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 $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_{0.8}B_{0.6}$ 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 десульфурації	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 дрібносортного 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 стальної 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 ліквації 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 підвищенної міцності у мотках	72
Чорноіваненко К. О., Мовчан О. В. Формування коміркової структури міжфазної поверхні при стаціонарній α→γ перекристалізації феритних сплавів заліза	73
Прогресивні технології обробки металу тиском	74
Ключніков К. Ю., Приходько І. Ю., Раздобрєєв 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 стана	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
Мктрчян 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 клітях	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., Мєшкова 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 най розповсюдженіших 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 окисленні 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 розплаву 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.

УДК 669.184

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 збільшення 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 збільшені 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.

УДК 669.184

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 CO до CO_2 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.

УДК 669.162.21: 662.6/9: 669.7.001.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВДУВАННЯ ВОДНЮ В ДОМЕННУ ПІЧ НА ВИКИДИ CO_2 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 XX 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 доменної 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 CO_2, техніко-економічні, теплові та ексергетичні показники доменної плавки.

Встановлено, що збільшення витрати водню на кожні ~50 $м^3$/т дозволяє зменшити вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю на 2,4-2,6%, а застосування водню в кількості ~600 $м^3$/т дозволить зменшити викиди CO_2 на 33,4-33,7%. Окрім зменшення викидів CO_2, застосування водню в доменній печі дозволяє зменшити витрати коксу на 0,46-0,48% на кожні 10 $м^3$/т H_2, що еквівалентно зменшенню витрат коксу на 0,22-0,25 кг/$м^3$ водню. Таким чином, вперше аналітичним шляхом встановлено коефіцієнт заміни коксу воднем при застосуванні водню в доменній плавці – 0,22-0,25 кг/$м^3$.

За результатами дослідження визначено, що спільне вдування в горн доменної печі водню та ПВП дозволяє вирішити одночасно два завдання: зменшення викидів CO_2 (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 непрямим шляхом, а значить і мінімальної витрати палива при досягненні r_d=0%:

- при витраті водню 585-600 $м^3$/т та коксу 378-401 кг/т;
- при витраті ПВП 100 кг/т, водню 500 $м^3$/т та коксу ~329 кг/т;
- при витраті ПВП 150 кг/т, водню 485-500 $м^3$/т та коксу 268-289 кг/т;
- при витраті ПВП 200 кг/т, водню 450-485 $м^3$/т та коксу 228-251 кг/т;
- при витраті ПВП 250 кг/т, водню – 421-450 $м^3$/т та коксу 191-212 кг/т.

Вдування в горн попередньо нагрітого водню відкриває значні резерви зменшення викидів CO_2 та витрати коксу. Підігрів водню в кількості 100-500 $м^3$/т на кожні 100°С дозволяє зменшити прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO 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 CO_2 та зменшення витрати коксу та інших паливних добавок в доменній печі.

УДК 669.162

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 газопорошокового 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 пузиркового 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 пузирі відбувається на значній відстані від сопла фурми.

У даній роботі досліджено вплив конфігурації робочого простору (РП) наконечника на кут розкриття та довжину горизонтальної дільниці 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 дільниці, 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 струменю 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.

УДК 669.187.56.001.1

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 ліквацийних і усадкових процесів і, як наслідок – фізичної та хімічної неоднорідності литого металу. При подальшій термомеханічні обробці неоднорідність зливка успадковується поковкою і напівфабрикатами, які отримується 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 ($Na_2S_2O_3$) який твердіє по дендритному механізму. Температура плавлення тіосульфату натрію має складає 48,3 °С 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 термопарами. 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 ліквацийних процесів. При цьому помітного впливу ЕШО на структуроутворення нижньої частини модельних зливків (від донної частини до висоти 0,5...0,6×$H_{зл}$, де $H_{зл}$ – 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×$T_{пм}$ (де $T_{пм}$ – температура плавлення металу) і підживленні рідким металом з температурою 1,2×$T_{пм}$ 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.

УДК 62-408.6

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 проявляєтеся до непрямим магнітним методам контролю напружено-деформованого стану (НДС) стальних конструкцій. Які засновані на тісній кореляційній залежності магнітних та механічних властивостей параметрів металу. Запропонований метод контролю вимірювання НДС за допомогою величини коерцитивної сили Нс 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 нижні частині балки через 0,6 метрів та в зоні кріплення гідроциліндрів.

За результати вимірювання встановлено, що вище точки Нс=6,7А/см, пластичної деформації Q= 5,6 т знаходяться деформовані ділянки балки. Коерцитивна сила у зоні кріплення циліндрів ділянок досягає величини Нс 7,8-7,9 А/см, 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 слідуючи ремонтні роботи:

- розроблені тріщини та виконано їх зварювання;
- встановлені металеві накладки в зоні кріплення гідроциліндрів, товщиной, δ = 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 Нс вище певного значения (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. Агиней Р.В., Кузьбожев А.С. Особенности контроля технического состояния газопроводов по коэрцитивной силе металла. // Контроль, Диагностика №1.2006. С 18-24.

УДК 669.162.2

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.

УДК 621.7:666.76.001.8

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.

УДК 669.184

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].

УДК 669.162

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 десульфурації 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 міксера. Склад першого («первинного») суттєво відрізняється від складу доменного шлаку та характеризується зниженою основністю й незначною сульфідною ємністю.

Шлак після десульфурації чавуну складається із залишків первинного та продуктів реакцій видалення та перерозподілу сірки, залишків незасвоєнного вапна (CaO, MgO, CaS та ін.). Внаслідок протікання масообмінних процесів $CaO \rightarrow MgS_{тв} \rightarrow CaS \rightarrow MgO$ хімічний склад та фізичні властивості шлаку безперервно змінюються. Видалення шлаку після десульфурації ускладнене збільшенням його обсягу, зміни консістенції та необгрунтованими 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 сієніту, алюмінату кальцію та ін.), що містять принаймі один з компонентів сформованого ковшового шлаку системи $CaO\text{-}SiO_2\text{-}MgO\text{-}Al_2O_3$.

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 десульфурації 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 ($CaO{\cdot}SiO_2+CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$+тридиміт; $CaO{\cdot}SiO_2+CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2+2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$), на відміну від покровних шлаків ковшової десульфурації чавуну з інжекцією сумішей на основі CaO та магнію, плавляться при температурі ~1300 ^{0}C. 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 десульфурації: 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 десульфурації 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 ($ШАКП_1$) з підвищеним вмістом CaO та вмістом сірки від 0,2 до 0,9%. Склад шлаку $ШАКП_1$, %: 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 $ШАКП_1$ 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 $CaO/SiO_2=1$) утворення CaS уповільнене внаслідок відсутності

вільних іонів O^{2-} й потребує додаткових витрат вапна. Введення $ШАКП_1$ 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 адсорбіціна ємність залежить від ступеня структурно-хімічного розпорядження [1]. Відомо, що присадки MgO та Al_2O_3 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 $ШАКП_1$ 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 (Λ), запропонованої Duffy та Ingram. Для розрахунку величини Λ використані моделі, запропоновані Duffy *et al.*, Tsao *et al.*, Hao & Wang, Sosinsky & Sommerville, Young *et al.*, Znang *et al.*, Shankar *et al.* При розрахунках Λ та визначенні змін фізико-хімічних властивостей враховували основні компоненти шлаків (CaO, SiO_2, Al_2O_3) та присутність до 10% MgO. Використані моделі дають відмінні результати (значення $\log C_s$) для модифікованих введенням $ШАКП_1$ 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 покровного шлаку з використанням CaO та Al_2O_3-містячих відходів.

УДК 621.74.669.13.017

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 орієнтуються на забезпечення середніх величин відсоткового вмісту елементів у складі готового чавуну. Але на практиці випади 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 виробничників. 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 залізовуглецевих 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], отримають найближчим часом подальший розвиток.

Літературні джерела

1. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія 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.

УДК 669.162.21.27.012.3

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 залізорудної порції по радіусу колошника у якості управляючого параметру може бути використана уставка розташування дози цього компоненту 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.

УДК 669.051

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: багатої руди (Mn/Fe ≈ 6), залізомарганцевого концентрату з високим вмістом заліза (Mn/Fe ≈ 1,6) та залізомарганцевої руди з відносно високим вмістом заліза та фосфору (Mn/Fe ≈ 2,3, P/Mn ≈ 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 металевої 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 CO виділення металевих частинок не відбувається, залізо відновлюється тільки твердим вуглецем і лише в силікатній фазі.

При підвищенні температури та часу витримки зразків у атмосфері CO відновлюється як залізо, так й фосфор, а у багатій руді – частково ще й марганець. При ще більшій тривалості витримки зразка в атмосфері CO 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 ^{0}C рудах виявляється виділення металевого заліза. При цьому відновлення монооксидом вуглецю CO 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 CO 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 CO 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.

УДК 669.181.4

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.

УДК 669.013:621.746

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.

УДК 669.162.262.4:622.78

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 $\alpha_{шахт}$ = 81–83° при максимальних кутах нахилу заплечиків – $\alpha_{запл}$ = 74–76°. 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 карбідкремнієвою 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 карбідкремнієвою 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 $CaO + MgO = 53{,}8–54{,}5$ 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 збільшені частки окатишів понад 40-50 %, можуть виступати частково офлюсовані окатиші, у тому числі, з підвищеним вмістом магнезії.

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.

УДК 669.1.061.6

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 України 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 Україні 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) (GMK 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 (Специальный доклад МГЭИК 2018). Ця технологія ґрунтується на стратегії рециркуляція доменного газу за рахунок його повернення у саму доменну піч, що дозволяє скоротити викиди CO_2 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 отримували 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 газі (Chaika et al. 2022). Теоретично заміна вуглецю на водень може дозволили 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 CO_2 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 України.

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

Специальный 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.

УДК 669.17.046.517В:53.001.57

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 покрову, 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 forma tion 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.

УДК 669.169

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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 в енергетиці та транспорті до порівнянних з металургією значень.

Раціональний 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 CO_2. Оскільки ефект переробки брухту компенсує викиди CO_2 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.

Електрометалургія

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

Адитивне виробництво, зокрема вибіркове 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 утворюється 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%, відносне 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.

УДК 668.048:623.552:622.23

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ CO-CR-MO, 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 «Адитивні 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 «Адитивні 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 знеміцнення та окрихчення виробу.

УДК 668.047:624.382

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-принтінгу 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.

УДК 668.049:623.585:621.19

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.

УДК 669.[017.15+058]

ФАЗОВИЙ СКЛАД ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_{0.8}B_{0.6}$ 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 $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_{0.8}B_{0.6}$.

Досліджуваний 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 $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_x$ показав, що він кристалізується з утворенням простих твердих розчинів на основі фаз з ОЦК- і ГЦК-структурами, періоди гратки 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 $ОЦК_1$ та $ОЦК_2$ з періодами гратки 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 граток 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 технології, м. Дніпро

Десульфурація 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 десульфурації. 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 однієї 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.

Ємпірічні 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 кластерізація 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 десульфурації за допомогою CaC_2 у торпедному ковші. Загальна швидкість десульфурації 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 металевої фази.

Zou [2] запропонував модель десульфурації чавуну за допомогою CaC_2, Mg або їх суміші. Вважалося, що десульфурація, при застосуванні CaC_2, складається з тимчасових і постійних реакцій, тоді як реакції магнію з розчиненою 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 приближено до параболічній траєкторії, яка перевершувала траєкторію CaC_2.

Українськими спеціалістами в Інституті чорної металургії стосовно технології десульфурації зернистим магнієм , удосконалена інтелектуальна система підтримки приняття рішень по керуванню технологічними процесами обробки чавуну шляхом розробки інформаційно-математичного забеспечення для Експерної системы «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 вивчається розподілення газового потоку, пермішування вани, поведінка газопорошкового струменю, заглиблення часток реагенту, поведінка будьбашок. Різними авторами стосовно обраної технолгії проведено ряд досліджень на основі фізичного моделювання процесу десульфурації.

Tripathi 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 використовуванні 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.Елисеев, 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. Єлісєєв, І. О. Маначин, А. П. Шевченко, С. А. Шевченко. // Сб. научн. пр. ИЧМ «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії», 2022. – Вип. 36. – С. 172

УДК 669.18.046.517:621.746

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; PM – пульсаційне перемішування (спосіб вакуумування)).

З врахуванням проаналізованих даних для умов конвертерного цеху ПрАТ «Каметсталь» рекомендовано до подальшого розгляду в якості прийнятного 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.

