучості листового прокату постійно зростають.

Одним із перспективних напрямків отримання високого комплексу міцності та в'язкості конструкційних сталей для виробництва прокату є розробка економнолегованих сталей зі структурою нижнього безкарбідного бейніту (НБКБ), який являє собою поєднання маловуглецевого бейнітного фериту і високовуглецевого залишкового аустеніту [1, 2]. Умови утворення НБКБ, будова α -фази та морфологія залишкового аустеніту безкарбідного бейніту залежать від вмісту вуглецю, ступеня легованості сталі та температури перетворення [3]. Структура НБКБ забезпечує унікальне поєднання міцності, в'язкості та тріщиностійкості [4, 5].

Останнім часом активно ведуться роботи з вивчення формування структури НБКБ у заготовках досить великого перерізу – до 100 мм при безперервному охолодженні [6]. Встановлено, що необхідними умовами формування структури НБКБ при безперервному уповільненому охолодженні заготовок та деталей великого перерізу є:

– висока стійкість переохолодженого аустеніту в області перлітного та бейнітного перетворення, при цьому стійкість у бейнітній області має бути меншою, ніж у перлітній;

– температура початку бейнітного перетворення не повинна перевищувати 400°C, щоб унеможливити появу верхнього бейніту;

– додаткове легування кремнієм (алюмінієм), що сприяє протіканню бейнітного перетворення за безкарбідною схемою.

Таким чином, проблема удосконалення хімічного складу та отримання певного структурного стану економнолегованих сталей, які використовуються для виготовлення високоміцного листового прокату з метою підвищення його механічних і службових характеристик є надзвичайно актуальною для сучасної металургії.

Літературні джерела

1. Wojarski Z., T. Bold. Structure and properties of carbidefree-bainite. *Acta Metallurgica*. 1974. Vol. 10, no. 22. P. 1233–1234.
2. Hell J.C., Dehmas M., Allain S., Prado J.M. Microstructure-properties relationships in carbide-free bainitic steels. *ISIJ International*. 2011. Vol. 51, no. 10. P. 1724–1732.
3. Fransis B. Increasing the fracture toughness of a maraging steel type alloy. *Metallurgical and Materials Transactions*. 1976. Vol. 3, no. 7A. P. 465–468.
4. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels. London : The Institute of Materials, 2001. 460 p.
5. Garcia-Mateo C., Sourmail T., Caballero F.G., Smanio V., Kuntz M., Ziegler C. Nanostructured steel industrialisation: plausible reality. *Mater. Sci. Technol.* 2014. Vol. 9, no. 30. P. 1071–1078
6. Goulas C., Mecozzi M.G., Sietsma J. Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2016. No. 47A. P. 3077–3087.

ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ ТЕРМООБРОБКАМИ З НАГРІВОМ У МІЖКРИТИЧНИЙ ІНТЕРВАЛ ТЕМПЕРАТУР (МКІТ)

Бурова Д. В., к.т.н.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

В роботі досліджено вплив на структуру та механічні властивості сталей 20ГЛ, 20ГФЛ, 14Г2 різних режимів термообробок з нагріванням у МКІТ, які зазвичай для них не застосовуються. Встановлено, що застосування нормалізації з нагріванням у міжкритичний інтервал температур у порівнянні зі звичайною нормалізацією дозволяє отримати більш сприятливий рівень властивостей. У всіх досліджуваних сталях спостерігається підвищення як міцності, і пластичних властивостей. Найбільш істотно збільшуються пластичність та ударна в'язкість. Крім того, проведення нормалізації з нагріванням у МКІТ дозволяє не тільки отримати більш високий комплекс механічних властивостей, а й знизити витрати на виробничий процес. Для сталі 20ГЛ додатково були проведені нормалізація з нагріванням у МКІТ із попередньою та подальшою аустенітизацією. Короткочасна аустенітизація після витримки в МКІТ виключає вирівнювання складу аустеніту та забезпечує його дрібнозернистість. Роль попередньої аустенітизації перед витримкою в МКІТ пояснюється отриманням дрібнозернистої структури, що полегшує перерозподіл елементів у МКІТ. Цей варіант простіше, ніж робити короткочасну аустенітизацію після витримки в МКІТ, оскільки його можна здійснити в одній печі. Після проведення цих режимів обробки був отриманий високий рівень пластичності та ударної в'язкості порівняно з таким після звичайної нормалізації при збереженні характеристик міцності на необхідному для цієї сталі рівні. Гартування з нагріванням у МКІТ і низька відпустка дозволяють отримати рівень властивостей міцності близький до низьковідпущеного стану (гартування з нагріванням вище A_{c3}) при вищій пластичності. При цьому температура нагрівання під гартування значно нижча. Оптимальним часом витримки в МКІТ є 60 хв. Крім того, порівняно з поліпшенням, властивості міцності після такої термічної обробки вище, а пластичність і ударна в'язкість залишаються на тому ж рівні, а в деяких випадках, навіть вище. Застосування гарту з нагріванням у МКІТ та високої відпустки призвело до підвищення всього комплексу властивостей для сталей 20ГЛ, 20ГФЛ та 14Г2 порівняно з поліпшенням.

Застосування ізотермічного гарту з нагріванням в МКІТ порівняно з поліпшенням дозволяє отримати в досліджуваних сталях вищу міцність, при задовільній пластичності і ударної в'язкості. Оптимальним часом витримки в інтервалі бейнітного перетворення є 60 хв. Для сталі 20ГЛ був проведений і показав високий рівень властивостей режим термообробки, що полягає в ізотермічному гартуванні з витримкою МКІТ і попередньою аустенітизацією. Міцність та ударна в'язкість значно перевершують ці характеристики після покращення. Деяко збільшуються і пластичні характеристики.

Таким чином, застосування гартування та нормалізації з нагріванням у МКІТ, які раніше не використовувалися для досліджуваних сталей, дозволило отримати більш високий рівень механічних властивостей порівняно з властивостями після типових обробок, але при цьому температура нагріву більш ніж на 100 °С нижче, ніж використовується зазвичай. Це дозволяє економити енергоносії у виробництві. Крім того, охолодним середовищем при проведенні такого роду термообробок є повітря або вода, що спрощує та підвищує екологічність виробництва. Враховуючи позитивні результати проведених досліджень, а також вплив масштабного фактора, передбачається в умовах виробництва відпрацювати нові режими термічної обробки з нагріванням у МКІТ, а саме: нормалізацію з нагріванням у МКІТ, нормалізацію з нагріванням у МКІТ з попередньою аустенітизацією, гартування з нагрівом у МКІТ та висока відпустка, ізотермічне гартування з витримкою в

МКІТ, а також ізотермічне гартування з витримкою в МКІТ з попередньою аустенитизацією.

В роботі досліджено вплив нагріву в міжкритичний інтервал температур, гартування з нього з наступною низькою відпусткою на абразивну зносостійкість сталі 60С2А. Ця обробка порівнювалася з такою у цієї сталі після ізотермічного гарту з температури 860⁰С і витримки 10 хв при 350⁰С, що забезпечує найвищий рівень зносостійкості. Згідно з даними рентгенівського фазового аналізу, у структурі дослідженої сталі присутнє ~30% метастабільного аустеніту, що майже повністю перетворюється на мартенсит деформації при абразивному впливі. Після гарту з МКІТ та низької відпустки отримано приблизно таку ж кількість аустеніту та зносостійкість. Така термообробка простіше і екологічніше за ізотермічне гартування.

Літературні джерела

1. Малінов Л.С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений. Диссертация докт. техн. наук: 05.16.01 – Екатеринбург, 1992.- 381 с.
2. Yehorova S.V., Sterenbogen Yu.A., Yurchyshyn A.V. Possibilities and prospects of using intercritical normalization for hardening of low-alloy steels and welded structures //Automatic welding.- 1983.- No. 12.- P.7-13.
3. Петруненко А.А., Яровой В.В., Букреев Б.А. Структура низколегированных сталей с ПНП-эффектом после термической обработки и деформации //Изв. вузов. Черн. металлургия.- 1991.- С. 73-74.
4. Малінов Л.С. Повышение свойств сталей и высокопрочного чугуна получением в них многофазных структур, включающих бейнит и метастабильный аустенит //Металл и литье Украины.-2004.- № 7.- С. 24-28.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РІЗНИХ СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ АУСТЕНІТУ ЗАЛИШКОВОГО ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Бобирь С. В., д.т.н, Парусов Е. В., д.т.н., Чуйко І. М., к.т.н.,
Барановська О. Є., к.т.н., Олійник Е. В.

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

Під час виготовлення металовиробів відповідального призначення (прокатні валки, штампи гарячого деформування, вали, ротори тощо) використовують сталі, які містять значну кількість дефіцитних легувальних елементів (Cr, Ni, V, Mo). У структурі таких сталей після термічного оброблення зберігається певна кількість аустеніту залишкового ($A_{зал}$), який у подальшому впливає на експлуатаційну стійкість готових металовиробів. Наразі відомі різні способи визначення $A_{зал}$ в легованих сталях, але слід розуміти, що саме точність вимірювання останнього дозволяє обґрунтовано підходити до обрання остаточних параметрів термічного оброблення з метою підвищення надійності експлуатації готових металовиробів.

Спосіб рентгеноструктурного аналізу на практиці є найбільш точним, який дозволяє достовірно визначати вміст $A_{зал}$. Однак при незначному вмісті $A_{зал}$ ($\leq 5,0\%$) в структурі сталі, відносна похибка його вимірювання може становити до $\sim 50\%$, що відповідає межі чутливості рентгеноструктурного методу, а головним недоліком є значна трудомісткість цього способу.

Магнітний спосіб, який базується на вимірюванні різниці між силами притягання постійного магніту до досліджуваного та еталонного зразків, виявляється непридатним для визначення $A_{зал}$ в структурі легованих сталей, оскільки вони містять немагнітні карбіди, що впливає на точність результатів вимірювання.

Відомий також ультразвуковий спосіб визначення вмісту $A_{зал}$, але цей метод є обмеженим і не може бути поширений на леговані сталі у зв'язку з тим, що він був розроблений виключно для сталей типу X12.