УДК 669.17.046.517В.083.133

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 металевого, 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 іонообміних 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 плавок 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: $\Delta Zc^S = Zc^Sмет - Zc^Sшл$. 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 $lgL_{Sфакт} = f(\rho_{шлаку}, \Delta Zc^S)$ $R^2 = 0,7$, що підтверджує продовження протікання кооперативних іонообмінних процесів у них, на відміну від плавок 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 метало споживачами.

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.

УДК 669.162.267.6

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

Шевченко А. Ф., д.т.н., Маначин И. 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 :

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

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

$q_{Mg} = 0,200 + 7,0(S_{поч} - 0, 02) + (\ln (0,02) - \ln (S_{кін}))/9,1$ *– 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 И.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 И.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 стаціонарної 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 процессовна 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. Совершеннствование систем автоматического управления мнгогосвязаными 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: Навчальній посібник. Україн. Держ. Ун-т науки і технолог.-Дніпро, 2022.-124 с.
4. Єгоров О.П., Михайловський М.Н. Проектуваннясистем управління в середовищі Fuzzy Logic Toolbox : Навчальний посібник. – Дніпро: НМетаУ,2020. – 85 с

УДК 628.5:669

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 леткі 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.

УДК 675.285 : 627.36.008.84

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-вимірюючий 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.

УДК 621.771: 685.5

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 дрібносортного 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 багатофакторного 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 $\overline{V}_0$ прокатки, швидкості $\overline{V}_1$ та $\overline{V}_2$ – першої та другої секцій рольгангу та довжина стрижнів, яке після визначення значущості коефіцієнтів набуло вигляду

$$\Delta S = 2{,}62 + 0{,}39\overline{V}_1 + 0.42\,\overline{V}_2 + 0.07\overline{V}_1\overline{V}_2 - 1.5\overline{V}_0,$$

де $\overline{V}_0$, $\overline{V}_1$ та $\overline{V}_2$ 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 дрібносортних 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.

УДК 621.771.23

УДК 621.771.23

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.

Металознавство та термічна обробка сталі

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).

УДК 621.74:669.13.017

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 уможливлює 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.

УДК 532.64:669.046

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.

[1]Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро
[2]Дніпропетровська 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 спостерігалося. 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 Al_2O_3 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

УДК 539.385.016.3.01

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.
[1]Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро
[2] Інститут 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_d), 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 металевого 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 зміні 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.

УДК 669.018.294:620.19

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=3·10^6 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 βс, 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: сульфіди (Fe, Mn)S, FeS-MnS → корунд і шпінелі Al_2O_3, $MgO·Al_2O_3$, $MnO·Al_2O_3$, $(Mn, Mg)O·Cr_2O_3$ → силікати SiO_2, $MnO· SiO_2$, $FeO·SiO_2$ → 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 $S_к$, 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.
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.

УДК 668.01-122.51: 631.4.005.13

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. Відносне 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. Відносне 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.

УДК 669.162.262:669.131.6.001.5

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

Кристалізація високовуглецевих чавунів (більше 2,8–3,0% С) призводить до зворотної ліквації 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% С) кремнійвмісних чавунах ліквація кремнію пряма: у серцевині дендритних гілок кремнію менше, ніж у матриці графітної евтектики та на периферії колоній. У маловуглецевих чавунах ліквація кремнію в евтектичних колоніях порівняно невелика і виявляється складніше, ніж у високовуглецевих чавунах.

Утворення графіту відбувається у ліквацийних ділянках, збагачених кремнієм та вуглецем. Причини графітизуючої дії в ліквацийних 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 ліквації, тобто вони збагачують периферійні ділянки дендритних гілок та евтектичних колоній. Ni, Cu і Al подібно до кремнію схильні до зворотної ліквації 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 ліквації 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.

УДК 621.771.23.09

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.

[1]Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства Юстиції України, м. Дніпро
[2]Український 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 $\sum 3^n$, 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 Σ3 60° <111> в структурі сталі 01ЮТ, деформованої в аустенітній та феритній областях температур з охолодженням на повітрі. Встановлено, що вміст спеціальних границь Σ3 60° <111> в структурі сталі 01ЮТ досягає максимального значення 13,2% після прокатки в аустенітній області із ступенем деформації 32,3%. Збільшення вмісту спеціальних гграниць Σ3 60° <111> в структурі сталі, обробленої за один прохід при температурі 970-980°С, в зрівнянні з деформацією за два проходи та закінченням прокатки в феритній області при температурі 730-740°С (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. T. 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 α+γ фазовим станом. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2017. № 3. С. 10-21. ISSN 2312-2676.

УДК 621.785:669.15-194:669.1.017

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 аустенітизації 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°С до 1050°С 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°С, 950°С і 1050°С, 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°С має значення в середньому 4 мкм, від 950°С – 10 мкм, та для гартування від 1050°С – 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 ліквацийних ділянок, при цьому загальна середня мікротвердість сталі знижується з 4060 МПа при нагріву 850°С, 3960 МПа – при 950°С, до 3894 МПа для 1050°С. 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 1050ºС 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°С, що дасть змогу додатково економити ресурси.

УДК 620.194.22

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 покривом. 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 pH близьким до нейтрального (розчин NS4 складу: 0,122 г/л KCl + 0,483 г/л $NaHCO_3$ + 0,181 г/л $CaCl_2$ + 0,131 г/л $MgSO_4$, pH 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/м^2, 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 $\psi_п$ до відносного звуження у розчині $\psi_р$) 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.

УДК 621.791.753.5:620.194.22

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 кромок розміром 90°×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; $V_{пд}$=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°С становила 199 та 150 Дж,см^2, що вище, ніж для основного металу (128,3 Дж/см^2).

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 бейніті 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 $NaHCO_3$ + 0,181 $CaCl_2$ + 0,131 $MgSO_4$). 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 металі, 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 10ГФБ 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 $\psi_п$ до відносного звуження у розчині $\psi_р$). 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) HV_5, металу шва (210-225) HV_5.

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).

УДК: 669.14.017:620.18:669.046.001.5

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]

[1]ТОВ «Адитивні лазерні технології України», м. Дніпро, [2]Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м Дніпро, [3] Інститут 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/мм^2, 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 лазеру 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/мм^2, а при контролі в поперечному перерізі даної ділянки твердість складала 286…317 кг/мм^2, 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 стовпчастих 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 лазеру.

УДК 621.774.35

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 ø20х80 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 100CX і JXA-50F; нанотвердість сталевої 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 сталевої 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 сталевої 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.

УДК 669.15-194.55:669.112.227.34:005

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 недосконаліть 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

УДК 669-413:112.227.333

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,
[2]Український 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°С, 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. Bojarski 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. Incresing the fracture toughness of a maraging steel type alloy. *Metallurgical and Materials Trans actions*. 1976. Vol. 3, no. 7A. P. 465–468.
4. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels. London : The In- stitute of Materials, 2001. 460 p.
5. Garcia-Mateo C., Sourmail T., Caballero F.G., Smanio V., Kuntz M., Ziegler C. Nanostructured steel industrialisa- tion: plausible reality. *Mater. Sci. Techn*. 2014. Vol. 9, no. 30. P. 1071–1078
6. Goulas C., Mecozzi M.G., Sietsma J. Bainite formation in me- dium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. Metallurgical and Materials Transactions. 2016. No. 47A. P. 3077–3087.

УДК 669.15′.-74.-194-15.669.17

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 аустенитизацією. 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 Ac_3) 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 аустенітізацією. Міцність та ударна в'язкість значно перевершують ці характеристики після покращення. Дещо 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 ºС 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 860^0С і витримки 10 хв при 350^0С, 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. Петруненков 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.

УДК 669.15-194:621.785:669.112.227.1

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 становить до ~ 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 Х12.

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 38ХН3МФА, 4Х5МФ1С, Х37CrMoV5-1, 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.

УДК 621.762.5

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 залізовуглецевих 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:

$$Al + \frac{2}{3}\ BN \rightarrow \frac{2}{3}\ AlN + \frac{1}{3} AlB_2 \qquad (1)$$

$$Al + \frac{12}{13}\ BN \rightarrow \frac{12}{13}\ AlN + \frac{1}{13}\alpha AlB_{12} \qquad (2)$$

$$Al + BN \rightarrow AlN(B) \qquad (3)$$

Фазовий склад отриманих композитів буде відповідно cBN, AlN, AlB_2 у першому випадку, cBN, AlN, AlB_{12} у другому і cBN, твердий розчин бору в AlN (Al(NB)). Кожен з варіантів має свої переваги та недоліки. Перерахуємо їх:

Композит1 складу cBN, AlN, AlB_2. 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 AlB_2 при температурах вище 1000 °С за схемою AlB_2 AlB_{12}+Al.

Композит 2 складу cBN, AlN, AlB_{12}. 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.

УДК 669.15-194.57:620.18

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 розміщають у спеціальних контейнерах, що містять поглинальний і затримувальний елементи. Матеріали, які використовують для виготовлення контейнерів повинні відповідати певним вимогам: сталий 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 04Х14Т3Р1Ф, 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 04Х14Т3Р1Ф, 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 04Х14Т3Р1Ф. За допомогою запропонованої методики пробопідготовки в сталі 04Х14Т3Р1Ф була виявлена структура, достовірність визначення якої додатково підтверджена результатами мікрорентгеноструктурного та мікроренгенспектрального аналізів.

УДК: 621.771.294:006.083.133

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: сульфіди, 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.

УДК 669.162.262:669.131.6.001.5

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.

УДК 621.762.5

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 основується 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, TiB_2) – 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 N_2), крім того, при виборі варіантів реакцій взаємодії враховували дані рентгеноструктурного аналізу спечених композитів.

Розрахунок енергії Гіббса виконувався в наближенні $\Delta Cp = 0$. Залежність енергії Гіббса від тиску $(dG/dp)T = V$ встановлювалась з врахуванням об'ємного ефекту плавлення алюмінію $\Delta V = 0{,}724$ $см^3 * моль^{-1}$. Стисненням фаз нехтували, так як його ефект в таких реакціях малий. Таким чином, вплив високого тиску на енергію Гібса для всіх вказаних реакцій визначались тільки об'ємним ефектом плавлення алюмінію і об'ємним ефектом реакцій:

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

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.

УДК 669.1

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ ПІДВИЩЕННОЇ 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 будівничий 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/мм^2 (А500С за ДСТУ 3760, Bst 500/550 за DIN 488 - Німеччина, В500В 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 межи плинності по довжині стрижня (розкату) в діапазоні 350-550 Н/мм^2, 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 межи плинності 350-450 Н/мм^2 (термічне зміцнення не застосовується), а за допомогою наступної холодної деформації доводять цей показник до рівня 500-600 Н/мм^2. Тобто, таким чином, здійснюють додаткове зміцнення. Технологія холодної деформації реалізується на спеціалізованому обладнані 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 Ст3Гпс, 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.: C – 0,24; Mn – 1,39; Si – 0,76), при її деформуванні додатковим розтягом (%, Ɛ) на 2,0 та 4,0% при температурі довкілля отримували АП з межею плинності на рівні 580 и 650 Н/мм^2 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.

УДК 669.017.15: 620.18

ФОРМУВАННЯ КОМІРКОВОЇ СТРУКТУРИ МІЖФАЗНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ СТАЦІОНАРНІЙ α→γ 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 α→γ 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 α→γ рекристалізації під час навуглецювання.

Фазове перетворення α→γ представляли у вигляді набору послідовних стаціонарних станів. Процес α→γ 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 α→γ рекристалізації. При проведенні цих розрахунків амплітуда збурення φ(x) була апроксимована кусково-неперервною функцією, що складається з фрагментів кривих другого порядку та прямих.

Детальне вивчення мікроструктури фронту трансформації показує, що клітини ПІ 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}γ і {110}α 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., Раздобрєєв 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 особо 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 роликових 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 роликових 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 роликових 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 сталевої заготовки. З цією метою в практиці виробництва дроту застосовують два способи: термічний і механічний. Термічний спосіб, якій 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 тягнучого 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 роликових 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 роликовому пристрої з комплексним урахуванням взаємної залежності ступеня деформації, сили протягування металу, а зміни механічних властивостей у процесі деформації штаби у роликовому 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.

УДК 621.771.2:669.15.194.2

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 сталевого прокату 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 сталевого прокату, 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., Ивченко 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., Нурумгаліев А.Х., Зуєв О.В., Бубликов Ю.О., Андрюшкін А.В., Перчун Г.І., Єржанов А.С., Жуніскаліев Т.Т., Куатбай Е.К.