Враховуючи викладене, авторами цієї роботи розроблено універсальний ультразвуковий спосіб визначення вмісту $A_{зал}$: спочатку встановлюється швидкість ультразвуку в фериті й аустеніті еталонних зразків легованої сталі, потім проводиться вимірювання товщини зразку ультразвуковим товщиноміром за встановлених швидкостей ультразвуку, далі вимірюється товщина контрольованого зразку метричними приладами (штангенциркулем), а кількість $A_{зал}$ розраховується за формулою.

У відповідності до розробленого способу, визначення вмісту $A_{зал}$ було проведено на дослідних зразках сталей 38ХНЗМФА, 4Х5МФ1С, Х37СrМоV5-1, 60Х2СМФ і 80Х5МФ. З метою підтвердження достовірності отриманих результатів додатково визначали вміст $A_{зал}$ рентгеноструктурним способом на дифрактометрі «ДРОН-2.0» в мідному випромінюванні з монохроматором.

Порівняльний аналіз результатів вимірювання кількості $A_{зал}$ в дослідних легованих сталях засвідчив те, що використання запропонованого способу забезпечує достатню точність за значно меншої трудомісткості, ніж рентгеноструктурний аналіз, отже може використовуватись у якості експрес-методу контролю якості готових металовиробів. При цьому похибка визначення вмісту $A_{зал}$ є мінімальною, оскільки розроблений спосіб нівелює вплив спеціальних карбідів в структурі легованої сталі на результати вимірювань.

Таким чином, запропонований спосіб, на відміну від інших аналогів, дає змогу істотно спростити визначення кількості $A_{зал}$ в структурі легованих сталей та суттєво розширити область його застосування із відповідним забезпеченням точності вимірювання.

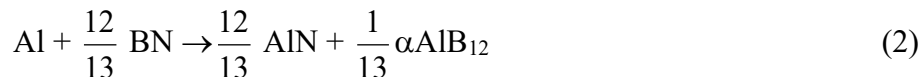
ПРО ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ПОЛІКРИСТАЛІВ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ СИСТЕМИ cBN – Al, ЗАЛЕЖНО ВІД ЇХ ФАЗОВОГО СКЛАДУ

Беженар М. П., д.т.н., Романенко Я. М., Пацик А. М., к.т.н.

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

Полікристалічні надтверді матеріали (PCBN) на основі кубічного нітриду бору (cBN) використовуються в інструменті, що працює при чорновому, напівчистовому та чистовому точінні виробів із залізвуглецевих сплавів твердістю до 63 HRC, у тому числі легованих хромом, марганцем і нікелем. Одержують такі матеріали при спіканні за високого тиску порошків cBN з різними добавками, найчастіше з добавкою алюмінію [1].

При реакційному спіканні порошків нітриду кубічного бору з алюмінієм відбувається хімічна взаємодія з утворенням нітриду і боридів алюмінію [2], приклади такої взаємодії наведені нижче:



Фазовий склад отриманих композитів буде відповідно cBN, AlN, AlB₂ у першому випадку, cBN, AlN, AlB₁₂ у другому і cBN, твердий розчин бору в AlN (Al(NB)). Кожен з варіантів має свої переваги та недоліки. Перерахуємо їх:

Композит 1 складу cBN, AlN, AlB₂. Переваги - високі твердість і тріщиностійкість за рахунок утворення міцного cBN каркасу, тиск і температура процесу отримання не вище 4,5 ГПа і 1450 °С. **Особливість** - такий фазовий склад як правило реалізується при спіканні відносно великих зерен з BN (більше 10 мкм), пов'язано це з кінетикою хімічної взаємодії. **Недолік** - знижена термостійкість через розпад AlB₂ при температурах вище 1000 °С за схемою AlB₂ AlB₁₂+Al.

Композит 2 складу cBN, AlN, AlB₁₂. Переваги - дуже висока твердість і термостійкість, прийнятна тріщиностійкість. **Недолік** - високі тиск і температура процесу отримання не нижче 6 ГПа та 1800 °С.

Композит 3 складу cBN, Al(NB). Переваги - високі термостійкість, тріщиностійкість, підвищені демпфуючі характеристики, прийнятна твердість, тиск і температура процесу отримання не вище 4,5 ГПа та 1450 °С. **Особливість** - такий фазовий склад зазвичай реалізується при спіканні дрібних зерен з BN (менше 7 мкм), пов'язано це з кінетикою хімічної взаємодії. **Недолік** – при спіканні порошків cBN з розміром зерен менше 3 мкм можливе утворення гексагонального нітриду бору. Причини - зниження тиску в апараті високого тиску через низьку початкову щільність і подальшу підвищену усадку пресовки, а також домішки на розвиненій поверхні порошків cBN.

Керуючи технологічними чинниками (тиск, температура і тривалість спікання, дисперсність вихідного порошку cBN) ми одержуємо матеріали з бажаними структурою (фазовий склад) і властивостями. Для чорнового точіння сплавів на основі заліза найкращий композит 1, для чистового точіння – композит 3.

Літературні джерела

1. Новиков Н.В., Шульженко А.А., Беженар Н.П., Божко С.А., Боримский А.И., Нагорный П.А. Киборит: получение, структура, свойства, применение // Сверхтвердые материалы.- 2001. №2.- С. 40 - 51.

2. Беженар Н.П., Божко С.А., Белявина Н.Н., Маркив В.Я., Нагорный П.А. Фазовый состав поликристаллов, полученных при реакционном спекании кубического нитрида бора с алюминием// Сверхтвердые материалы. – 2002. – №1. – С.37-48.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЯВЛЕННЯ СТРУКТУРИ ВИСОКОБОРИСТОЇ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ ФЕРИТНОГО КЛАСУ

Балаханова Т. В., к.т.н., Парусов Е. В., д.т.н., Чуйко І. М., к.т.н., Олійник Е. В.

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

На сьогодні ядерна галузь є ідеальним варіантом екологічного джерела енергії, що базується на поділі урану-235. При цьому, головний недолік атомної енергогенерації полягає в утворенні радіоактивних відходів (відпрацьоване ядерне паливо при виробництві електроенергії). Після видалення з реактору ці відходи розміщують у спеціальних контейнерах, що містять поглинальний і затримувальний елементи. Матеріали, які використовують для виготовлення контейнерів повинні відповідати певним вимогам: сталій структурний і елементний стан, стійка геометрія збірок зберігання відпрацьованого палива, ядерна радіаційна безпека критичності. Широковідомим матеріалом, який використовують під час роботи з відпрацьованим паливом і досі залишається нержавіюча сталь з високим вмістом бору, яка окрім поглинальних здібностей має інші властивості, що є обов'язковими для зазначеного виду продукції. Найбільш розповсюдженим матеріалом для виготовлення контейнерів в Україні є сталь 04X14T3P1Ф, яка належить до нержавіючих сталей феритного класу та містить 1,1–3,0 % бору. Не дивлячись на те, що ця сталь розроблена ще в минулому сторіччі, питання пов'язані із процесами структуроутворення, а також підвищення технологічних і експлуатаційних властивостей, досі залишаються дискусійними. Оскільки бор володіє низькою здатністю до розчинення як в аустеніті, так і фериті, це призводить до формування у структурі сталей боридів різного типу. Крім того, борвмісні фази окрихчують сталь. При цьому, формування, морфологія та рівномірність розподілу того чи іншого типу боридів за об'ємом готового металовиробу визначають не тільки комплекс механічних властивостей та напружений стан, а також визначають захисні властивості матеріалу та ступінь складності виготовлення з них кінцевої продукції.

Проведені інформаційно-аналітичні дослідження за цим напрямком засвідчили про обмеженість застосовуваних металографічних способів виявлення структури нержавіючих сталей з високим вмістом бору, що обумовлено складним фазовим складом боридних включень. Мета роботи полягала у визначенні достовірної методики дослідження структури високолегованих сталей феритного класу, що містять значну кількість бору. На засадах відомих способів та практичного досвіду авторів розроблено методику підготовки поверхні досліджуваних зразків зі сталі 04X14T3P1Ф, яка спрощує виявлення структури та мікрорельєфу на поверхні шліфа, що дозволяє достовірно оцінювати якість матеріалу. Сутність способу полягає у застосуванні двох типів реактивів із поетапним занурюванням досліджуваних зразків у травильну речовину. При цьому відбувається стійка диференціація боридних фаз та чітке визначення границі сталева матриця-боридна фаза. Під час пробопідготовки перший реактив розчиняє матрицю і деякі види боридів, а другий реактив дозволяє профарбувати на різний відтінок бориди кожного типу, які присутні у складі сталі 04X14T3P1Ф. За допомогою запропонованої методики пробопідготовки в сталі 04X14T3P1Ф була виявлена структура, достовірність визначення якої додатково підтверджена результатами мікрорентгеноструктурного та мікрорентгенспектрального аналізів.

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ВИМОГ ДО КІЛЬКОСТІ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛЕСАХ ПРИ СТВОРЕННІ НОВОГО НАЦІОНАЛЬНОГО СТАНДАРТУ

**Бабаченко О. І., д.т.н., Кононенко Г. А., д.т.н.,
Подольський Р. В., PhD, Сафронова О. А.**

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

На сьогодні основний вітчизняний споживач залізничних коліс АТ «Укрзалізниця» технічно не готовий перейти на застосування коліс відповідно до європейських нормативних документів, але при цьому вимоги ДСТУ ГОСТ 10791 є морально і технічно застарілими і не відповідають сучасному рівню складності умов експлуатації та значно підвищеному фактичному рівню якості залізничних коліс. Таким чином, необхідне розроблення нового національного стандарту на залізничні колеса вагонні, який відповідає сучасному етапу розвитку техніки та технологій.

Для розробки пропозицій по використанню додаткових показників якості залізничних коліс (мікроструктура, хімічний склад виробу та ін.) та підвищення рівня існуючих вимог (забрудненість неметалевими включеннями, рівень механічних властивостей та ін.) в новій редакції державного стандарту на залізничні колеса у порівнянні з існуючими в ДСТУ ГОСТ 10791:2016 та в міжнародному стандарті ГОСТ 10791-2011 зі Зміною 1, було виконано статистичний аналіз фактичного рівня показників якості, який досягається при виробництві залізничних коліс в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ».