УДК 669.15-194:621.771.06:620.18

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 роззміцнюючого оброблення із регульованою швидкістю постдеформаційного охолодження на роликовому транспортері в лінії прокатного стана.

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 враховують 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.

УДК 629.764

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.

УДК621.771.2:621.89.083.133

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 діспіргатора. 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 діспергаторі 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.

УДК 621.771.28

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 трубної промисловості ім. Я.Ю. Осади» м. Дніпро

Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної 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 стальні та балони» й ТК 81 «Стандартизація методів контролю механічних, металографічних и 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 дільниці 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 багатопрохідну 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 дільниці 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.

УДК 330:005.35(047.31)

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 зливок. 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 зливок 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.

УДК 621.73.043(046.016)

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ІНСТРУМЕНТІ ПІД ЧАС КУВАННЯ МЕТОДАМИ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мктрчян 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 сучвсних технологіях. - Харьків: НТУ "ХПІ", 2010. -№43.- С. 120-125.

УДК 004.94

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.

УДК 621.771.06:681.518.54:531.3

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 $M_д$ при захваті металу валками від моменту M_c в сталому режимі прокатки. Чим більше M_c, тим більше $M_д$. Ця залежність має вигляд нахиленого кореляційного поля точок $M_д$, M_c, яке апроксимується лінійною залежністю $M_д$ (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 $M_д$ 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 клітях прокатного стану з побудовою кореляційних полів $M_д$, M_c шляхом їх аналізу дозволяє простежити проходження збурень через кліті 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 $M_д$ 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 шпиндельної ділянки, а також поля статичного навантаження – температура металу та динамічне навантаження – температура прокату. Для цього потрібні вимірювання моменту принаймні на одному з шпинделів і температури металу на вході в досліджувані кліті.

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

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

Літературні джерела

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

УДК 621.74.669.13.017

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 випади 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 виробничників. 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 залізовуглецевих 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], отримають найближчим часом подальший розвиток.

Літературні джерела

1. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія 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.

УДК 621.7:681.5

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 створювалась 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.

УДК 669.18

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.

УДК 004.94

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

Єрьомін 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 технології 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 електроенергії 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 еклектичних 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 реконструкцію 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

УДК 669.162.23:632.151

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 повітронагрівачів використовується доменний газ. Теплота згоряння доменного газу не забезпечує досягнення заданої температури під куполом повітронагрівачів 1300 –1350 °С, і тому його, зазвичай, збагачують природним газом. Досягти заданої температури під куполом можливо іншим шляхом – опалювати повітронагрівачі 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 повітронагрівачів та виконано дослідження впливу цих способів на валові викиди оксидів азоту, що утворюються під час спалювання палива. Розрахунки виконано для умов роботи повітронагрівачів доменної печі об’ємом 1513 м^3 для наступних початкових умов:

- температури під куполом повітронагрівача прийняті 1300 та 1350 °С;
- склад доменного газу (об’ємні відсотки): CO_2=15,95 %; CO=22,55%; H_2=3,37%; N_2=44,39%; H_2O=13,74%;
- теплота згоряння доменного та природного газів, відповідно, 3 228 та 36 275 кДж/м^3;
- витрата доменного газу на опалення одного повітронагрівача 25 000 м^3/год;
- витрати дуття, що нагрівається, однакові для обох варіантів, що розглядаються.

Визначено, що для забезпечення температур під куполом 1300 та 1350 °С при опаленні повітронагрівачів природно-доменною сумішшю теплота згоряння суміші повинна складати, відповідно 4 550 та 5 013 кДж/м^3. При цьому частка природного газу в суміші повинна дорівнювати відповідно 4,0 та 5,4 %. При опаленні повітронагрівачів доменним газом і збагаченні повітря горіння киснем досягнення заданих температур під куполом повітронагрівача 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 (NOx) при заданих умовах спалювання палива, які складають відповідно 44,5 мг/м^3 при температурі під куполом 1300 °С та 79,0 мг/м^3 при температурі під куполом 1350 °С і майже не залежать від способу підвищення температури під куполом повітронагрівачів, так як умови спалювання палива залишаються майже не змінними.

Чисельне моделювання теплообміну в насадці повітронагрівача, яке виконано за методикою, наведеною в роботі [2], дозволило визначити витрати палива на опалення повітронагрівачів, технологічного кисню та димових газів, а також розрахувати валові викиди оксидів азоту. Визначено, що для забезпечення однакових умов теплообміну в насадці повітронагрівачів 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 повітронагрівачів 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.

УДК 621.039.736:621.445

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 виробах, 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 радиактивно загрязненногометаллана основе его плавления // Ядерна та радіаційна безпека. – 2018. - №2(7,8), - С.43-48.

2. Балакін В.Ф., Машиністов В.Є., Коверя А.С., Лукін Є.В. Промислова техннологія утилізації насосно-компресорних труб, що забруднені природними радіонуклідами, на основі їх плавління. // Нафтогазова галузь України. – 2019. - №4. С.33-37.

Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov
of National academy of science of Ukraine

All-Ukrainian scientific and technical conference
« SCIENCE AND METALLURGY »
14-16 november

Conference organizers:
Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine

Ukrainian State University of Science and Technology of the MES of Ukraine

Conference Proceedings

DOI: 10.52150/2522-9117-2023-conferens

Dnipro
2023

Conference organizing committee:

Chairman of the committee: **O. I. Babachenko,** Doctor of Science., Director of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine
Deputy Chairman: **O.E. Merkulov**, Doctor of Science, Deputy Director of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine.
Secretary of the committee: **G.A. Kononenko,** Doctor of Science, Academic secretary of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine.

Scientific committee of the conference:

L. M. Deineko, Doct. of sci., Prof., Head of Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals of Institute of Industrial and Business Technologies of the Ukrainian State University of Science and Technology;
L. V. Kamkina, Doct. of sci., Prof., Dean of Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Head of Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes of Institute of Industrial and Business Technologies of the Ukrainian State University of Science and Technology;
V. A. Lutsenko, Doct. of sci, senior researcher of Department of Heat treatment of metal for mechanical engineering of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine
I. G. Muravyova, Doct. of sci, senior researcher of Department of Technological equipment and control systems of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine;
E.V. Parusov, Doct. of sci, Head of Department of Heat treatment of metal for mechanical engineering of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine;
I. Yu. Prykhodko, Doct. of sci., Head of Department of Processes and Pressure Metal Processing Machines of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine ;
Ye.M. Sigaryov, Doct. of sci., Prof., Head of Department Metallurgy of ferrous metals and metal pressure processing of Dnipro State Technical University;
D. M. Togobytska, Doct. of sci, Prof., Head of Department of Physico-Chemical Problems of Metallurgical Processes of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine;
A. G. Chernyatevich, Doct. of sci, Prof., chief researcher of department of Physical and technical problems of steel metallurgy of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine;
A. P. Shevchenko, Doct. of sci, Prof., leading scientist of the Department of Non-furnace processing of cast iron of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine;
O. M. Grishin, Ph.D., Deputy Dean of Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Associate Professor of Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes of Institute of Industrial and Business Technologies of the Ukrainian State University of Science and Technology;
O. S. Nesterov, PhD, senior researcher, Head of Department of Cast Iron Metallurgy of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine;
K.V. Bayul, Ph.D., senior researcher, department of technological equipment and systems management of Iron and stell institute of Z.I.Nekrasov of National academy of science of Ukraine.

Content

	Page
Iron and steel metallurgy: technologies, innovations, quality	6
N.A. Arendach, L.S. Molchanov Analysis of the efficiency of carbon removal from the melt at different stages of steel production	6
L. S. Molchanov, T.S. Golub, Analysis of conditions for effective activation of nitrogen-containing gas flow	6
S.I. Semykin, T.S. Golub, L.S. Molchanov Use of activated gases as a direction of increasing the efficiency of technological processes in metallurgy	7
O.L. Chaika, B.V. Kornilov, A.O. Moskalyna, M.M. Iziumskyi, M.G. Dzhygota Study of the impact of hydrogen injection into the blast furnace on CO_2 emissions and coke consumption	8
E.N. Sigarev, D.V. Eskov, I.M. Matina, D.A. Kovalenko Correction of sulfide capacity of bucket slag	9
I.V. Protokovilov, V.B. Porokhonko, M.M. Abralov Investigation of the kinetics of solidification of a 205-ton forging ingot on a cold physical model	11
V.V. Lebid Research of charge stream characteristics in a blast furnace	12
P.O. Yushkevich Producing steel with using converter process in the modern metallurgical industry of Ukraine	12
D.V. Eskov, E.N. Sigarev, G.Yu. Kryachko Research of gas dynamics two-phase flow in a t-shaped lance	13
I.G. Myrav'yova, N.G. Ivancha, V.R. Shcherbachov, V.I. Vishniakov New method of substantiated adjustment of the characteristics of the burden regime ensuring the formation of rational parameters of the cohesive zone in the blast furnace	14
Y.V. Synehin, I.V. Zhuravlova, V.O. Ruban Prospects for using CCM for casting small section bars at mini-mills	15
V.O. Ruban, Y.V. Synehin, O.M. Stoianov, M.O. Savenko Preparation and conducting of physical modeling of the study of the effect of gas supply through a hollow electrode on the change in the geometric parameters of the hole	16
O.E. Merkulov Blast furnace: “be or not to be?”	16
Electrometallurgy	18
S.V. Adjamskiy, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi Study of the effect of annealing duration on the mechanical properties and microstructure of titanium-based alloy samples manufactured using 3-D technology	18
S.V. Adjamskiy, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi Study of the mechanical properties of Co-Cr-Mo alloy samples made by the technology of selective laser melting with a technological stop	18
S.V. Adjamskiy, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.A. Shpak Justification of the modes of SLM-technology with the aim of reducing residual stresses by calculation method	19
S.V. Adjamskiy, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, Zha.A. Dementieva Comparative studies of the mechanical properties of AlSi10MG samples produced by the traditional method and by the technology of selective laser melting	20
O.M. Myslyvchenko Phase composition of the $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_{0.8}B_{0.6}$ high-entropy alloy obtained by the arc melting method	20
Technologies for step by step processing of cast iron and steel	22
V.P. Piptyuk, S.V. Grekov, O.V. Kuksa, Need for steel degasation at PJSC «KAMETSTAL»	22
D.N. Togobitskaya, I.R. Povorotnia, A.I. Bel’kova, V.P. Piptyuk, N.E. Khodotova Development of a criteria for evaluating the process of distribution of elements in the «METAL – SLAG» system during out of furnace steel processing	23
A.P. Shevchenko, I.J. Manachyn, B.V. Dvoskin Development of calculation models of specific magnesium consumption and sulfur content in cast iron under different conditions of injection desulfuration of cast iron	24

Automation and modern methods of controlling metallurgical processes and the quality of metallurgical products	25
O.P. Yehorov, M.O. Rybalchenko, I.O. Manachyn Adaptive control system of free rolling speed mode with fuzzy controller	25
N.O. Hryhor'eva, T.P. Miroshnikova The experience of researching a natural gas separator using non-destructive control methods	26
O.Yu. Potap, M.D. Zinchenko, V.G. Kysliakov, M.V. Butenko Modernization of the system of automated adjustment of the speed mode of the sectional roller gang of the small-assorted refrigerator	26
I.Yu. Prykhodko, S.O. Vorobei Increasing the accuracy of the calculation of energy-force parameters of rolling on a plate mill	27
Metal Science and Heat Treatment of Steel	29
O.E. Merkulov, R.V. Podolskyi, O.A. Safronova, O.P. Klinova Analysis of the relationship between wear resistance, structural condition and pearlite hardness of high-carbon steel	29
I.O. Vakulenko, S.O. Plitchenko, O.M. Perkov Analysis materials brake pads of the rolling stock	29
E.P. Shtapenko, Yu.V. Syrovatko Abnormal increase of contact angle of wetting of the steel substrate with tin as a function of temperature	30
I.O. Vakulenko, O.M. Perkov, S.O. Plitchenko Determination effect pearlite dispersity on endurance at cyclic loading of the carbon	31
S. I. Gubenko, E. V. Parusov Influence of active mediums and non-metallic inclusions on the durability and mechanical properties of bearing steel	32
O.I. Babachenko, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.L. Safronov Effect of carbon content in bainite grade steels on mechanical properties after normalization and tempering	33
A. Yu. Borysenko, G. V. Levchenko Influence of liquation on the formation of graphite in cast irons	34
M.A. Kovzel, T.V. Kotova Influence of deformation modes on the formation of special boundaries in the structure of ultra-low carbon steel	35
V.A. Lutsenko, T.M. Golubenko, O. V. Lutsenko Influence of quenching temperature on structure formation of alloy steel	36
S.V. Adzhamskiy, G.A. Kononenko, R.V. Podolsky, O.A. Safronova Study of the features of the 316 L steel microstructure manufactured using selective laser melting technology	36
S. I. Gubenko Localization of the formation of grain structure of low-carbon steels during intensive plastic deformation	37
G.A. Kononenko, T.V. Kimstach, R.V. Podolskyi, O.A. Safronova Prospective ways of increase properties thick rolled sheet	38
D.V. Burova Improving the properties of steel by heat treatment with heating in the intercritical temperature interval	39
S. V. Bobyr, E. V. Parusov, I. M. Chuiko, O. E. Baranovs'ka, E. V. Oliinyk Comparative analysis of different methods for determining residual austenite after heat treatment of alloy steel	41
M.P. Bezhenar, Ya. M. Romanenko, A. M. Patsyk On the advantages and disadvantages of cubic boron nitride polycrystals of the cbn – al system, depending on their phase composition	42
T. V. Balakhanova, E. V. Parusov, I. M. Chuiko, E. V. Oliinyk Development of methods for detecting the structure of ferrit stainless steel	43
O.I. Babachenko, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.A. Safronova Development of proposals regarding requirements for the quantity of non-metallic inclusions in railway wheels when creating a new national standard	44
A. Yu. Borysenko,G. V. Levchenko Heredity of gray cast irons	44
Y. M. Romanenko, A. M. Patsik, M. P. Bezhenar Thermodynamics of the chemical interaction of cubic boron nitride with aluminum and refrigerant titanium compounds	45
G.I. Perchun, A.O. Ivchenko Improvement of the technology of the production of reinforcement rolled rod of increased strength in coils	46