Неметалеві включення можуть істотно знижувати технологічні та механічні властивості сталей, сприяючи утворення різного роду дефектів. Одним із шляхів підвищення надійності та довговічності металовиробів відповідального призначення зі сталей є зменшення забрудненості неметалевими включеннями. Тому посилення вимог щодо обмеження їх вмісту та збільшення числа контрольованих виробів сприятиме підвищенню безпеки залізничного руху.

В результаті статистичного аналізу розподілу кількості неметалевих включень протягом 2019-2021 років, встановлено, значну перевагу якості металу над вимогами чинного стандарту. Значно менша кількість спостерігається для таких типів неметалевих включень як: сульфідні, оксиди рядкові, силікати пластичні, силікати крихкі та оксиди точкові.

Розроблено пропозиції щодо нових більш жорстких вимог щодо максимально припустимого рівня забрудненості неметалевими включеннями для коліс категорії В: оксиди точкові – 2,0 бали замість 2,5; силікати пластичні – 1,5 бали замість 2,0; силікати, які недеформуються – 2,0 бали замість 2,5. Крім того, запропоновано оцінку чистоти сталі проводити з застосуванням ДСТУ 8966:2019 «Сталь. Металографічні методи визначення неметалевих включень», що був введений на заміну ГОСТ 1778-70.

СПАДКОВІСТЬ СІРИХ ЧАВУНІВ

Борисенко А. Ю., д.т.н., Левченко Г. В., д.т.н.

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

Представлені результати аналітичних досліджень за проблемою спадковості сірих чавунів. Зазвичай під поняттям спадковості чавунів та інших металевих сплавів розуміють зв'язок між властивостями вихідних шихтових матеріалів та властивостями вироблених з них виливків. Явище спадковості у сірих чавунах – це складова частина загальної проблеми спадковості у металевих сплавах, а у більш ширшому значенні – металургійної спадковості.

Найважливішою складовою структури ливарних (доменних) чавунів є характеристика графіту. Вважається, що явище спадковості у сірих чавунах полягає у спадковій передачі виливкам розміру, морфології, характеру розподілу графітних включень, а також структури металевої матриці (основи) вихідних ливарних чавунів. Негативна спадковість ливарних чавунів найбільш сильно проявляється у виливках за рахунок грубопластинчастої структури графіту. Ливарні чавуни однієї марки, що мають однаковий або близький хімічний склад, але різних заводів-виробників мають різну структуру та механічні властивості, які зберігаються при наступних переплавах. При цьому природа ливарних чавунів сильніше виявляється при високому вуглецевому еквіваленті чавуну вторинної плавки. Відмінність властивостей ливарних чавунів одного хімічного складу, але різних металургійних заводів пояснюють наявністю різної кількості домішок, неметалічних включень та вмістом газів (O_2 , N_2 , CO) та оксидів заліза (FeO , Fe_3O_4).

На спадкові властивості ливарних чавунів впливають фактори доменного виробництва: об'єм доменної печі, температура та режим дуття, ступінь відновлюваності руди, особливості розливання чавуну у виливниці та ін. Отриманому в конкретній доменній печі чавуну притаманні свої особливості щодо чутливості до усадки та пористості, схильності до графітизації та формування структури металевої основи. Ці особливості передаються після переплаву чавуну виливкам.

Спадковість литих сплавів та зокрема сірих чавунів також визначається залежністю їх властивостей та кінетики кристалізації від структурного стану розплаву, з якого утворюються виливки. Одним із факторів, що впливають на структурну спадковість у сірих чавунах є ступінь розчинення графітних включень у розплаві залежно від їх вихідного розміру, форми та температури перегріву розплаву.

Явище спадковості ливарних сплавів, у тому числі і сірих чавунів, широко висвітлено у літературних джерелах. Незважаючи на це робіт, спрямованих на встановлення причин виникнення спадковості мало, а механізм її реалізації досі залишається не з'ясованим. Сказане зумовлює актуальність проведення подальших досліджень у цьому напрямі.

Для управління формуванням структури графіту та металевої матриці сірих чавунів, від яких залежать властивості виливків та усунення у них негативної спадковості необхідне знання механізму впливу основних хімічних елементів, мікродомішок, кількості та складу газів на структуру розплаву та рідко-твердофазні перетворення сірих чавунів залежно від умов їхньої кристалізації.

ТЕРМОДИНАМІКА ХІМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ З АЛЮМІНІЄМ І ТУГОПЛАВКИМИ СПОЛУКАМИ ТИТАНУ

Романенко Я. М., к.т.н., Пацик А. М., Беженар М. П., д.т.н.

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

Полікристалічні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору (PCBN) одержують спіканням за високого тиску порошків cBN з добавками, серед яких найчастіше використовують тугоплавкі сполуки титану і алюміній. Вибір складу і кількісних співвідношень добавок ґрунтується на тому, щоб в результаті їх фізико-хімічної взаємодії з нітридом бору утворювалась тверда кераміка, яка забезпечує високу міцність зв'язку по границях зерен cBN.

В [1] розраховано зміну енергії Гіббса для топонімічних реакцій взаємодії кубічного нітриду бору з перехідними металами IVa-VIa груп з врахуванням впливу високого тиску, а в [2] – зміну енергії Гіббса при взаємодії за високих тисків cBN з алюмінієм. В даній роботі аналогічні розрахунки виконуються для взаємодії в потрійній системі, а саме: cBN – тугоплавка сполука титану (TiN, TiC, TiB₂) – Al. Ситуація з алюмінієм потребує пояснення. Спікання PCBN композитів проводили в два етапи: перший – попереднє просочення стиснутої шихти алюмінієм за тиску 2 ГПа і температури 1300 К, другий етап - спікання за тиску 4,2 - 7,7 ГПа і температури 1750 – 2300 К. При таких умовах алюміній знаходиться у рідкому стані і тому для проведення термодинамічних розрахунків брались ентропія і мольний об'єм для рідкого алюмінію. При виборі можливих реакцій для розгляду вибирались такі, в ході яких не утворюється газова фаза (наприклад N₂), крім того, при виборі варіантів реакцій взаємодії враховували дані рентгеноструктурного аналізу спечених композитів.

Розрахунок енергії Гіббса виконувався в наближенні $\Delta C_p = 0$. Залежність енергії Гіббса від тиску $(dG/dp)_T = V$ встановлювалась з врахуванням об'ємного ефекту плавлення алюмінію $\Delta V = 0,724 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$. Стисненням фаз нехтували, так як його ефект в таких реакціях малий. Таким чином, вплив високого тиску на енергію Гіббса для всіх вказаних реакцій визначались тільки об'ємним ефектом плавлення алюмінію і об'ємним ефектом реакцій:

$$\Delta V = d(\Delta G)/dp + \Delta V_{\text{плав Al}}$$

Для енергії Гіббса одержимо вираз:

$$\Delta G_T^p = \Delta H_{298} + T \Delta S + p \Delta V$$

З приведених даних випливає, що з точки зору термодинаміки у вибраних нами системах повинна проходити хімічна взаємодія, а так як ентропійна і об'ємна складові реакцій від'ємні, то з підвищенням температури і тиску ймовірність такої взаємодії зростає.

Висновок. Виконано термодинамічний аналіз хімічної взаємодії при високому тиску кубічного нітриду бору з тугоплавкими сполуками титану та алюмінієм. Показано, що така взаємодія можлива в області температур до 2300 К і тисків до 7,7 ГПа, ізобарно-ізотермічний потенціал ΔG (енергія Гіббса) від'ємний для даного діапазону тисків і температур. При підвищенні температури абсолютне значення ΔG зростає, при підвищенні тиску абсолютне значення ΔG зростає, тобто підвищення тиску і температури сприяють хімічній взаємодії в розглянутих системах.

Літературні джерела

1. Божко С.А., Беженарь Н.П. Термодинамика твердофазного взаимодействия кубического нитрида бора с переходными металлами IVa-VIa групп при высоких давлениях// Сб. Влияние высоких давлений на свойства сверхтвердых материалов.-Киев: ИСМ АН УССР,1985.- С.62-65.
2. Спекание кубического нитрида бора с алюминием/ А.А. Шульженко, С.А. Божко, Н.П.Беженарь и др.// Сверхтвердые материалы.-1986.-N5.- -С.14-17.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ У МОТКАХ

Перчун Г. І., к.т.н., Івченко А. О.

Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро

Наявність на вітчизняному ринку арматурного прокату (АП) у мотках забезпечує переваги його застосування в будівничій галузі за рахунок впровадження індустріальних методів виготовлення залізобетонних конструкцій та зниження витрат сталі на 5-7% при розкрою. Арматурний прокат, який найбільш масово застосовується у будівництві як в Україні, так і в країнах Європи, є АП класу міцності 500 Н/мм² (А500С за ДСТУ 3760, Bst 500/550 за DIN 488 - Німеччина, B500B за BS 4449 - Англія).

Виробництво АП діаметром 6,0-18,0 мм у мотках в Україні ведеться на металургійних підприємствах, де виготовляють продукцію класу міцності А240С, А400С та А500С. При цьому при виготовленні АП класу А500С за рахунок термомеханічного зміцнення має місце велика неоднорідність показника межі плинності по довжині стрижня (розкату) в діапазоні 350-550 Н/мм², що свідчить про наявність в одному мотку продукції трьох класів міцності одночасно. Це не відповідає технічним вимогам стандартів на АП. Тому для усунення такого недоліку за кордоном якісний АП класу А500С виготовляють по комбінованій технології, коли за допомогою гарячої деформації виготовляють прокат з рівнем межі плинності 350-450 Н/мм² (термічне зміцнення не застосовується), а за допомогою наступної холодної деформації доводять цей показник до рівня 500-600 Н/мм². Тобто, таким чином, здійснюють додаткове зміцнення. Технологія холодної деформації реалізується на спеціалізованому обладнанні шляхом розтягу заготовки з готовим періодичним профілем в процесі її перемотки із мотка в моток (stretching-технологія).

У роботі [1] розглянута можливість отримання АП у мотках, що відповідає вимогам національного стандарту з оптимальним співвідношенням показників міцності та пластичності шляхом запровадження stretching-технології. Для реалізації такої технології в якості заготовки використовується прокат періодичного профілю класу А400С за ДСТУ 9130 зі сталей марок СтЗГпс, 18Г2С, 20Г2 та 25Г2С із вмістом вуглецю в межах 0,16...0,24% з подальшим отриманням продукції більш високого класу міцності. Дослідженнями у лабораторних умовах показано, що при використанні заготовки періодичного профілю діаметром 8,0 мм з низьколегованої сталі (% мас.: С – 0,24; Mn – 1,39; Si – 0,76), при її деформуванні додатковим розтягом (% ϵ) на 2,0 та 4,0% при температурі доквілля отримували АП з межею плинності на рівні 580 и 650 Н/мм² відповідно. Це свідчить про те, що шляхом холодної деформації розтягом з АП класу міцності А400 можливо отримувати АП більш високого класу міцності – А500С та А600С. Для запровадження stretching-технології та організації масового виробництва АП підвищеної міцності у мотках необхідна наявність додаткового обладнання (технологічної лінії). Таких вітчизняних ліній не існує, але є закордонні лінії, що вже певний час використовуються, і які довели свою працездатність та надійність.

Літературні джерела

Perchun G. I., Yakushev O.S., Ivchenko A.O. Improving the production of cold-formed reinforcing bars of increased plasticity for construction in post-war Ukraine // International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union» : conference proceedings (September 6–7, 2023. Wloclawek, the Republic of Poland). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. 26-30 pages.

ФОРМУВАННЯ КОМІРКОВОЇ СТРУКТУРИ МІЖФАЗНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ СТАЦІОНАРНІЙ $\alpha \rightarrow \gamma$ ПЕРЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ ФЕРИТНИХ СПЛАВІВ ЗАЛІЗА

Чорноіваненко К.О., к.т.н., Мовчан О. В., к.т.н

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Проведено дослідження стаціонарної $\alpha \rightarrow \gamma$ рекристалізації при ізотермічному науглероцюванні сплаву феритного заліза з комірчастою структурою міжфазної границі.

Дифузійний перенос вуглецю через γ -фазу до міжфазної поверхні є основним чинником, що визначає кінетику $\alpha \rightarrow \gamma$ рекристалізації під час науглецювання.

Фазове перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ представляли у вигляді набору послідовних стаціонарних станів. Процес $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення розглядався у двовимірному наближенні, припускаючи осьову симетрію комірки. Було отримано вираз для розподілу вуглецю в γ -фазі перед плоским фронтом перетворення під час стаціонарного процесу.

Різниці граничних концентрацій між вигнутим і плоским фронтом перетворення визначали шляхом побудови спільної дотичної площини до поверхонь термодинамічних потенціалів G_α і G_γ для плоского і вигнутого фронту.

Розглянуті дифузійні процеси в α -фазі перед фронтом перетворення. Середня гранична концентрація α -стабілізатора в α -фазі вища, ніж у зростаючій γ -фазі. Отримано вираз, що зв'язує процеси дифузії в α -фазі перед фронтом перетворення зі швидкістю просування фронту.

Побудовано поздовжні розрізи комірок, що відповідають граничним випадкам коефіцієнта поверхневого натягу σ та мікроструктури при $\alpha \rightarrow \gamma$ рекристалізації. При проведенні цих розрахунків амплітуда збурення $\varphi(x)$ була апроксимована кусково-неперервною функцією, що складається з фрагментів кривих другого порядку та прямих.

Детальне вивчення мікроструктури фронту трансформації показує, що клітини III мають виражену кристалічну фасетку при твердофазній рекристалізації. З одного зерна α -фази можуть вирости два або більше стовпчастих кристалів γ -фази. Зростання граничної площини відбувається з максимальною швидкістю, якщо $\{111\}_\gamma$ і $\{110\}_\alpha$ взаємно орієнтовані за одним із варіантів орієнтаційного співвідношення Курдюмова–Закса.

Отриману модель можна використовувати як базову модель для дослідження росту природного аустенітно-карбідного композиту.

УДК 621.771.22.04

ВИБІР МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПРОТЯГУВАННЯ ШТАБИ ЧЕРЕЗ ЗГИНО-РОЗТЯГУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ**Ключніков К. Ю., Приходько І.Ю., д.т.н., Раздобреєв В.Г., к.т.н.,
Паламар Д. Г., Лещенко О. І.****Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро**

В практиці виробництва металовиробів особливу роль відіграють фасонні профілі складної конфігурації, у тому числі тонкостінні, стрічкові і профілі періодичного перерізу. Якісні особливо високоточні фасонні профілі з різним співвідношенням ширини до висоти стрічки, які виробляються малотоннажними партіями за кордоном та широко використовуються на підприємствах машинобудування, приладобудування, авіабудування та інших галузях господарства. В Україні виробництво високоточних фасонних профілів є вкрай обмеженим, а виробництво профілів стрічкового типу взагалі відсутнє. Фасонні профілі стрічкового типу зазвичай виробляють холодною деформацією на волочильних, плющильних або листопрокатних станах. Використання волочіння в роликівих волоках в порівнянні з холодною прокаткою та плющенням має більш високу технологічну гнучкість, не потребує великих капітальних витрат для організації виробництва. Порівняно із традиційним волочінням з використанням монолітних волок, процес волочіння в роликівих волоках має наступні переваги: нижче витрата енергії; вище допустима деформація за прохід; вища однорідність властивостей продукції, не використовують дорогі волочильні мастила, не проводять додаткові спеціальні операції підготовки металу до волочіння (фосфатування, оксалатування, міднення, покриття бурою тощо). Основний недолік способу волочіння в роликівих волоках – наявність тягового зусилля. Напруження, що розтягують профіль у сукупності зі зниженням пластичності металу в процесі волочіння, можуть привести до руйнування прокату. Щоб усунути шкідливий вплив залишкових напружень, що розтягують необхідно або їх знівелювати, або перевести в стискаючи напруги, які підвищують працездатність сталеві заготовки. З цією метою в практиці виробництва дроту застосовують два способи: термічний і механічний. Термічний спосіб, який застосовується в промисловості, потребує значних витрат енергії. Механічний спосіб має кілька різновидів, з яких найбільш раціональний є процес знакозмінної деформації з розтягуванням дроту в згино-розтягувальному пристрої.

Процес холодного деформування із застосуванням згино-розтягувального пристрою відбувається з протинатягом, величина якого дорівнює зусиллю протягування заготовки через цей пристрій. Протинатяг визначає зусилля холодної деформації і потужність приводного двигуна тягучого пристрою, величину максимально можливої деформації за перший прохід, стійкість процесу холодної деформації та інші параметри. Працюючи з великим протинатягом можливі часті обриви прокату. Тому дуже важливо правильно розрахувати зусилля холодної деформації із застосуванням згино-розтягувальних роликівих пристроїв.

Мета роботи: на підставі виконаного аналізу, вибрати методику для визначення енергосилових параметрів процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій.

В результаті аналізу визначена методика розрахунку силових параметрів процесу та формозміни катанки в згино-розтягувальному роликівому пристрої з комплексним урахуванням взаємної залежності ступеня деформації, сили протягування металу, а зміни механічних властивостей у процесі деформації штаби у роликівому згино-розтягувальному пристрої прийняли методику, яку розробили раніше в ІЧМ НАНУ. Обрані методики слугують у подальшому для розробки математичної моделі розрахунку енергосилових параметрів та параметрів формозміни процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій, що дозволить проводити обґрунтований вибір параметрів знакозмінного вигину штаби.

ВИРОБНИЦТВО АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ З НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ МОДИФІКОВАНИХ АЗОТОМ СТАЛЕЙ

Івченко О.В.¹ к.т.н., Перерва В.Я.² к.т.н., Зуєв О.В.¹

¹ Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро;

² Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро

Актуальним завданням при виробництві сталевих прокатів з низьколегованих марок сталі є підвищення міцності без збільшення собівартості продукції. Реалізація способів модифікування та мікролегування дозволяє підвищити характеристики сталевих виробів [1, 2] як що до міцності так і експлуатації. Нові технології модифікування сталі шляхом виділення нанодисперсних надлишкових фаз за різних умов значно підвищують міцність і пластичні властивості сталевих прокатів, в тому числі арматурного.

Розглянуто можливості отримання арматурного прокату, що відповідає вимогам міжнародних стандартів з оптимальним співвідношенням показників міцності та пластичності шляхом реалізації технології карбонітридного зміцнення низьколегованих конструкційних сталей [3, 4].

Збільшення споживання арматури з відповідними показниками міцності та пластичності зумовлює високі вимоги до її виготовлення, що досягається технологією карбонітридного зміцнення сталей, що містять ванадій і рідше ніобій. Виробництво арматурного прокату класу міцності 500-600 МПа з низьколегованих сталей модифікованих азотом [5] суттєво підвищує споживчі властивості готової продукції, такі, як витривалість, холодостійкість, сейсмостійкість, вогнестійкість та вогнезбережність. Застосування такого прокату при будівництві в регіонах із підвищеною сейсмічною активністю та великими перепадами температур навколишнього середовища сприятливо позначиться на надійності залізобетонних конструкцій та споруд.

Літературні джерела

1. Ivchenko A.V. Improving the production of reinforcing bars of strength class 500-600 MPa with improved performance properties on the example of European standards / Ivchenko A.V., Zuiev O.V., Nurumgaliyev A.H., Yerzhanov A.S., Andryushkin A.V. //International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union»: conference proceedings (September 6–7, 2023. Wloclawek, the Republic of Poland). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. 22-25 p.
2. Ivchenko A.V. Reinforcement Related for Construction in Seismic Active Regions. Aspects of Production, Application and Control. Aspects Min Miner Sci. 11(3). AMMS. 000762. 2023. DOI: 10.31031/AMMS.2023.11.000762
3. Бубликов Ю. А. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей феррито-перлитного класса //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 6. – №. 11 (72). – С. 50-58.
4. Бубликов Ю.А., Івченко А.В. Производство металлопродукции из сталей с карбонитридным упрочнением // LAMBERT Academic Publishing. Дюссельдорф. 2020. - 153 с.
5. Заявка на патент UA № u2023 03571 від 24.07.2023 р. Спосіб виробництва арматурного прокату з підвищеними експлуатаційними властивостями для залізобетонних конструкцій // Івченко О.В., Нурумгалієв А.Х., Зуєв О.В., Бубликов Ю.О., Андрюшкін А.В., Перчун Г.І., Єржанов А.С., Жуніскалієв Т.Т., Куатбай Е.К.

ІСНУЮЧІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ СПОСОБИ ОХОЛОДЖЕННЯ СТАЛЕЙ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В ЛІНІЇ ПРОКАТНОГО СТАНА

Олійник Е. В., Парусов Е. В., д.т.н.

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

Для виготовлення за сучасною технологією холоднодеформованого дроту зварювального призначення з легованих сталей необхідно мати високоякісну вихідну сировину – прокат у бунтах, який повинен володіти поліпшеним поєднанням показників міцності та пластичності. Мікроструктура прокату з легованих сталей визначає його здатність до холодного пластичного деформування, а співвідношення структурних складових, їхня кількість та рівномірність розподілу чинять істотний вплив на процес стабільного безобривного волочіння. Сучасна технологія отримання зварювального дроту із використанням енергозберігаючого принципу, так зване «пряме» волочіння, передбачає відсутність додаткових термічних обробок під час холодного пластичного деформування прокату на металовиробному переробі. Зниження міцності та підвищення показників пластичності прокату зварювального призначення забезпечується за рахунок селективних вимог до хімічного складу сталі у межах марочних інтервалів, додаткового зв'язування азоту вільного, а також застосування спеціальних режимів розміцнюючого оброблення із регульованою швидкістю постдеформаційного охолодження на роликовому транспортері в лінії прокатного стану.

Теоретичні засади деформаційно-термічного оброблення прокату базуються на закономірностях кінетики розпаду аустеніту і, відповідно, особливостях перебігу фазово-структурних перетворень, які відбуваються під дією гарячого пластичного деформування в легованих сталях. При визначенні параметрів деформаційно-термічного оброблення прокату слід враховувати хімічний склад сталі, температуру завершення гарячого прокатування, тривалість постдеформаційної паузи, а також температурно-часові умови охолодження.

В металургійній практиці під час виготовлення прокату в бунтах використовують лінії «короткий» та «довгий» Stelmor. Охолодження конструкційних та високовуглецевих сталей проводять на лінії «короткий» Stelmor (довжина транспортера ~ 70–90 м), а легованих сталей зварювального призначення на лінії «довгий» Stelmor (довжина транспортера ~ 110–150 м). Збільшення довжини транспортера дозволяє створювати різноманітні умови для охолодження прокату в широкому температурно-часовому інтервалі та комбінувати безперервне та квазіізотермічне охолодження. Головна перевага лінії «довгий» Stelmor полягає у можливості охолодження металу під теплоізоляційними кришками транспортера в умовах, наближених до ізотермічних, що дозволяє досягти найбільш ефективного поєднання структури та механічних властивостей прокату з легованих сталей. Уповільнене охолодження легованих сталей під теплоізоляційними кришками транспортера сприяє формуванню ферито-перлітної структури із мінімальною кількістю бейніто-мартенситних ділянок, що забезпечує підвищення його технологічної пластичності під час волочіння без застосування додаткового відпалу.

Альтернативним резервом забезпечення уповільненого охолодження прокату може бути додаткова герметизація секцій транспортеру під теплоізоляційними кришками, встановлення спеціальних циркуляційних вентиляторів, а також тепловізорів. Очевидно, що температурно-швидкісний регламент охолодження прокату відіграє суттєву роль на формування його якості, а загальний процес виготовлення складається з технологічних операцій, кожна з яких робить свій певний внесок у формування кінцевого комплексу властивостей. Необхідно зазначити, що наразі найбільш раціональні режими охолодження при виготовленні прокату з легованих сталей реалізовано не у повній мірі, що дозволяє запропонувати національним металургійним підприємствам ефективні технологічні заходи, які спрямовані на вдосконалення виробничого процесу за відносно мінімальних матеріальних витрат.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ КУМУЛЯТИВНОГО СТРУМЕНЯ ПІРОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ РАКЕТИ-НОСІЯ

Болюбаш Є. С.

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

Піротехнічні пристрої відіграють важливу роль у багатьох системах ракетно-космічної техніки, де вимагається миттєве виконання операцій, зокрема, розділення ступенів ракет-носіїв. Одним з найбільш ефективних типів піротехнічних пристроїв для виконання таких операцій є лінійні кумулятивні заряди (ЛКЗ).

Глибина проникнення кумулятивного струменю (КС) є одним із основних параметрів, що визначають ефективність і надійність піротехнічних пристроїв системи розділення. Якщо глибина проникнення КС недостатня, то піротехнічний пристрій не зможе забезпечити ефективне руйнування зв'язків між ступенями або елементами конструкції в ракетно-космічній техніці.

Метою даної роботи є розробка методики дослідження глибини проникнення КС ЛКЗ, що використовується в системах розділення ракет-носіїв.

Методика дослідження складається з наступних етапів: підготовка зразків перешкоди; підготовка ЛКЗ; встановлення ЛКЗ на перешкоду; вимірювання глибини проникнення; аналіз даних.

Розроблена методика дозволяє проводити дослідження глибини проникнення КС ЛКЗ з високою точністю та надійністю. Отримані за допомогою даної методики результати дослідження дозволяють підтвердити працездатність, ефективність і надійність піротехнічних пристроїв на ЛКЗ.

РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАСТИЛ ДЛЯ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Каргін С.Б., к.т.н., Сухомлин С. А.

ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”, м. Дніпро-м. Маріуполь

Більшість технологічних мастил для обробки металів тиском (ОМТ) містять в собі графіт. До таких мастил можна віднести: ОГВ-75, ГФП, Укрінол-7, Дельта-31, Сумідера та ін. В цих мастилах фракція графіта має розмір від 2 — 5 мкм. Для виготовлення мастил з такими розмірами графіта на підприємстві широко застосовуються шарові млини. Процес відрізняється трудомісткістю та великою енергомісткістю. Нами розроблені і впроваджені на Маріупольському графітовому заводі засіб виготовлення дрібного графіту за допомогою гідравлічного диспергатора. При цьому за допомогою кавітаційних струй великі частини графіта швидко подрібнюються на фракції розміром 2 — 5 мкм. Отримані проби були засвідчені на електричному мікроскопі. Було встановлено, що за 6 годин на кавітаційному диспергаторі можливо отримати 60 % дрібного графіта фракцією 2 — 5 мкм. У той же час на шарових млинах було б потрібно у 10 разів більше часу, а витрати праці — у 5 разів більше. Розробленим засобом були виготовлені технологічні мастила ОГВ-75, ГФП, Укрінол-7, які пройшли випробування у ковальсько-штампувальному цехах (“Азовмаш”, м. Токмак; ЮЖМАШ, м. Дніпро) і показали хороші результати. Важаємо, що розроблений засіб є перспективним, екологічно чистим та може бути впровадженим на підприємствах, які виготовляють технологічні мастила.

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБ-ЗАГОТОВОК ДЛЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СТВОЛІВ МАЛИХ КАЛІБРІВ З ЖАРОМІЦНИХ РЕЛАКСАЦІЙНОСТІЙКИХ ХРОМОМОЛІБДЕНОВИХ СТАЛЕЙ

Король Р.М., к.т.н., Мироненко М.А., к.т.н.

**Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут
трубно́ї промисловості ім. Я.Ю. Осади» м. Дніпро**

Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубно́ї промисловості ім. Я.Ю. Осади (скор. ДП «НДТІ»). Організаційно-правова форма: державна власність. Суб'єкт управління: Фонд державного майна України. Розмір державної частки в статутному капіталі – 100%.

Згідно Постанови КМУ №83 від 04.03.2015р. (чинна редакція від 26.08.2021р.) «Про затвердження переліку об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави», ДП «НДТІ» відноситься до стратегічних підприємств.

На балансі ДП «НДТІ» перебуває захисна споруда цивільного захисту – центральне бомбосховище Соборного району м. Дніпра.

ДП «НДТІ» сертифіковано на відповідність вимогам ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). ДП «НДТІ» атестоване як наукова установа (Свідоцтво про державну атестацію Серія ДА № 00494 від 26.05.2022р.) і його включено до Державного реєстру наукових установ, яким надається підтримка держави (Свідоцтво № 03116 Серія ДР від 26.07.2022р.).

При ДП «НДТІ» функціонують Технічні комітети ТК 8 «Труби сталеві та балони» й ТК 81 «Стандартизація методів контролю механічних, металографічних і корозійних випробувань металопродукції». Інститут має колективне членство в ТК 79 «Атомна енергія» й ТК 176 «Стандартизація озброєння та військової техніки».

В рамках роботи останнього з перелічених комітетів у інституті провадяться роботи означеної тематики. Наприклад, на дослідній ділянці було успішно апробовано новий спосіб виготовлення труб-заготовок, які використовуються при виготовленні артилерійських стволів малих калібрів. Запропонований спосіб реалізується наступним чином.

У відомому способі виробництва труб-заготовок для артилерійських стволів малих калібрів з жароміцних релаксаційностійких хромомолібденових сталей, котрий включає багатопрхідну прокатку на станах холодної періодичної прокатки з проміжною термічною обробкою, проміжну термічну обробку перед останнім проходом виконують в два етапи: нагрівають труби до температури 870°- 890°С з охолодженням в маслі, а потім здійснюють їх поступовий нагрів до температури 300°- 650°С з охолодженням на повітрі. При цьому кінцеву прокатку труб роблять з обтиском 15 - 25%.