K. O. Chornoivanenko, O.V. Movchan Formation of the cellular structure of the interphase surface during stationary α→γ recrystallization of ferritic iron alloys	47
Progressive Metal Processing Technologies	49
K.Yu. Kluychnikov, I.Yu. Prykhodko, V.G. Razdobreev, D.G. Palamar, A.I. Leshchenko Choice of the method of determining the energy-force parameters of the process of drawn of the stack through a bending-tensioning device	49
A.V. Ivchenko, V.Y. Pererva, O.V. Zuev Production of reinforcing rolled products from lowalloy modified nitrogen steels	50
E.V. Oliinyk, E.V. Parusov Existing and promising methods for cooling steels for welding purposes in a rolling line	51
Yev. S. Boliubash Method for studying the depth of penetration of the cumulative jet of the pyrotechnic device of the launcher rocket separation system	52
S.B. Karhin, S.A. Syhomlin Development of means of production of technological lubricants for processing metals by pressure	52
S.B. Karhin, I.A. Malii Improvement of the rolling roll forging process	53
Modeling and optimization of technological processes	54
M.V. Babenko, H.O. Tonkoshkur Research of calculation methods for modeling the process of melting materials	54
K.S. Krasnikov, S.V. Deineka, N.M. Lymar Study of speed and memory consumption for the star interaction algorithm on graphics accelerators	54
V.V. Verenyov, V.V. Korenny Stead torque corelation fields in rolling clutes	55
K.S. Sokolan, I.V. Larionov Optimization of writing codes for machining parts on CNC machines by their automatic generation	56
K.S. Krasnikov, A.O. Krykhta Software for studying the hydrodynamics of the melt in a tundish	57
K.S. Krasnikov, S.V. Dudnyk Technologies of software development for hydrodynamics research in an aeration tank	57
Environmental problems of ferrous metallurgy	58
O.O. Yeromin, O.V. Gupalo Implementation of the best available technologies in thermal furnaces in the case of fossil fuel shortages	58
L.P. Gres, O.V. Gupalo, O.O. Yeromin, L.B. Kabakova Study of nitrogen oxides emission during air heating in hot-blast stoves	59
V.E. Mashinistov, Y.V. Romanko, A.G. Meshkova, M.V. Suhareva Melting of radioactively contaminated metal as a component in solving environmental problems at metallurgical enterprises	60

UDC 669.184

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF CARBON REMOVAL FROM THE MELT AT DIFFERENT STAGES OF STEEL PRODUCTION

N.A. Arendach, L.S. Molchanov, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

In modern conditions, iron-carbon melts, and in particular steel, is one of the most widespread structural materials in the world. The production of steel is associated with the removal of excess impurities in the iron-carbon melt, in particular carbon. At the same time, there are significant number of technological solutions for the production of steels of various assortments, from ultra-low carbon to carbon-alloyed. The main method of production of structural steels of ordinary quality remains the oxygen-converter process, which is carried out according to the scheme with the supply of oxygen through the top blowing lance and neutral gas through the bottom blowing blocks. The production of high-carbon steels is based on the use of electrosmelting technology using induction heating or arc heating schemes, which is associated with the low oxidation potential of these processes. The production of steels with a carbon content below the critical concentration (0.01%) is associated with the complexity of organizing the supply of carbon to the place of oxidation. Therefore, technical solutions have been developed with the additional introduction of mass transfer intensifiers into the bath (GKR and AOD technologies), as well as carbon oxidation at low pressure. The specified processes require special complex equipment and do not allow the production of low-carbon steels at existing metallurgical enterprises without significant modernization of equipment and changes in production technology.

According to existing views on the mechanisms of carbon oxidation in a metal bath, three links of the specified process are distinguished: 1) introduction of the oxidizer into the melt; 2) the course of the chemical oxidation reaction; 3) bringing carbon to the site of the chemical reaction. In the case of a concentration of carbon in the melt at a level close to the critical level, the speed of the chemical reaction is limited precisely by the supply of carbon to the place of its flow. Thus, to ensure an effective process of removing carbon from the melt at concentrations below the critical one, it is necessary to apply methods of intensification of mass transfer processes in a metal bath. At the same time, there are the following methods of intensification of the mass exchange of millets: forced mixing, influence of an external electromagnetic field, purging with a neutral gas. Among the specified methods of intensification of mass exchange processes, the most technological is purging with neutral gas.

Based on the above, it is proposed to carry out the production of steels with a carbon concentration below the critical one according to the following scheme: oxidation of carbon to the critical concentration by standard methods of oxygen-converter melting, oxidation of carbon below the critical concentration in the melt due to blowing the melt with an inert gas-oxygen mixture at the post-bake treatment stage through bottom blowing blocks of a special design.

UDC 669.184

ANALYSIS OF CONDITIONS FOR EFFECTIVE ACTIVATION OF NITROGEN-CONTAINING GAS FLOW

L. S. Molchanov, Ph.D., T.S. Golub, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Today, the metallurgical industry, as the main producer of structural material, sets new, increased requirements for the strength of steels and the improvement of their operational qualities, as an indicator

of the reliability and durability of parts and structures. Methods of improving the properties of steels are quite diverse, but alloying occupies an important place among them. Alloying elements give products heat resistance and corrosion resistance, increase mechanical indicators. Among them, nitrogen should be singled out, the introduction of which allows to reduce the content of more valuable elements of nickel, manganese and other austenite-forming elements in alloys while maintaining the specified austenitic or other structure and, accordingly, the level of ferromagnetism of the alloy; increase the content of ferrite-forming elements in alloys, which positively affects the mechanical and corrosion characteristics of alloys; improve the characteristics of technological plasticity due to the expansion of the austenite existence interval in the high-temperature region; increase the thermal stability of austenite and reduce the probability of its disintegration during heating with the formation of nitrides and other phases; increase resistance to pitting and knife corrosion, stress corrosion cracking, intercrystalline corrosion; to increase the strength of alloys by using strain hardening during slander.

Nitrogen is a fairly widespread chemical element and has long been known as an alloying agent, but its limited solubility in iron alloys, especially with a high content of other components, prevents its widespread use. Different methods of gas activation are used to increase the solubility of nitrogen. The authors investigated the option of activation by creating an electric brush discharge.

The research was carried out on a physical stand created at the research site of the Iron and steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. The section of the nozzle at the outlet for supplying purging gas, in which a closed-type gas activation device was placed (by creating a brush discharge between the metal electrode and the metal tip of the nozzle), was subject to modeling. Two types of devices were investigated: with a submerged non-insulated electrode and a protruding almost fully insulated electrode (discharge between the lance tip and the non-insulated electrode tip). Analysis of the influence of the pressure of the purge gas and the length of the arc (the distance between the electrodes) on the efficiency of the process of ionization of the flow of nitrogen-containing gas (using the air) showed that when using a discharge device with an immersed electrode, the current that forms the activated gas has a quadratic dependence on the distance between the electrodes with a maximum at a distance of about 15 mm and a purge gas pressure of 0.25-0.3 MPa. With a further increase in pressure, the visible discharge disappears and the current decreases.

Under the conditions of using a different type of discharge device, which is characterized by a protruding electrode, much higher indicators of the strength of the ionized current were obtained, and with an increased distance of the discharge, the strength of the current increased. In addition, the discharge was visually visible even at high purge gas pressures (0.6 MPa) (with the highest values at low purge pressures). Thus, it can be concluded that for the activation of nitrogen-containing gas, the most promising is the use of a discharge device with a protruding electrode.

UDC 669.184

USE OF ACTIVATED GASES AS A DIRECTION OF INCREASING THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN METALLURGY

S.I. Semykin, Ph.D., T.S. Golub, Ph.D., L.S. Molchanov, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Technological operations in the production of steel and metal products are based on oxidation-reduction chemical processes (burning of fuel, oxidation and recovery of impurities). The special importance of chemical oxidation processes is established in the processes of steel production, which is associated with the removal of excess content of silicon, manganese, carbon and phosphorus from the composition of the molten metal charge. At the same time, gaseous oxygen is used as the main oxidizer in established technical solutions. In modern metallurgical units, the maximum efficiency of the flow of chemical transformations using gaseous oxygen has been achieved.

The rate of chemical interaction of various elements with oxygen is determined by the activation energy of a certain transformation. In particular, in an activated state, oxygen forms an ozone molecule,

which is more chemically active than a gaseous oxygen molecule. This is caused by the presence of an additional atom in the molecule, which shifts the electron density of the molecule and reduces the activation energy of chemical processes with its participation.

In general, the activation of gaseous substances occurs under the influence of external influences, which include: the influence of ionizing radiation (UV, α, β and γ spectra); the influence of excess heat; the effect of electric discharges. The formation mechanism consists in the destruction of stable molecules of a gaseous substance and the formation of ions, which interact with molecules to form chemical compounds. At the same time, from a technological point of view, the most successful method of activating gaseous substances is the use of electric discharges. The efficiency of substance transfer depends both on the design of the ionizer and on the power of the discharge itself. The specified features make it possible to influence the processes taking place in the volume of the converter within wide limits.

In the course of research, it was found that the use of an activated flow contributes to an increase in the heat level of the under-furrow area, which indicates a greater heating of the bath than on comparative melts, probably due to a more active flow of silicon oxidation reactions at the beginning of purging, carbon in the middle of purging and afterburning formed in the course of purging CO to CO_2 gas - at the end of purging. At the same time, the analysis of the change in the carbon content and its oxidation rate during blowing of the melt revealed an increase in the proportion of oxygen spent on carbon oxidation when using an activated oxygen flow, with a corresponding increase in the rate of carbon oxidation during blowing and a reduction in the duration of blowing until the torch falls. Conducted research on the level of dust emission from the converter on experimental fuses showed a decrease in this indicator when using an activated gas flow by the order of 56.9% relative to in the period of slag introduction and by 69.5%relatively during the period of blowing under the slag. Based on the results of laboratory studies, the analysis of the influence of the amount of ozone in the purge gas on the amount of dust released from the unit showed the presence of an inverse relationship with the minimum level of dust release at an ozone productivity of about 25-30 g/t·min. The results obtained in the work testify to the high significance of the direction being developed for the metallurgical industry, and the established scientific and technical provisions suggest the continuation of research in terms of the design of discharge devices and a deeper study of the interaction of activated jets with a liquid iron-carbon bath.