Як ми вже зазначали раніше, запропонований спосіб пройшов апробацію в умовах дослідної ділянці ДП «НДТІ» при виготовленні експериментальної партії труб-заготовок артилерійських стволів розміром 32×8 мм з жароміцної релаксаційностійкої хромомолібденової сталі марки 30ХМА. Холодну прокатку проводили на стані ХПТ-75 в три проходи. Перед останнім проходом здійснили операцію термічної обробки труб при 880°С упродовж 30 хвилин з наступним охолодженням в ванні з маслом. Потім знову поступово нагріли труби до 300°- 320°С впродовж трьох годин з наступним охолодженням на повітрі до кімнатної температури. Після зазначеної термічної обробки труби мали межу міцності на розрив в діапазоні 880 - 920 МПа. Після прокатки з обтиском 15% межа міцності готових труб зросла до 1120 МПа з розбігом механічних властивостей по довжині труби до 12%. Якість зовнішньої поверхні труб була задовільна.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ КУВАННЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ**Каргін С. Б., к.т.н., Малий І.А.****ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”, м.Дніпро-м.Маріуполь**

При куванні прокатних валків по традиційній технології, для забезпечення потрібного укову широко застосовують операцію осадки зливка. Нами запронована форма бойків, при куванні якими нема потреби у трудомісткій операції осаджування зливка. Кувальному цеху на гідравлічному пресі при куванні прокатного валку вагою 25 т були застосовані трипроменеві бойки, кування якими дозволило отримати трипроміневий зливко. Операція осаджування не була застосована. Подальше кування цього трипроменевого зливка проводили по традиційній технології. При цьому технічні показники прокатки валка відповідали усім потребам стандарту (ДСТУ), а сам процес на 30 % був швидшим. Теоретичні дослідження проведені методом ліній ковзання показали, що кування цими бойками дозволяє добре прокатувати зливко по всьому перерізу. Ми гадаємо, що розроблена і впроваджена конструкція нової трипроменевої форми ковальських бойків може бути широко застосована при куванні різних поковок, в тому числі і прокатних валків.

УДК 004.02:519.63:669.717

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ**Бабенко М. В., к.т.н., Тонкошкур Г.О.****Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське**

Математичне моделювання багатофазних середовищ ґрунтується на фундаментальних постулатах і принципах механіки суцільних середовищ. Однак важливо зазначити, що рівняння, які описують ці процеси в багатофазних середовищах, є переважно складними і нелінійними диференціальними рівняннями в частинних похідних, які часто мають аналітичні розв'язки лише в обмеженій кількості випадків, що, як правило, не мають практичної значущості.

Для отримання кількісного уявлення про перебіг таких процесів стали незамінними чисельні методи, що реалізуються за допомогою обчислювальної техніки. Це спричинило появу нових наукових дисциплін, зокрема, обчислювальної фізики, обчислювальної гідродинаміки та обчислювальної теплофізики.

Автоматизовані системи наукових досліджень – це системи, в яких для підвищення ефективності наукових досліджень ряд процедур отримання, аналізу, передачі та накопичення інформації, пов'язаних з використанням в ході пошуків методу математичного моделювання, формалізований і виконується автоматизовано.

На кафедрі «Програмне забезпечення систем» Дніпровського державного технічного університету була проведена робота з розробки автоматизованої системи наукових досліджень «Плавлення матеріалів». Результатом цього стало програмне забезпечення, пристосоване для отримання всебічних і високоточних даних щодо динаміки процесів тепло- і масопереносу під час плавлення матеріалів. Результати моделювання дають змогу формулювати рекомендації щодо оптимізації відповідних технологічних процесів.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ІНСТРУМЕНТІ ПІД ЧАС КУВАННЯ МЕТОДАМИ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мкртчян Є. А., к.т.н.

ДВНЗ “Приазовський Державний технічний університет”, м. Маріуполь

Кування, безперечно, є однією з ключових технологій в обробці матеріалів, і воно відіграє важливу роль у виробництві різноманітних виробів, починаючи від металевих деталей до складних компонентів мікроелектроніки. Під час кування, матеріал піддається інтенсивному механічному впливу, що може призвести до виникнення значних напружень в інструменті та оброблюваному матеріалі. Дослідження цих напружень та їх впливу на процес кування є актуальною проблемою, оскільки вони можуть вплинути на якість та міцність виробів, а також на термін експлуатації оброблювального інструменту [1].

Мета цієї наукової роботи полягає у моделюванні та аналізі напружень, що виникають в інструменті під час кування матеріалів. Наш дослід враховує різні фактори, такі як температура, швидкість деформації, властивості матеріалів, а також геометричні параметри інструменту. Основна мета цього дослідження - визначити оптимальні умови кування для мінімізації напружень в інструменті та забезпечення якості обробки.

У даній роботі було проведено дослідження щодо моделювання напружень, що виникають в інструменті під час кування матеріалів. Основні висновки цього дослідження можуть бути узагальнені наступним чином:

1. Залежність від температури: Збільшення температури під час кування приводить до зростання максимальних напружень в інструменті. Ця залежність є важливою при плануванні процесу кування та виборі оптимальних умов для певних матеріалів.

2. Швидкість деформації: Висока швидкість деформації призводить до збільшення напружень в інструменті. Ця відомість може бути використана для оптимізації швидкості обробки та підвищення продуктивності.

3. Геометричні параметри інструменту: Геометричні характеристики інструменту, такі як його розмір та форма, мають суттєвий вплив на розподіл напружень під час кування. Важливо враховувати ці параметри при проектуванні інструменту для конкретних завдань.

4. Вплив на якість виробів: Напруження в інструменті можуть впливати на якість обробки та міцність виробів. Розуміння цього впливу дозволяє покращити якість кінцевих виробів і підвищити їхню тривалість служби.

5. Практичний вплив: Результати цього дослідження мають практичне застосування в промисловості та виробництві, де процеси кування є невід'ємною частиною виробництва. Ці результати можуть бути використані для покращення технологічних процесів та оптимізації витрат матеріалів та ресурсів.

Загальні результати цього дослідження вказують на важливість ретельного аналізу напружень в інструменті під час кування для досягнення ефективних технологічних рішень та підвищення якості виробництва.

Літературні джерела

1. Каргин Б.С. Совершенствование технологии изготовления поковки «Остряк»/ Б.С. Каргин, Е.А. Мкртчян // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ "ХПІ", 2010. -№43.- С. 120-125.

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ І СПОЖИВАННЯ ПАМ'ЯТІ ДЛЯ АЛГОРИТМУ ВЗАЄМОДІЇ ЗІРОК НА ГРАФІЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ

Красніков К. С., к.т.н., Дейнека С. В., Лимар Н. М.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Представлено детальне дослідження аспектів продуктивності алгоритму гравітаційного взаємодії тіл при його реалізації на графічних прискорювачах. Алгоритм взаємодії тіл відіграє важливу роль у різних наукових симуляціях, від астрофізики до молекулярної динаміки. Зі зростанням використання графічних прискорювачів для наукових обчислень розуміння поведінки алгоритму в цьому контексті набуває першочергового значення.

Дослідження фокусується на двох ключових показниках продуктивності: швидкості та споживанні пам'яті. За допомогою серії ретельно спланованих експериментів ми систематично аналізуємо час виконання алгоритму та використання пам'яті на різних конфігураціях графічних прискорювачів. Дослідження охоплює різноманітний набір сценаріїв, включаючи різні щільності частинок і сили взаємодії, щоб забезпечити всебічне розуміння поведінки алгоритму за різних умов.

Крім того, ми досліджуємо вплив методів оптимізації на швидкість та споживання пам'яті, щоб визначити стратегії, які підвищують ефективність алгоритму на графічних прискорювачах. Наші висновки не лише дають цінну інформацію про продуктивність алгоритму взаємодії тіл, але й пропонують практичні рекомендації для дослідників і практиків, які прагнуть використовувати графічні прискорювачі для великомасштабних симуляцій.

КОРЕЛЯЦІЙНІ ПОЛЯ КРУТНОГО МОМЕНТУ В ПРОКАТНИХ КЛІТЯХ

Вереньов В. В., д.т.н., Коренной В. В.

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

На базі численних дослідно-промислових вимірювань [1,2] на широкополосових станах встановлена емпірична статистична залежність максимального динамічного моменту M_d при захваті металу валками від моменту M_c в сталому режимі прокатки. Чим більше M_c , тим більше M_d . Ця залежність має вигляд нахиленого кореляційного поля точок M_d, M_c , яке апроксимується лінійною залежністю $M_d(M_c)$. Ширина поля обумовлена межами зміни статичного моменту при прокатці полос різного сорторозміру. На прокатних станах постійно вимірюється тільки електромагнітний момент двигуна, тобто статичний момент, під час прокатки кожної полоси. Визначення залежності M_d від M_c дозволяє вирішувати ряд важливих задач.

1. Прогнозувати максимальний динамічний момент під час освоєння прокатки полос нового сорторозміру підвищених обтиснень, зменшеної температури прокату.

2. Одночасні вимірювання моменту в 2-3-х суміжних клітках прокатного стану з побудовою кореляційних полів M_d, M_c шляхом їх аналізу дозволяє простежити проходження збурень через кліти та більш повно та точніше оцінити якість процесу прокатки та стан обладнання.

3. Враховувати дані емпіричного розподілу статичного і динамічного моменту у розрахунках ресурсу обладнання.

4. Задаючи в математичну модель фактичні значення моменту M_c з урахуванням впливу технологічних збуджень та зазорів шляхом статистичного моделювання визначати максимальні динамічні моменти та розв'язувати задачі згідно п.п. 1 і 2 без проведення тривалих натурних вимірювань.

5. Використовувати характеристики розподілу моментів M_d і M_c – середнього значення, середньоквадратичного відхилення та коефіцієнта варіації з метою визначення стабільності технологічного процесу та стану обладнання.

6. Шляхом прив'язки сорторозмірів до кореляційних полів визначати той з них, при якому динамічні навантаження досягають найбільшого значення і враховувати це при корекції режимів прокатки.

7. З метою підвищення інформативності та достовірності оцінки стабільності технології та стану обладнання доцільно залучати до аналізу додаткові подібні поля для шпindelної ділянки, а також поля статичного навантаження – температура металу та динамічне навантаження – температура прокату. Для цього потрібні вимірювання моменту принаймні на одному з шпindelів і температури металу на вході в досліджувані кліти.

8. Результати дослідно-промислових вимірювань та статистичного моделювання показують, що формування кореляційних полів M_d, M_c становлять характерну особливість для широкополосових та інших станів з вираженим перехідним процесом і сталим режимом прокатки.

Встановлення вищезначеної залежності дозволяє вести постійний моніторинг максимально динамічного моменту по всім кліткам безперервного стану та корегувати при необхідності параметри прокатки в сторону зменшення ударних навантажень.

Літературні джерела

1. Вереньов В.В. Динамические процессы в широкополосных станах горячей прокатки. – Д.: Літограф, 2018. – 158 с.
2. Вереньов В.В., Подобедов Н.И. Статистическое моделирование динамических нагрузок в широкополосных станах. – Днепр: ЛІРА. – 2021. – 74 с.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ШИХТИ І КОРИГУВАННЯ
ХІМІЧНОГО СКЛАДУ РОЗПЛАВУ ЧАВУНУ
(ймовірнісний підхід із застосуванням методу Монте-Карло)**

Сіренко К. А., Мазур В. Л., чл.-кор. НАН України, д. т. н.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Відомі методи вибору компонентів і розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну дозволяють у першому наближенні визначати відсотковий вміст кожного компонента у складі шихти, виходячи із вимог стандарту до хімічного складу чавунного литва та технічних можливостей ливарного виробництва на конкретних підприємствах. Деякі з названих методів передбачають можливість оптимізувати витрати на шихту. Недоліком розповсюджених на практиці методів визначення складу шихти є те, що при їх застосуванні не враховується нестабільність хімічного складу компонентів шихти (металобрухту, феросплавів, карбюризаторів тощо). Це суттєво погіршує достовірність, точність розрахунків шихти і, відповідно, ступінь надійності прогнозування хімічного складу виплавленого чавуну. Відомі методи визначення шихти для виплавлення чавуну полягають в тому, що всі вони орієнтуються на забезпечення середніх величин відсоткового вмісту елементів у складі готового чавуну. Але на практиці випадки хімічного складу готового чавуну за межі, регламентовані стандартом, обумовлюються відхиленнями вмісту будь-якого елемента в менший бік від його мінімального значення у стандарті чи внаслідок відхилення в бік перевищення максимально допустимої величини його вмісту. Навіть при тому, що середні величини відсоткового вмісту елементів можуть співпадати з середніми значеннями відповідних діапазонів їх вмісту, визначених у стандартах чи технічних умовах на чавунні вироби. Зазначене створює значні труднощі для виробників. Саме тому відомі методи розрахунку складу шихти для виплавлення чавуну чи інших сплавів потребують розвитку у напрямі, який позбавляє їх зазначеного недоліку. Враховувати вплив нестабільності хімічного складу компонентів шихти на вміст хімічних елементів у складі виплавленого чавуну дозволяє методика моделювання процедури визначення складу шихти, заснована на ймовірнісному підході із застосуванням методу Монте-Карло [1–4].

Важливо відмітити, що у наукових працях українських вчених О.І. Пономаренко, С.Г. Пелиха з колегами ще у сімдесятих роках минулого століття наголошувалося на доцільності використання при моделюванні ливарних технологічних систем імітаційно-ймовірнісних підходів та методик. Так у книзі [5] Семесенко М.П. і Пелиха С.Г., яка була опублікована у 1975 році, увага науковців і інженерно-технічних фахівців ливарних цехів була акцентована на необхідності поширення застосування ймовірнісно-статистичних підходів у практиці ливарного виробництва. Зокрема – при розрахунках і прогнозуванні параметрів оптимальної шихти для виплавлення залізобуглецевих сплавів. Можна очікувати, що підходи, методології, методика і методи розрахунку складу шихти і регулювання вмісту хімічних елементів у розплаві безпосередньо в процесі виплавлення чавуну, у тому числі із застосуванням методу Монте-Карло [1–4], отримують найближчим часом подальший розвиток.

Літературні джерела

1. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Идеология коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва. Метал та лиття України. 2021. Т. 29. № 4 (327). С. 44–54.
2. Сіренко К.А. Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах. Процеси лиття. 2022. № 1 (147). С. 3–10.
3. Сіренко К.А. Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах. Метал та лиття України. 2022. Т. 30. № 2 (329). С. 20–29.
4. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві. Процеси лиття. 2023. № 3 (153). С. 49–60.
5. Семесенко М.П., Пелых С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. Донецк : Донбасс, 1975. 96 с.

ОПТИМІЗАЦІЯ НАПИСАННЯ КОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК ШЛЯХОМ ЇХ АВТОМАТИЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Соколан К.С., Ларіонов І.В.

Хмельницький національний університет

Досліджувався процес автоматичної генерації кодів обробки деталей на верстатах Roland MDX 40A [1] та HAAS VM3 [2]. З метою оптимізації написання кодів обробки було створено фреймворк в програмному забезпеченні SRP.

Першим етапом автоматизованого написання кодів обробки деталі є створення параметричної моделі в Catia V5. Після аналізу коду в програмі Catia V5 буде створено набір параметрів. Такий набір створюється для присутніх у коді змінних, до яких можна віднести глибину різання, координати положення по осям X та Y, тощо. На цьому етапі відбувається зв'язок наборів параметрів за допомогою формул, в результаті чого будується взаємозв'язок геометрії із кодом. У випадку, якщо використовується автоматизований метод генерації NC-кодів, то вони генеруються автоматично. Таким чином після проведеного аналізу коду для будь-якого із вимірів виробу та/або деталі у оператора є можливість згенерувати нові коди у випадку зміни розмірності моделі. Змінити розмірність моделі можна шляхом зміни основних її параметрів.

Генерування коду відбувається автоматично в текстовому форматі, після чого його можна змінити на формат файлу «.NC» для подальшого запуску на верстаті з ЧПК. Такий підхід буде також використовуватись для верстату з ЧПК HAAS VM 3. Використання цього коду призводить до моделювання на панелі дисплея верстату з ЧПК відповідної симуляції та перевірки точності написаного коду.

Основним недоліком генерації кодів ручним методом за допомогою CATIA V5 є те, що у випадку зміни будь-яких параметрів моделі або її розмірів, процес створення коду необхідно повністю проводити з першого до останнього етапу, тобто вибір поверхонь і площин, процес обробки, тощо. Іншим недоліком при генерації кодів з CATIA V5 є те, що ці коди достатньо довгі і містять від 300 до 2500 рядків.

Дослідження проводились для декількох типових деталей, а саме: корпус із отвором по центру, порожнистий циліндр, корпус із трьома отворами різного радіусу, корпус із трьома отворами однакового радіусу та піраміда. В результаті було порівняно ручний метод формування кодів обробки деталей та автоматизованим методом.

Для корпусу із отвором ручний метод коду обробки, сформований в CATIA V5 містив 388 рядків коду, а автоматизованим методом – 32 рядки коду. Обробка порожнистого циліндру призвела до зменшення рядків коду з 267 штук до 50. Корпус із отворами різного радіусу – 432 рядки ручним методом та 53 рядки автоматизованим методом. Корпус із отворами однакового радіусу – 418 рядків та 45 рядків відповідно. Піраміда – 1206 рядків та 142 рядки відповідно.

Після проведення аналізу щодо генерації кодів для деталей ручним та автоматизованим методом, можна відмітити, що такий метод є більш оптимальним для обробки деталей, оскільки код обробки деталі автоматизованим методом зменшується в декілька разів у порівнянні із кодом, який формується в програмному забезпеченні Catia V5. Крім того, використання такого методу має більший рівень гнучкості програм обробки деталей, оскільки при зміні параметрів моделі у програмі, в якій створювалася геометрія деталі, згенерований автоматично код обробки деталі буде змінюватись без втручання оператора верстату з ЧПК.

Літературні джерела

1. Фрезерно-гравіювальний верстат MDX-40A. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rdm24.ua/products/frezernye-stanki/mdx-40a/>
2. VM3. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.haascnc.com/ps/machines/vertical-mills/mold-machines/models/vm-3.html>
3. Міранцов С.Л. Системи автоматизованого проектування верстатів з ЧПК: навчальний посібник. / С.Л. Міранцов, В.І. Тулупов, С.Г. Онищук, Ю. Б. Борисенко, Є. В. Мішура, О. С. Ковалевська – Краматорськ: ДДМА, 2011. – 152 с.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ РОЗПЛАВУ В ПРОМКОВШІ

Красніков К. С., к.т.н., Крихта А. О.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Дослідження використовує нову програмну платформу, призначену для поглибленого вивчення гідродинаміки розплаву в промковшах, що є ключовим компонентом металургійних процесів. Інтерактивний веб-сайт надає зручний інтерфейс для дослідників і практиків для візуалізації та аналізу складних моделей течії розплавленого металу під час розливних операцій.

Завдяки інтеграції параметрів, визначених користувачем, і сценаріїв, що налаштовуються, веб-сайт дозволяє користувачам досліджувати різні умови експлуатації та оцінювати їх вплив на динаміку течії розплаву.

Ключові функції веб-додатку включають результати моделювання, 3D-візуалізації та комплексні інструменти аналізу даних. Дослідники можуть отримати цінну інформацію про теплові та флюїдні характеристики розплаву, що полегшує оптимізацію конструкції промковша для підвищення продуктивності розливання. Крім того, платформа сприяє співпраці та обміну знаннями в металургійному співтоваристві, дозволяючи обмінюватися імітаційними моделями і результатами.

Ця стаття підкреслює важливість веб-інструменту для поглиблення розуміння гідродинаміки розплаву, що в кінцевому підсумку сприяє вдосконаленню процесів розливання в металургійній промисловості. Доступність і універсальність платформи роблять її цінним ресурсом як для академічних кіл, так і для промислового застосування, сприяючи інноваціям і підвищенню ефективності в галузі металургії.

ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОДИНАМІКИ В АЕРОТЕНКУ

Красніков К. С., к.т.н., Дудник С.В.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

У статті досліджуються передові технології розробки програмного забезпечення для дослідження гідродинаміки в аеротенках, критично важливому компоненті міських очисних споруд. Дослідження фокусується на інтеграції обчислювальних інструментів для моделювання та аналізу складної динаміки рідини в аеротенку, що має на меті покращити наше розуміння процесу аерації та оптимізувати його ефективність.