UDC 669.162.21: 662.6/9: 669.7.001.5

STUDY OF THE IMPACT OF HYDROGEN INJECTION INTO THE BLAST FURNACE ON CO_2 EMISSIONS AND COKE CONSUMPTION

O.L. Chaika, Ph.D., B.V. Kornilov, Ph.D., A.O. Moskalyna, Ph.D., M.M. Iziumskyi, M.G. Dzhygota

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The idea of using hydrogen and posing the problem of its use in industry was formulated in the early 70s of the 20th century after the first oil fuel crisis. It should be noted that at that time domestic researchers were also engaged in the use of hydrogen in blast furnace production. In the world, at the level of public policy, more and more attention is paid to the development of the hydrogen direction, and hydrogen energy is gaining more and more support not only at the corporate level, but also at the state level. Hydrogen energy with its diverse sources, low carbon emissions, high efficiency and wide range of applications is considered the most promising and environmentally friendly energy in the 21st century and is included in the national energy development strategy of many countries. Therefore, the question of using hydrogen in metallurgy in general and the blast furnace in particular, as the most energy-intensive unit in the metal production cycle, is relevant from the point of view of reducing carbon dioxide emissions.

With the use of improved models of heat and energy balances of blast furnace smelting, estimation calculations of the influence of the use of different hydrogen consumption on CO_2 emissions, technical and economic, thermal and energy indicators of blast furnace smelting were performed.

It was established that an increase in hydrogen consumption by every ~50 m^3/t allows to reduce the output of CO_2, taking into account the afterburning of CO outside the blast furnace, by 2,4-2,6%, and the use of hydrogen in the amount of ~600 m^3/t will allow to reduce CO_2 emissions by 33,4-337%. In addition to reducing CO_2 emissions, the use of hydrogen in the blast furnace allows to reduce coke consumption by 0,46-0,48% for every 10 m^3/t of H_2, which is equivalent to reducing coke consumption by 0,22-0,25 kg/m^3 of hydrogen. Thus, for the first time, the coefficient of replacement of coke by hydrogen when using hydrogen in the blast furnace was determined analytically – 0,22-0,25 kg/m^3.

According to the results of the study, it was determined that the joint injection of hydrogen and PCI into the furnace of the blast furnace allows to solve two tasks at the same time: reducing CO_2 emissions (with an increase in the consumption of hydrogen) and ensuring the minimum cost of iron and steel (with an increase in the consumption of PCI).

As a result of the analysis, the critical consumption of fuel additives was determined, at which, according to Gruner's principle, it is possible to expect to achieve full recovery of iron only indirectly, which means the minimum consumption of fuel when reaching rd=0%:

- with consumption of hydrogen 585-600 m^3/t and coke 378-401 kg/t;
- at consumption of PCI 100 kg/t, hydrogen 500 m^3/t and coke ~329 kg/t;
- at consumption of PCI 150 kg/t, hydrogen 485-500 m^3/t and coke 268-289 kg/t;
- at consumption of PCI 200 kg/t, hydrogen 450-485 m^3/t and coke 228-251 kg/t;
- at consumption of PCI 250 kg/t, hydrogen – 421-450 m^3/t and coke 191-212 kg/t.

Injection of preheated hydrogen into the blast furnace opens significant reserves for reducing CO_2 emissions and coke consumption. Heating of hydrogen in the amount of 100-500 m^3/t for every 100°C allows to reduce the predicted output of CO_2, taking into account the afterburning of CO outside the blast furnace, by 0,37-1,35% and to reduce coke consumption by 0,07-1,16%.

Based on the above, it was established that the use of hydrogen in the blast furnace is a promising way to reduce CO_2 emissions and reduce the consumption of coke and other fuel additives in the blast furnace.

UDC 669.162

CORRECTION OF SULFIDE CAPACITY OF BUCKET SLAG

E.N. Sigarev, Dr.Sc., D.V. Eskov, I.M. Matina, D.A. Kovalenko

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The results calculations changes in the sulphide capacity of slag formed during ladle desulfurization pig iron using co-injection scheme using mixture based on lime and magnesium are presented. Before start of blowing desulfurizing reagents on the surface ladle bath, usually 0.6-1.2% of the mass slag metal, which got into the ladle with cast iron when it was released from blast furnace or when overflowing from mixer, remains. The composition first ("primary") is significantly different from composition of blast furnace slag and is characterized by reduced basicity and insignificant sulfide capacity.

Slag after desulfurization of cast iron consists of primary residues and products of sulfur removal and redistribution reactions, residues of undigested lime (CaO, MgO, CaS, etc.). As a result of mass transfer processes CaO→MgS→CaS→MgO, the chemical composition and physical properties of slag change continuously. Removal of slag after desulfurization is complicated by an increase in its volume, changes in consistency and unreasonable losses of iron, the content of which in the form balls of various fractions reaches 68-80%.

An increase in the content of CaO and MgO in slag increases its basicity, melting point and viscosity, and leads to a change in surface tension. The formation of a more liquid slag in order to create conditions for returning part of slag balls to bath is possible due to use of modifiers (fluorspar, silica, potassium carbonate, sodium chloride, colemanite, nepheline syenite, calcium aluminate, etc.), containing at least one of components of the formed ladle slag of the $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$ system.

The report presents results of calculations to determine the possibility of adjusting the basicity, viscosity, melting point, and sulfide capacity of the "primary" and final ladle slags when using steelmaking waste - final desulphurization slags of steel on ladle-furnace units (subject to limiting the content of S in the latter). Positive industrial experience of using such slags as a bucket slag modifier is known.

It is known that the most easily melting eutectics ($CaO{\cdot}SiO_2$+$CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$+tridymite; $CaO{\cdot}SiO_2$+$CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$+$2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$), in contrast to the coating slags of ladle desulfurization of cast iron with the injection mixtures based on CaO and magnesium, melt at a temperature of ~1300 ^{0}C. The mass of sulfur that can be removed with slag (slag sulfur productivity) differs from slag sulphide capacity obtained by calculations based on thermodynamics. Despite existence of various mechanisms and causes of iron loss during bucket desulfurization: removal of Fe in the waste gas stream; flight of Fe drops outside bucket during destruction of floating gas bubbles at the metal-gas interface; drawing slag into the metal bath by currents in the bubbling zone with capture of liquid metal; removal of Fe with the slag that flows from surface of the bath after processing, largest losses (0.4-2.6% of the metal mass) are due to the last option.

The authors of the report investigated conditions of change and characteristics of the slag desulfurization of cast iron on the UDCH in the 230-t pouring ladles of the converter shop of PrJSC "Kamet-Stal". In the technological route of steel production at PrJSC "Kamet-Stal" "bucket-furnace" units (ACP) are involved; steel refining waste, which includes low-oxidized slag ($SHAKP_1$) with a high CaO content and a sulfur content of 0.2 to 0.9%. Composition of $SHAKP_1$ slag, %: 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. The use of $SHAKP_1$ slag as a modifier of "primary" slag will also contribute to solving environmental problems (waste disposal) and reducing the cost of processing and iron losses. In slags with a basicity of CaO/SiO_2 below 0.93 (corresponding to the molar ratio of CaO/SiO_2=1), the formation of CaS is slowed down due to the absence of free O^{2-} ions and requires additional lime consumption. The introduction of $SHAKP_1$ with a CaO content > 60% is able to save precious fluidized lime.

According to the results studies of the mechanism desulfurization of cast iron, it is shown that low-melting slags of eutectic composition have the maximum fluidity, and their adsorptive capacity depends on the degree of structural and chemical arrangement [1]. It is known that MgO and Al_2O_3 additives reduce the melting point of slag in certain intervals of their content.

The authors of the report performed calculations of changes in the chemical composition of the "primary" and final ladle slag of UDCH PrJSC "Kamet-Stal" when introducing $SHAKP_1$ in the amount of 0.05-0.3% of the mass of cast iron, determined their sulfide capacity, melting point and viscosity after modification. The viscosity and melting point of the investigated slags were determined using ternary diagrams.

Prediction of sulphide capacity (Cs) of modified slags was performed using optical basicity (Λ) proposed by Duffy and Ingram. The models proposed by Duffy et al., Tsao et al., Hao & Wang, Sosinsky & Sommerville, Young et al., Znang et al., Shankar et al. were used to calculate the value of Λ. When calculating Λ and determining changes in physical and chemical properties, the main components of slag (CaO, SiO_2, Al_2O_3) and the presence of up to 10% MgO were taken into account. The used models give excellent results (log$C$s values) for slags modified by the introduction of SHAKP1 (range from -2.3 to -5.15), but in general correspond to the data of known studies. Considering the fact that desulfurization slags are usually not homogeneous and contain a certain amount of solid CaS, the prediction of Cs may not be accurate enough for industrial conditions, but it is suitable choosing directions for optimizing the composition of cover slag using CaO and Al_2O_3-containing waste.

References

1. Analysis of steel ladle refining processes / I.D. Buga, A.I. Trotsan, B.F. Belov et al. // Metallurgical and mining industry. 2010. №3. p. 16-20.
2. The effect of coating slag on the course of ladle desulfurization cast iron / E.N. Sigarev, D.S. Kochmola, K.I. Chubin // Theory and practice of metallurgy. 2018. №1-2. p. 67-75.

UDC 669.187.56.001.1

INVESTIGATION OF THE KINETICS OF SOLIDIFICATION OF A 205-TON FORGING INGOT ON A COLD PHYSICAL MODEL

I.V. Protokovilov[1], Ph.D., V.B. Porokhonko[1], Ph.D., M.M. Abralov[2], Ph.D.

[1]E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

The main consumers of large forging ingots are the energy and heavy engineering industries. Turbine rotors, parts of reactor bodies, shafts of propellers and rolling mills, parts of chemical equipment are made from such ingots. Based on the operating conditions (dynamic loads, elevated temperatures, aggressive environments), high requirements are placed on the metal of such parts.

The conditions of solidification of large forge ingots (a large volume of liquid metal and a long time of its solidification) lead to a significant development of liquation and shrinkage processes in the metal melt and, as a result, physical and chemical heterogeneity of the cast metal. During further thermomechanical processing, the inhomogeneity of the ingot is inherited by the forging and semi-finished products obtained from it. Therefore, the problem of improving technologies for the production of large forging ingots is still relevant.

Experimental studies of the processes that occur during the solidification of large ingots are very complex and expensive. In these conditions, it is advisable to apply physical modeling methods on cold transparent models with compliance with similarity criteria.

The purpose of this work was to determine the influence of the parameters of electroslag heating (ESH) and feeding the top part of the ingot on the process of solidification of a 205-ton steel forge ingot in the mould and the development of shrinkage defects.

Experiments were conducted on a flat model simulating the longitudinal section of the ingot. The model is made on a scale of 1:15 with geometric similarity to the real object. As a model liquid, a solution of sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) was used, which solidify according to the dendritic mechanism. The melting point of sodium thiosulfate is 48.3 °C, and it retains optical transparency until complete solidification, which allows you to visually observe the processes of forming the crystal structure of the ingot. Fixation of the solidification process was carried out with the help of photo and video recording. The temperature of the melt was controlled by thermocouples. To evaluate the thermal processes during the solidification of the ingot, temperature measurements of the surface of the model were carried out during the entire solidification time using a Wintact WT3160 thermal imager.

It was established that the use of ESH leads to the displacement of the heat center to the top part of the ingot and an increase in the angle of inclination of the V-shaped crystallization front, which improves the feeding of the axial zone of the ingot with liquid metal. Under these conditions, the vertical component of the advancement of the solid phase gradually increases, which at the final stage of solidification of the ingot begins to prevail over the horizontal component. This provides favorable conditions for elimination of axial porosity and reduction of liquation processes. At the same time, no noticeable influence of ESH on the structure formation of the lower part of the model ingots (from the bottom part to a height of $0.5...0.6 \times H_{ing}$, where H_{ing} is the height of the ingot) was found. This gives reason to believe that ESH can be started not immediately after pouring the metal into the mold, but after a certain period of time.

It is shown that ESH with the temperature of the slag pool at the level of $1.15 \times T_m$ (where T_m is the melting temperature of the metal) and liquid metal feeding with a temperature of $1.2 \times T_m$ and a volume of 1.5...2 % of the total volume he ingot, ensures the complete elimination of axial porosity and shrinkage shell in the top part of the ingot. In real conditions, this will reduce the volume of the top part of the ingot by 70 % and thereby save up to 25 tons of metal that goes to scrap. At the same time, the total time of solidification of the ingot increases by an average of 15...20 %. On the basis of the conducted studies, the preliminary modes of ESH with liquid metal feeding of a 205-ton forge ingot were recommended.

UDC 669.162.2

RESEARCH OF CHARGE STREAM CHARACTERISTICS IN A BLAST FURNACE

V. V. Lebid, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The use of bell-less top (BLT) on blast furnaces of various volumes, an increase in the design options of the charging device and its distribution chute, require taking into account the parameters of the stream of materials leaving the distributor in the algorithms of the models.

A calculation method has been developed for estimating the density distribution of the stream of burden materials leaving the BLT chute when they are charged into the furnace. To assess the adequacy of the results of the calculations, experimental studies of the charge stream parameters were performed. The experimental method with the use of a sensor measuring probe was improved, which made it possible to check the results of calculations in industrial conditions. The body of the probe is mounted in the furnace space within the cylindrical part of the furnace using a special support structure on the mark corresponding to the charge stock level. It was experimentally established that the width of materials stream that are charged when using the angles of inclination of the chute in the range of 30°-48° differs slightly and at the level of filling the charge of 1.0 m is about 0.8 m, and the distribution of the stream density along its width is uneven - the most the intensive part is shifted in the direction of the furnace center.

A method of experimental assessment of the trajectories of charge materials in the furnace was developed based on the formation of geometric "ridges" by charging portions of charge materials from the specified angular chute positions followed by non-contact measurement of the profile of charge filling in the furnace, a patent was obtained.

New computational and experimental data on the regularities of the stream density distribution of charge materials made it possible to clarify the method of choosing rational angles of inclination of the chute in working angular positions and to improve the mathematical model of the radial burden distribution.

UDC 669.184

PRODUCING STEEL WITH USING CONVERTER PROCESS IN THE MODERN METALLURGICAL INDUSTRY OF UKRAINE

P.O. Yushkevich, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Metallurgy is one of the leading sectors of the economy of Ukraine [1-4], by 2022 it was be the second largest and profit article of Ukrainian exports [2]. Steelmaking production is the second stage in the total production cycle of ferrous metallurgy [3]. In general, Ukraine is one of the leaders of the steel producers in the world [1, 3]. In 2021, Ukraine took 14 place in the global rating of world manufacturers of steel according to World Steel Association (WSA) data [1]. During 2021 year in Ukraine was produced 21366 thousand tons of steel [1].

In the modern metallurgical industry of Ukraine, the main methods of steel making is the oxygen converter process, Marten process and electrometallurgical process [3]. The ratio in the overall production of steel between these of technological processes changes every year [3]. It should be noted that obtaining steel by oxygen-converter technological process is the most common in the world and Ukraine. Already in 2011, the fate of the steel obtained in the converters was approximately 70% from other ways of production of steel in the world. As of 2017, in Ukraine, the fate of steel produced in

converter was 71.7% [6] from total steel produced [5, 6]. Converter process is predominantly using for obtained the common steel marks.

Steel production with converter process has the potential for further development in the country and increasing it is production. According to the data [3-6], produced steel with converter process is the most favorable in cost compared to other basic ways of the steel producing in Ukraine. For example, an electric steel, which is obtained by the process of smelting in arc steelmaking furnaces. The marks of electric steels similar to the converter steel assortment can be more expensive in the range from 7.8 % to 95.6 % [4]. The marten steel is more expensive than converter steel from 24.5 % to 99 % [4]. Such data indicate the expediency of predominant use for the common marks of steels the converter process.

The above testimony and the fact that converter process of steel in Ukraine is the only one that in general does not require fuel resources (natural gas, coke and others). All written above is important arguments for concentration on further development on the converter process in the ferrous metallurgy of Ukraine for producing the common steel marks. Steel from the converter by basic characteristics and quality is not inferior to the electric steel and Marten steel. Converter steel can be better with production by progressive technological process [1-6].

UDC 669.162

RESEARCH OF GAS DYNAMICS TWO-PHASE FLOW IN A T-SHAPED LANCE

D.V. Eskov, E.N. Sigarev, Dr.Sc., G.Yu. Kryachko, Ph.D.

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The transition to use effective, from point of view increasing intensity input and, accordingly, reducing duration of ladle processing cast iron, ease maintenance, etc., lances with a T-shaped tip led to emergence associated problems, including nozzle clogging and complications in redirecting gas powder flow at the nozzle from working space of the nozzle without loss of energy due to changes in speed and direction of flow, uneven wear refractory protection nozzles along height, especially in areas close to the nozzles, non-stationarity pressure carrier gas in front nozzles, etc.

The report presents results of studies gas dynamics of two-phase flow in working space of T-shaped tip submersible nozzle and formation of gas-powder jets at exit from nozzles. The methods of physical modeling gas dynamics flow using transparent models of T-shaped tip and results of studies macrostructure cross-section nozzle, "clogged" in the process blowing gas-powder jets based on a mixture of lime and magnesium into the molten iron in order to ensure the removal of sulfur, were used.

It has been confirmed that the process uniform and continuous blowing gas powder jets deep into melt in ladle largely depends on the characteristics gas powder flow in the nozzle channel, working space tip and at the exit from the nozzles. The character macrostructure materials "clogging" nozzle indicates possible energy losses of gas-powder flow formed at the outlet latter. This leads to flow metal melt into inner space nozzle with subsequent freezing, a decrease in inner diameter nozzle, an increase in resistance system with formation of obstacles to exit of the desulfurizer mixture into bath. The latter is complicated due to insufficient momentum flow and occurrence pulsations in zone of leakage from nozzles during transition from jet to bubble mode.

According to research results, it has been confirmed that amount of metal melt entering nozzle lance in case of violations calculated blowing mode decreases with an increase in flow rate carrier gas and stops after reaching a certain critical value close to speed of sound. When flow rate carrier gas increases, there is a transition to the jet flow mode, and after its completion, access to nozzle for liquid is stopped, and the jet shredding on bubble occurs at a considerable distance from nozzle.

In this work, influence configuration of the working space (WP) tip on the angle of opening and length horizontal section gas-powder jet is investigated. In order to change configuration WP, different bottom shapes were used in the inner space transparent model T- shaped tip and its depth (distance from bottom to axis of the nozzles). We used shapes bottom surface in the form of a hemisphere and a concave hemisphere, a cone and a cylinder.

The peculiarities gas dynamics of the gas-powder flow in the transparent tip model were studied using high-speed (240 f/s) imaging. By processing results of the experiments, differences and features movement of solid particles of different fractions in working space tip, length, diameter and particle filling of the horizontal section of the flow in the nozzle and formed jet at the exit of the nozzle tip were established. At a high degree of flow loading, small fractions, in contrast to "large" fractions, move at the speed gas flow.

A method of calculating rational angle of inclination of the surface bottom of the WP T-shaped tip is proposed to ensure minimization of energy losses on the redirection of particles gas-powder stream, reflected from bottom, into nozzle.

It was established that with a decrease in the distance between bottom in the WP tip and axis of the nozzles, density gas-powder flow increases proportionally and depends to a small extent on shape of the bottom. The ratio between length horizontal section of the gas-powder jet and its diameter at a distance of 18 cal. from the nozzle section is: 0.9 – for a cylindrical bottom shape, 1.33 – for a “cone”, 2.0 – for a “concave hemisphere” and 2.4 – for a hemispherical bottom, respectively.

It was found that profile of the gas-powder jet can be used to distinguish horizontal and ascending sections, where jet loses its ability to penetrate into the bath. To optimize blowing process, you need reliable information about opening angle gas jet, penetration depth, structure plume, turbulence volumetric flow, which characterize the main parameters jet. According to the data of various researchers, opening angle of the gas jet in air-water system is 20 degrees, in the mercury-air system - 155 degrees. Thus, opening angle depends on properties of the liquid (density, surface tension). For iron-carbon melts, opening angle can probably vary in the above range.

Regarding distribution of particles on the horizontal section gas-powder jet at exit from nozzles, following can be noted. As a result of the significant difference between density of the gas and solid components gas-powder jet, its separation is observed with formation of less concentrated (upper) gas and more concentrated (powder) parts. At the same time, the most uniform distribution of particles along jet profile in the studied conditions was observed when using a cylindrical shape of the bottom. The opening angle gas-powder jets at the exit from the nozzles corresponds to the following values: 10 degrees – for a cylindrical bottom, 12 degrees – for a “cone”, 16 degrees – for a “concave hemisphere” and 22 degrees – for a hemispherical bottom, respectively.

UDC 669.162.21.27.012.3

NEW METHOD OF SUBSTANTIATED ADJUSTMENT OF THE CHARACTERISTICS OF THE BURDEN REGIME ENSURING THE FORMATION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE COHESIVE ZONE IN THE BLAST FURNACE

I.G. Myrav'yova, Dr.Sc., N.G. Ivancha, V.R. Shcherbachov, V.I. Vishniakov

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The results of numerous studies confirm the significant role of the blast furnace burden regime in shaping the cohesive zone and the impact of the burden regime parameters on its characteristics. Using the method developed at the ISI for determining the shape and position of the cohesive zone, research was conducted to establish the relationships between the parameters of the cohesive zone and the gas temperature above the charge surface based on real data from an operating blast furnace. The findings from these studies revealed correlations between the vertical coordinates of the melting line and the gas temperature above the charge surface and the ore burden in equal-area annular zones of the blast furnace, demonstrating the potential for controlling the position and shape of the cohesive zone using thermal measurement probes, as well as adjusting the parameters of this zone by altering the distribution of ore burden within the radial profile of the blast furnace hearth. It was established that the interconnection between the vertical coordinate of the melting line in the annular zone and the ore burden in that zone is characterized by sufficiently high coefficients of approximation by a power function, which is 0.80.

The boundaries of the cohesive zone are determined by the respective softening and melting temperatures. In the context of charging the blast furnace with multi-component burden materials, the softening and melting temperatures of the charge materials in a particular annular zone are determined by the composition of the material mixture in that zone and their individual high-temperature properties. The ratio of the quantity of pellets to sinter in these zones can be used as a controlling parameter in adjusting the temperature level of the softening and melting surfaces in different annular zones of the blast furnace. This is supported by a high coefficient of approximation of the interconnection between the difference in softening and melting temperatures and the specified ratio, which is 0.99.

The control of the parameters of the cohesive zone, the selection of the direction and magnitude of the controlling influence in each specific case should be based on the results of mathematical modeling of the distribution of burden materials across the radial profile of the furnace hearth, the determination of the composition of the mixtures of burden components in different furnace zones, the prediction of their high-temperature properties, and the trends in changes in these properties when altering the component composition of the mixture. To regulate the distribution of a specific component of the mixed iron ore portion across the radial profile of the hearth, the control parameter can be the setting of the location of the dosage of this component in the volume of the portion (feed) on the conveyor or skip. Formulas have been derived to determine this quantity for given component content in the annular zone and its content in the burden for blast furnaces with different charging system structures.

The results of the research allowed for the establishment of interconnection between the parameters of the cohesive zone (determined using the proposed method) and indicators of the distribution of burden materials across the radial profile of the blast furnace hearth. The identified interconnection between the distribution indicators of the burden across the radial profile, such as ore loading and the content of burden components in the annular zones of the hearth, with the parameters of the cohesive zone, serve as the basis for the development of a substantiated adjustment method for the characteristics of the burden regime, ensuring the formation of rational parameters of the cohesive zone in the blast furnace.

UDC 669

PROSPECTS FOR USING CCM FOR CASTING SMALL SECTION BARS AT MINI-MILLS

Y.V. Synehin, Ph.D., I.V. Zhuravlova, V.O. Ruban

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

Since the end of the last century, there has been a steady trend in the world towards the construction of mini-smelting plants instead of huge steel mills with a full cycle of metallurgical production. Such mini-plants are usually focused on processing scrap metal and metallized raw materials [1]. The introduction of mini-plants is particularly relevant in the context of the transition to green metallurgy. The low productivity of such enterprises (40-2000 thousand tons of steel per year) and small order volumes with often quite different product mixes make it possible to use mini-caster machines, usually of horizontal type, to cast billets with a cross-section equal to or as close as possible to the cross-section of the finished product. Such CCMs reduce the number of finishing stands in a rolling mill, which reduces the energy intensity of production, shop floor space and capital expenditure on construction. The advantages of such CCMs also include lower consumption of auxiliary materials, such as lining, slagging mixtures, cooling water, etc. A characteristic feature of many mini CCMs is the use of graphite molds instead of copper ones as in traditional CCMs, which are cheaper to manufacture.

References

1. Metallurgical mini-plants: Monograph / Smirnov A.N., Safonov V.M., Dorokhova L.V., Tsuprun A.Y. – Donetsk: DonNTU, 2005. – 469 p.

UDC 669

PREPARATION AND CONDUCTING OF PHYSICAL MODELING OF THE STUDY OF THE EFFECT OF GAS SUPPLY THROUGH A HOLLOW ELECTRODE ON THE CHANGE IN THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE HOLE

V.O. Ruban, Y.V. Synehin, Ph.D., O.M. Stoianov, M.O. Savenko

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

The operating mode of the ladle-furnace transformer has a direct impact on the length of the electric arc, which forms a hole at the slag-metal interface. The reaction zone, which occurs when the electric arc interacts with the metal bath under the electrode, has the shape of a "meniscus".