Запропоноване програмне забезпечення використовує найсучасніші мови програмування, такі як C#, та потужні бібліотеки, такі як ASP.NET, для представлення гідродинамічних симуляцій. Графічний інтерфейс користувача, розроблений з використанням ASP.NET MVC, полегшує взаємодію з користувачем, дозволяючи дослідникам легко вводити параметри та візуалізувати результати моделювання.

Значення цього дослідження полягає в тому, що воно може революціонізувати сферу очищення стічних вод, надаючи комплексну віртуальну платформу для дослідження гідродинаміки. Використовуючи алгоритми машинного навчання, програмне забезпечення має на меті інтелектуально аналізувати дані, виявляти закономірності і сприяти розробці оптимізованих стратегій аерації.

Зроблено висновок про актуальність роботи у вирішенні поточних проблем очищення стічних вод, підкреслено потенційне зменшення впливу на навколишнє середовище, ефективне управління ресурсами та створення цифрової платформи для спільних досліджень у галузі гідродинаміки.

УДК 669.712.04

ВПРОВАДЖЕННЯ НАЙКРАЩИХ ДОСТУПНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ТЕРМІЧНИХ ПЕЧАХ В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ ВИКОПНОГО ПАЛИВА**Єр'омін О. О., д.т.н., Гупало О. В., к.т.н.****Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро**

В умовах дефіциту викопного палива (природного газу) в Україні актуальними стають питання впровадження найкращих доступних технологій в металургії та реконструкції металургійних теплових агрегатів- основних споживачів палива [1]. Зменшення споживання викопного палива забезпечує зниження викидів в атмосферу парникових газів і є важливим аспектом на шляху інтеграції України до Європейської спільноти. З реалізацією Директиви 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради «Про промислове забруднення» пов'язані кроки України в майбутнє та її економічна та енергетична незалежність.

Важливим напрямком екологізації теплових агрегатів є використання відновлювальних джерел енергії для генерації теплоти, необхідної для здійснення технологічного процесу. В якості перспективних джерел енергії найчастіше розглядають відновлювальні водень та електричну енергію. Переведення теплових агрегатів на опалення воднем потребує реконструкції систем опалення та АСУ ТП агрегатів, але майже завжди забезпечує потрібні технологічні параметри процесу [1], в той час як застосування електроренергії вимагає або повної заміни технології теплової обробки, або значну реконструкцію існуючого обладнання з проробкою питань забезпечення необхідних продуктивності та якості теплової обробки.

Авторами досліджено теплову роботу прохідної печі для термообробки труб при її опаленні природним газом та розроблені технічні рішення щодо заміни природного газу відновлювальним воднем або переведенням печі на електронагрів. Під час виконання дослідження: розроблено математичну модель теплової роботи газової прохідної печі для термообробки пакетів труб відповідно заданому режиму; виконано адаптацію математичної моделі за результатами експериментального нагріву садки металу та балансових випробувань печі при її опаленні природним газом. За допомогою розробленої моделі досліджено теплову роботу печі при її опаленні воднем і визначено її техніко-економічні показники та розроблено рекомендації щодо реконструкції системи опалення печі при заміні палива.

Для оцінки можливості переведення печі на електронагрів без зміни габаритних розмірів її робочої камери розроблено математичну модель теплової роботи печі, температурні режими печі для референтних садок металу, визначено техніко-економічні показники печі та розроблено рекомендації щодо вибору її конструктивних та експлуатаційних параметрів. А саме, змінено кількість та довжину зон регулювання, визначено їх теплову потужність, здійснено вибір типу та розмірів електричних нагрівачів, а також їх розташування в робочому просторі печі.

Порівняльний аналіз техніко-економічних показників газової та електричної печей дозволив зробити наступні висновки. Використання водню в якості палива дозволяє повністю реалізувати задані режими термообробки при заданій продуктивності печі і без урахування капітальних витрат на реконструкції є економічно доцільним при співвідношенні цін на природних газ та водень не більше ніж 2,9. Переведення печі на електронагрів може бути забезпечено лише при зменшенні продуктивності печі на 20 % при термообробці окремих типів садки металу. Якщо в якості енергоносіїв розглядаються відновлені джерела енергії, то відмова від застосування природного газу забезпечить зниження викидів діоксиду вуглецю на 765 кг/т металу.

Літературні джерела

1. Gupalo O. Study of the efficiency of using renewable hydrogen in heating equipment to reduce carbon dioxide emissions / O. Gupalo, O. Yeromin, L. Kabakova et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. –2003. – Vol. 1156, 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/1156/1/012035

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ ПРИ НАГРІВАННІ ДУТТЯ В ПОВІТРОНАГРІВАЧАХ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Грес Л. П.¹, д.т.н., Гупало О. В.¹, к.т.н., Єрьомін О. О.¹, д.т.н., Кабакова Л. Б.², к.т.н

¹ Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

² Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро

Для опалення доменних повітрянагрівачів використовується доменний газ. Теплота згоряння доменного газу не забезпечує досягнення заданої температури під куполом повітрянагрівачів 1300–1350 °С, і тому його, зазвичай, збагачують природним газом. Досягти заданої температури під куполом можливо іншим шляхом – опалювати повітрянагрівачі доменним газом, але замість збагачення його природним газом, подавати на спалювання палива повітря, збагачене технологічним киснем.

В роботі розглянуто обидва способи підвищення температури під куполом повітрянагрівачів та виконано дослідження впливу цих способів на валові викиди оксидів азоту, що утворюються під час спалювання палива. Розрахунки виконано для умов роботи повітрянагрівачів доменної печі об'ємом 1513 м³ для наступних початкових умов:

- температури під куполом повітрянагрівача прийняті 1300 та 1350 °С;
- склад доменного газу (об'ємні відсотки): CO₂=15,95 %; CO=22,55%; H₂=3,37%; N₂=44,39%; H₂O=13,74%;
- теплота згоряння доменного та природного газів, відповідно, 3 228 та 36 275 кДж/м³;
- витрата доменного газу на опалення одного повітрянагрівача 25 000 м³/год;
- витрати дуття, що нагрівається, однакові для обох варіантів, що розглядаються.

Визначено, що для забезпечення температур під куполом 1300 та 1350 °С при опаленні повітрянагрівачів природно-доменною сумішшю теплота згоряння суміші повинна складати, відповідно 4 550 та 5 013 кДж/м³. При цьому частка природного газу в суміші повинна дорівнювати відповідно 4,0 та 5,4 %. При опаленні повітрянагрівачів доменним газом і збагаченні повітря горіння киснем досягнення заданих температур під куполом повітрянагрівача можливе при вмісті кисню в повітрі горіння 23, 4 та 32, 3 % відповідно.

Для умов спалювання палива, що розглядалися, за допомогою залежностей, наведених в роботі [1], виконано розрахунок концентрацій оксидів азоту (NO_x) при заданих умовах спалювання палива, які складають відповідно 44,5 мг/м³ при температурі під куполом 1300 °С та 79,0 мг/м³ при температурі під куполом 1350 °С і майже не залежать від способу підвищення температури під куполом повітрянагрівачів, так як умови спалювання палива залишаються майже не змінними.

Чисельне моделювання теплообміну в насадці повітрянагрівача, яке виконано за методикою, наведеною в роботі [2], дозволило визначити витрати палива на опалення повітрянагрівачів, технологічного кисню та димових газів, а також розрахувати валові викиди оксидів азоту. Визначено, що для забезпечення однакових умов теплообміну в насадці повітрянагрівачів необхідно забезпечення однакових витрат димових газів через насадку незалежно від способу опалення, що розглядається. Таким чином валовий викид оксидів азоту при збагаченні доменного газу природним, або при збагаченні повітря горіння технологічним киснем практично не відрізняються і складають 50,75 т/рік при забезпеченні температури під куполом повітрянагрівачів на рівні 1300 °С та 94,67 т/рік при температурі під куполом 1350 °С. Таким чином обидва варіанти спричиняють однаковий вплив на довкілля.

Літературні джерела

1. Кун П. Исследование горячей печной атмосферы в промышленных печах и топках / П. Кун, Д. Зукер // Черные металлы. – 1988. – № 5. – С. 26-31.
2. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья / Под общ. ред. Л. П. Греса. – Дніпро: НМетАУ, 2001. – 612 с.

ПЛАВЛЕННЯ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНОГО МЕТАЛУ – ЯК СКЛАДОВА В ВИРІШЕННІ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ НА МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Машиністов В. Є., к.т.н., Романько Я. В., к.т.н., Мєшкова А. Г., Сухарева М. В.

Український державний університет науки і технологій

На металургійних підприємствах може поступати металобрухт, забруднений радіонуклідами як природного, так і штучного походження. При цьому може створюватись реальна загроза впливу підвищеного рівня радіації на персонал підприємства та населення на прилеглих до нього територіях.

Як показано в [1,2], одним із ефективних способів попередження необґрунтованого погіршення екологічної обстановки на підприємстві є плавлення металу в печі, яка функціонує в штатному режимі, причому вхідну сировину попередньо не дезактивують.

В процесі плавлення радіонукліди перемішуються та розподіляється в об'ємі розплаву рівномірно. Таким же залишається цей розподіл у виробках, виготовлених із цього металу.

Реалізація підходу, що запропонований дозволяє вилучити радіоактивні забруднення із сфери їхнього безпосереднього контакту із людиною та, відповідно, попередити і виключити можливість її необґрунтованого опромінення та забруднення навколишнього середовища.

Літературні джерела

1. Балакин В.Ф., Машинистов В.Е., Коверя А.С. Перспективная технология рециклинга радиоактивно загрязненного металла на основе его плавления // Ядерная та радіаційна безпека. – 2018. - №2(7,8), - С.43-48.
2. Балакин В.Ф., Машинистов В.Е., Коверя А.С., Лукін Є.В. Промислова технологія утилізації насосно-компресорних труб, що забруднені природними радіонуклідами, на основі їх плавлення. // Нафтогазова галузь України. – 2019. - №4. С.33-37.