To evaluate the combined effect of the electric arc pulse and gas supply through the channel of a graphitized hollow electrode (GHE), preliminary calculations were made on the geometric parameters of this hole. Parameters such as depth and radius depend on the value of the arc length, which was determined in [1].

Then, based on the calculated similarity criteria, an experimental plan was developed and an experimental setup was created to conduct the study. During the experiment, such parameters as the intensity of gas supply through the GPE channel, the height of the slag cover, and the height of the hollow electrode above the level of the metal mirror were changed. Video recording of the data was performed at the front of the metal-slag interface and from below. The following parameters were monitored: diameter and depth of the hole formed, gas pressure, slag thickness, and height of the HPE.

Based on the physical modeling carried out, using the isothermal model, it is possible to obtain analytical expressions showing the joint effect of the electric arc pulse and the gas jet, which affect the heat transfer characteristics.

References

1. Ruban, V. Investigating cavity forma tion 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.

UDC 669.169

BLAST FURNACE: “BE OR NOT TO BE?”

O.E. Merkulov, Dr.Sc.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

According to [1], the blast furnace – basic oxygen furnace (BF-BOF) steelmaking process has a significant potential to reduce CO_2 emissions to levels comparable to direct reduction technologies.

The “green deal” requires green steel, in other words, the steel industry needs to decarbonise, but the decarbonisation of other industries also depends on the steel industry. According to ArcelorMittal, the construction of 1 MW of solar power plant capacity requires 35 to 45 tonnes of steel, and a wind power plant requires 120 to 180 tonnes [2]. Therefore, the decarbonisation of the energy and transport sectors, which are the main sources of CO_2 emissions, should go hand in hand with the decarbonisation of the steel industry to enable progress in the same direction. Moreover, low-CO_2 steelmaking technologies have not been widely adopted because they involve higher production costs. Compared to the BF-BOF route, producing a tonne of steel using low-carbon technologies will cost up to 80% more [3]. This argument also points to the need to maintain and upgrade BF-BOFs at least until CO_2 emissions

in the energy and transport sectors are reduced to levels comparable to those in the steel industry. A rational and systematic approach can be demonstrated by the example of the Japanese steel industry.

The development plans of Japan's largest metallurgical corporation, Nippon Steel [4], do not include a rejection of the BF-BOF route, unlike, for example, the Ukrainian metallurgical company Metinvest [5]. On the contrary, the Japan Iron and Steel Federation [6] promotes the idea that even though the blast furnace (BF) for iron ore reduction in steel production has a stronger environmental impact than the method of melting steel scrap in an electric arc furnace (EAF) for steel production, the BF-BOF route creates steel products that result in scrap, which, through recycling, leads to a reduction in CO_2 emissions. Since the effect of scrap recycling compensates for the CO_2 emissions from the BF-BOF process, the environmental impact of the BF-BOF and EAF routes is generally the same as that of repeated steel recycling [6]. This approach is reflected in the Japanese standard JIS Q 20915 "Life cycle inventory of steel products".

References

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.

Electrometallurgy

UDC 672.259: 623.32.006.83

STUDY OF THE EFFECT OF ANNEALING DURATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF TITANIUM-BASED ALLOY SAMPLES MANUFACTURED USING 3-D TECHNOLOGY

S.V. Adjamskiy[2,3], Ph.D., G.A. Kononenko [1,3], Dr.Sc., R.V. Podolskyi [1,3], Ph.D.

[1]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[2]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[3]LLC «Additive laser technology of Ukraine», Dnipro

Additive production, in particular selective laser melting (VLP) - a modern method of manufacturing parts and assemblies of complex geometry from metal powder, which is difficult or impossible to reproduce in traditional production. A feature of this technology is the residual stress generated at the stage of production of parts. Since titanium alloys are characterized by low thermal conductivity, the problem of residual stress formation is especially relevant for them, and heat treatment to remove them is mandatory for products made by VLP technology. Since the structural state of products obtained by VLP technology differs from that formed by the use of traditional technologies, it is necessary to study the effect of annealing to relieve residual stresses on the mechanical properties and microstructure of Ti6Al4V alloy obtained by VLP technology. Examined samples after annealing with a holding time of 1… 5 hours at 800° C. It was found that the temporary resistance after heat treatment for 1… 5 hours decreases compared to the initial state after manufacture by 20.55… -23.03%, the relative elongation - an increase of 31.33… + 35.57%. The nature of the change in the values of the relative narrowing is uneven: annealing with a holding time of 1 hour does not cause significant changes; with increasing exposure time to 2, 3 and 4 hours, there is a decrease in this characteristic by 9.03%; 45.97%; 62.56%, respectively, compared to baseline; after 5 hours the value of the relative narrowing increases this characteristic in comparison with the values after 4 hours by ~ 26.12%. According to the results of correlation analysis of the values of mechanical properties and parameters of the microstructure, it was found that the shape coefficient of α-phase plates has a high correlation with the values of temporary resistance, and the amount of α-phase correlates most with relative narrowing values under static stretching.

UDC 668.048: 623.552: 622.23

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CO-CR-MO ALLOY SAMPLES MADE BY THE TECHNOLOGY OF SELECTIVE LASER MELTING WITH A TECHNOLOGICAL STOP

S.V. Adjamskiy[2, 3], Ph.D., G.A. Kononenko [1, 3], Dr.Sc., R.V. Podolskyi [1, 3], Ph.D.

[1]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[2]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[3]LLC «Additive laser technology of Ukraine», Dnipro

In the modern production of parts from metal powder, the method of selective laser melting - Selective Laser Melting (SLM) - has become widespread. In Ukraine, the company "Additive Laser Technologies of Ukraine" LLC is engaged in the development of equipment for creating parts from metal powders using SLM technology. Currently, an urgent task for this equipment is the development

of a methodology for selecting the parameters of the metal powder melting process, which ensure the necessary mechanical and operational properties of the parts. For the research, three experimental cylindrical samples of Co-Cr-Mo alloy were made for tensile testing according to ISO 6892:2019 - the diameter of the working zone is 5 mm, with a controlled stop at a height of 18 mm from the beginning of the working zone, the total length of which is 28 mm As a result of the analysis of the values of mechanical properties, it was established that the temporary resistance of the test samples with a controlled stop within 24 hours. of the Co-Cr-Mo alloy, produced by SLM technology, undergoes a decrease in comparison with the samples produced without controlled stopping - by ~13%, relative elongation - by ~1%, and relative narrowing - by ~17%. It was found that for the experimental signs with a stop in the construction process, the deviation of values from the average values was: for temporary resistance ~11%, relative elongation ~62% and relative narrowing ~21%. This is caused by the destruction of one of the samples at the stop. The use of parts with a manufacturing defect (stoppage of construction) must be significantly limited, in accordance with the possible significant weakening and embrittlement of the product.

UDC 668.047: 624.382

JUSTIFICATION OF THE MODES OF SLM TECHNOLOGY WITH THE AIM OF REDUCING RESIDUAL STRESSES BY CALCULATION METHOD

S.V. Adjamskiy[2, 3], Ph.D., G.A. Kononenko [1, 3], Dr.Sc., R.V. Podolskyi [1, 3], Ph.D., Shpak O.A.[1]

[1]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[2]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[3]LLC «Additive laser technology of Ukraine», Dnipro

Improvement of the modes of selective laser melting technology based on the calculation model to reduce the level of residual stresses and prevent deviations in the geometry of the part. The results of modeling on a universal voxel structure and a simplified object for predicting metal behavior depending on the specific energy density in the region of the boundaries of a metal part with Inconel 718 are presented. An experiment was conducted to study the influence of different strategies and process modes on the distortion of parts as a result of the influence of residual stresses from in order to minimize them. Printing was carried out on the 3D printer "Alfa-150" (ToV "ALT Ukraine") at a constant power and distance between tracks in each zone (up-skin, down-skin, in-skin) with a change in the speed of the laser beam, and as well as different schemes for building up samples using 3D printing with a 67˚ rotation of each new layer relative to the previous one. In order to determine defects and deviations from the original model to the solid body (sample), metallographic analysis was performed using optical microscopy (Carl Zeiss AXIOVERT 200M). It has been established that the simulation of printing processes, performed on the Magics platform, with the help of dividing the model into a voxel structure, makes it possible to analytically assess stresses and strains. The analysis of the appearance of the experimental samples showed that the best down-skin indicators are formed at a power of 80 W and a specific energy density (40...38 J/mm3). When using a staggered printing strategy with a 67° rotation at an optimal specific energy density, it is possible to minimize the residual internal stresses that lead to product distortion. In the future, the results can be supplemented by studies of the influence of residual stresses of compression forces under the influence of a laser beam at a constant applied power. With the use of a calculation model, which allows you to calculate the residual stresses when applying the next layer, depending on the speed of the laser movement, power and distance between the applied tracks, it is possible to obtain high-precision parts with specified properties. The model has been adapted to obtain a quantitative estimate of the residual thermal stresses depending on the speed of movement and laser power for the heat-resistant alloy Inconel 718. The optimal modes for minimizing these stresses and reducing the distortion of the part have been determined.

UDC 668.049: 623.585: 621.19

COMPARATIVE STUDIES OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AlSi10Mg SAMPLES PRODUCED BY THE TRADITIONAL METHOD AND BY THE TECHNOLOGY OF SELECTIVE LASER MELTING

S.V. Adjamskiy[2,3], Ph.D., G.A. Kononenko [1,3], Dr.Sc., R.V. Podolskyi [1,3], Ph.D., Dementieva Zha.A.[1]

[1]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[2]Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[3]LLC «Additive laser technology of Ukraine», Dnipro

Additive manufacturing technology, also known as 3D printing, has been used more and more recently, and the number of materials and methods that can be used is expanding.

As part of the work, it is necessary to establish rational modes of manufacturing samples from AlSi10Mg aluminum alloy with a layer thickness of 40 microns using the technology of selective laser melting, to study their mechanical properties, and to compare them with samples made by the traditional method of production. To determine the structural state of the alloys, optical microscopy was used, granulometric analysis was performed using a scanning electron microscope, and mechanical properties were determined according to the standard method using a tearing machine.

It was found that when the scanning speed is increased to 1200 mm/s, the distance between the tracks plays a significant role in obtaining high density. From the analysis of mechanical properties, it was established that the samples made by VLP technology have a higher value of temporary resistance by 28%, and lower values of plasticity characteristics (relative elongation and relative narrowing) by 17.4% and 31.7%, respectively, compared to samples, made according to the traditional method of production.

The dependence of the change in the density of the experimental samples made by the VLP technology with AlSi10Mg on the manufacturing parameters was established. It was established that at a scanning speed of 1000...1100 mm/s, the samples have an average pore size of 2...7 μm; samples made at a scanning speed of 1200 mm/s - from 1 to 5 μm.

Application of the obtained results will make it possible to manufacture parts with increased strength characteristics.

UDC 669[017.15+058]

PHASE COMPOSITION OF THE $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_{0.8}B_{0.6}$ HIGH-ENTROPY ALLOY OBTAINED BY THE ARC MELTING METHOD

O.M. Myslyvchenko, Ph.D.

Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

In 2004, a new type of materials was developed - high-entropy alloys (HEA) [1-2.]. Investigation of HEAs have shown that they are promising wear-resistant materials because they simultaneously exhibit high fracture toughness, hardness, high-temperature resistance, and an excellent combination of high strength and ductility. This paper presents the results of research on HEA of the following composition $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_{0.8}B_{0.6}$.

The investigated alloywas obtained by the arc melting method using metals with a purity greater than 99.5 at% and titanium diboride powder as initial components. In the work, TiB_2 is used as a raw material because the thermal properties and density of boron are significantly different from those of

metals, which makes melting difficult. Melting was carried out with a nonconsumable tungsten electrode on a copper water-cooled hearth. In the first stage, seven metals, namely Ti, W, Cr, Fe, Co, Ni, and Al, were melted in an arc furnace in required ratios. The resulting ingots were mechanically crushed to powder, which was mixed with TiB_2 powder and remelted six times to homogenize the composition.

The XRD analysis data of the as-cast $AlCr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3W_{0.5}Ti_x$ alloy show that it crystallizes with the formation of simple solid solutions based on BCC and FCC phases whose lattice periods are a=0.2920 and a=0.3615 nm, respectively. After addition of TiB_2 powder to this alloy and repeated remelting, a substantial decrease in the content of the BCC phases occurs, and the presence of boride with a W_2CoB_2-type crystal structure (127 space group) is recorded. Moreover, the BCC solid solution in the boron-containing sample decomposes into two phases, namely BCC_1 and BCC_2, with lattice parameters close to those of tungsten and iron. According to the XRD analysis data, the content of the FCC phase after the addition of TiB_2 remains unchanged, which indicates that boride forms from the BCC phase. It is worth noting that the lattice parameters of the solid solutions based on phases with BCC1 and FCC structures slightly increase after the addition of TiB_2, which may indicate the partial dissolution of boron and titanium in cubic phases.

References

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.

UDC 669.18.046.517: 621.746

NEED FOR STEEL DEGASATION AT PJSC «KAMETSTAL»

V.P. Piptyuk, Ph.D., S.V. Grekov, O.V. Kuksa, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Prospects for the expansion of the quality range of steel produced at PJSC "Kametstal" require the development of out-furnace processing technologies in order to provide opportunities for additional improvement of the quality of the metal. The production of axial and other carbon and high-carbon grades of steel is associated with the probability of the formation of flocs in the continuously cast billet. The reason for this is the content of excess hydrogen and other gases after the processing of the metal melt at ladle-furnace units. The absence of a converter workshop of the equipment for steel degassing reduces the conditions for the production of quality metal, limits the brand list of orders and narrows the potential opportunities of a large manufacturer of metal products.

Modern technological routes of out-of-furnace processing of steel in world metallurgy in the vast majority of cases include vacuuming of liquid metal melt in a steel ladle as one of the important, necessary and penultimate operations before pouring. The availability of appropriate equipment and the implementation of such an operation during the production of steel is determined not only by the possibility of meeting the necessary requirements regarding the content of hydrogen, oxygen, nitrogen and carbon, the final adjustment of its chemical composition, but also by obtaining "clean" metal from non-metallic inclusions.

The variety of existing and applied methods of out-of-furnace (ladle) processing in steelmaking production made it possible to obtain steel with the necessary requirements, ensured more efficient use of expensive energy and material resources, and increased the competitiveness of manufactured metal products.

In recent decades, the development of new grades of steel with specified properties and the regulated content of harmful impurities and alloying elements, so-called "pure steels" [1, 2], which were produced using various out-furnace processing technologies, continued.

The analysis aimed at improving the equipment for ladle processing of steel indicates the preservation of trends in the development and use of multifunctional complexes for the implementation of processes of vacuuming, refining and fine-tuning of steel (composition and temperature) while minimizing the cost components.

In world metallurgical practice, degassing of steel in a steel ladle has become widespread (VD, VOD - chamber methods; DH - batch and RH - circulation methods and their modifications; RM - pulsation mixing (vacuum method)).

Taking into account the analyzed data for the conditions of the converter workshop of Kametstal PJSC, a direct technological route (converter – ladle-furnace unit – vacuum degasser – continuous steel casting machine) of steel production with out-furnace vacuum degassing is recommended for further consideration as an acceptable option.

References

1. Trends in the development of high-quality steel production technology and fire-resistant production / A. Bur, R. Brookhouse, R. Fandrich, K. Dannert // Ferrous Metals. - April 2017. – P. 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. – P. 456-471.

UDC 669.17.046.517B.083.133

DEVELOPMENT OF A CRITERIA FOR EVALUATING THE PROCESS OF DISTRIBUTION OF ELEMENTS IN THE «METAL – SLAG» SYSTEM DURING OUT OF FURNACE STEEL PROCESSING

D.N. Togobitskaya, Dr.Sc., I.R. Povorotnia, Ph.D., A.I. Bel'kova, Ph.D., V.P. Piptyuk, Ph.D., N.E. Khodotova

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Modern expanded views on the physico-chemical processes between metal and slag, the properties of chemical elements and the regularities of the formation of their compounds, the changed conditions of production, the raw material base and the modernization of steelmaking units require taking into account new factors that cause the transition of elements in the «metal-slag» system and simplifying the form of recording and duration of calculations. In the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, the structuring of models to determine the final content of silicon, manganese, sulfur, and phosphorus is carried out on the basis of a combination of the established informative physicochemical parameters of metal, slag melts and additives, their complex ratios and technological parameters, which reflects a new approach to justifying decisions regarding assessment their absorption efficiency. The equilibrium values of sulfur and phosphorus distribution were calculated according to the models of E.V. Prikhodko and D.M. Togobitskaya [1], which are developed based on the analysis of accumulated information in databases. The results of the comparative analysis of the actual distribution with the equilibrium one reflect the degree of remoteness and approach to the rest stage (completion of ion exchange processes) of the «metal-slag» system. As the data analysis shows, part of the data sample of the 09Г2С steel grade and its modifications have approached the equilibrium value for sulfur, but a significant part of the melts is at the stage of significant distance. The evaluation of the efficiency of the element distribution process was carried out according to the following criterion: $\xi = \frac{Le_{кін} - Le_{поч}}{Le_{поч}} \cdot 100\%$, where $Le_{кін}$ – is the value of the distribution of the element between the final metal and slag, $Le_{поч}$ – is the data of the distribution of the element between the initial metal and slag. In the case when the value of $\xi \geq 1$, the process of sulfur removal takes place with its removal from the slag phase, the greater the difference from 1, the more efficiently the desulfurization process proceeds, but in the case that $\xi \leq 1$, segregation of sulfur in the metal melt occurs. The calculation based on the criterion ξ for evaluating the distribution of sulfur showed that its value for the entire data sample is greater than one, with the minimum mark at the level of $\xi min \approx 3.5$, and the maximum $\xi max \approx 730.9$. The values of the ξ criterion depend on the processes of sulfur recharging between metal and slag and are expressed by the interatomic interaction parameter, which is calculated as the difference between the sulfur charge in metal and slag melts: $\Delta Zc^S = Zc^Sмет - Zc^Sшл$. The smaller the values of ΔZc^S, the higher the indicators of the ξ criterion and the approach of the system to the equilibrium state, respectively. As a result of the selection of the data most remote in terms of the equilibrium value of sulfur, when expressing predictive models of the type $lgL_{Sфакт} = f(\rho_{шлаку}, \Delta Zc^S)$ $R^2 = 0,7$, which confirms the continuation of cooperative ion exchange processes in them, in contrast to melts closer to equilibrium on which this parameter has no significant informative value $R^2 = 0,089$. The proposed criterion demonstrates the effectiveness of using the physicochemical apparatus of the concept of directional chemical communication for the description of complex metallurgical processes, in particular, the analysis of the completeness of the flow of physicochemical interactions in the «metal-slag» system, which is a lever of influence for obtaining competitive metal of the quality demanded by metal consumers.

References

1. Prikhodko E.V. Physico-chemical modeling of processes of interatomic interaction in metallurgical melts / E.V. Prykhodko, D.N. Togobytskaya // Herald of PGTU. - Issue 7. - Mariupol. -1998. - P.72 - 83.

UDC 669.162.267.6

DEVELOPMENT OF CALCULATION MODELS OF SPECIFIC MAGNESIUM CONSUMPTION AND SULFUR CONTENT IN CAST IRON UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF INJECTION DESULFURATION OF CAST IRON

A.P. Shevchenko, Dr.Sc., I.O. Manachyn, Ph.D., B.V. Dvoskin, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Ukrainian technology for the process of injection desulfurization of cast iron with granular magnesium was developed by the Institute of Ferrous Metallurgy and the Titanium Institute together with a number of organizations [1,2,3]. The conditions for using extra-furnace desulfurization of cast iron at these enterprises are very different: by the mass of cast iron in the ladles, by the required volumes of desulfurization, by the initial and required final sulfur content. Based on the obtained and available actual indicators and parameters of cast iron desulfurization, a data bank of more than 3000 control treatments of cast iron has been formed - with the sulfur content in the original cast iron, as a rule, being in the range of 0.03-0.06-0.07%. The mass of cast iron in ladles ranges from 40 to 350 tons. The sulfur content in cast iron after desulfurization is mainly in the range of 0.005-0.010%, some of the cast iron is produced with a content of ≤0.002%. In the practice of creating and mastering the process of desulfurization of cast iron by injection of magnesium, reliable prediction of the expected values of the final sulfur content in cast iron is required when varying the initial sulfur content in cast iron, the specific consumption of magnesium and the standard size of ladles in which desulfurization of cast iron is performed. For this purpose, using the obtained array of actual data, models were developed to predict the parameters of the required magnesium consumption for the final sulfur content in cast iron with changing values of the initial sulfur content in cast iron, changing specific consumption of magnesium, and varying mass of cast iron in ladles. These data are presented by the corresponding calculation models:

$q_{Mg} = 0.36 + 8.5*(S_{start} - 0.02) - ((\ln(S_{end}) - \ln(0.015))/11.5)$ – *ladles with cast iron weight less than 75 t*

$q_{Mg} = 0.206+7.5(S_{start} -0.02)+(\ln (0.02)- \ln (S_{end}))/10.5$ – *ladles with a cast iron weight of 80-130 t*

$q_{Mg} = 0.200+7.0(S_{start} -0.02)+(\ln (0.02)- \ln (S_{end}))/9.1$ – *ladles with a cast iron weight of more than 140 t*

The developed calculation models have been tested on almost all operating cast iron desulfurization complexes. Their legitimacy has been confirmed. These results of work and research were an integral part of the technical and technological regulations of existing and newly created capacities for desulfurization of cast iron.

References

1. Шевченко А.Ф., Маначин И.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 И.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.

Automation and modern methods of controlling metallurgical processes and the quality of metallurgical products

UDC 621.771.685.5

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF FREE ROLLING SPEED MODE WITH FUZZY CONTROLLER

O.P. Yehorov[1], Ph.D., M.O. Rybalchenko[1], Ph.D., I.O. Manachyn [1, 2], Ph.D.

[1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro
[2]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The best high-speed mode of rolling mills is the mode of free rolling with loop formation in finishing groups of cages [1]. Stabilization of the loop is carried out by the control system of the rotation frequency of the rolls of rolling cages based on the information of the sensor of the position of the loop.

The increase in the loop depends on the frequency of rotation of the rolls of adjacent cages and the coefficient of extraction of the rolled product in the cage following the adjustable gap.

To set up the system, it is necessary to know the numerical characteristics of the influences that disturb and affect the size of the rolling loop.

The change in the rotation frequency of the main drive of the cages during the stabilization of the size of the rolling loop in the intercellular gap of the cages of the finishing group of the continuous rolling condition was studied [2]. The change in the rotation frequency of the rolls characterizes the total effects of the rolling mode on the size of the loop.

Research have shown that in a non-stationary realization it is possible to single out a trend that is described by a completely deterministic dependence, and to conduct an analysis of a random stationary realization with respect to this trend.

A structural diagram of the circuit for regulating the position of the rolling loop was developed (regulators are calculated according to the method [3]). This scheme includes: an electric wire with a current loop, a speed loop, a speed regulator, a rolling loop, a loop position regulator, a compensator of disturbing influences. The compensator is based on the Fuzzy controller [4] and produces a control effect depending on the inconsistency in the loop control circuit. In this way, the low-frequency disturbance component at the rolling speed, which can reach 10% of the rolling speed, is monitored and compensated.

The obtained data of changes value of the loop without and with a compensating circuit. The size of the loop in the system without a compensating circuit when rolling a thicker rear part of the rolled product reaches the maximum permissible size. This does not happen in a system with a compensating circuit.

It is possible to stabilize the value of the loop in a given range either by increasing the regulator coefficient, thereby worsening the dynamics of the entire multi-link control system of the high-speed rolling mode, or by using the proposed method of adaptive disturbance compensation. The proposed method of compensation with the help of an adaptive regulator significantly improves dynamic processes in the system. When simulating the operation of the high-speed rolling mode control system, the loop length deviation did not exceed 0.02 m.

References

1. Automation of technological processes in small-grade rolling mills: monograph / A.S. Beshta, V.N. Kuvaev, O.E. Potap, A.P. Yegorov - Dnipropetrovsk: Zhurfond, 2014.-283 p.
2. Yegorov A.P. Improvement of systems of automatic control of multi-connected electric drives of a group of cages during rolling with loop regulation: dissertation.candidate technical Sciences: Dnipropetrovsk, 1981.145 p.

3. Yegorov O.P., Rybalchenko M.O., Manachyn I.O. Digital methods of research and calculation of regulators in automatic control systems: Study guide. Ukrainian State University of Science and Technology. Dnipro, 2022.P.124
4. Yegorov O.P., Mykhaylovskyi M.N. Designing control systems in the Fuzzy environment Logic Toolbox: Study guide. Dnipro: NMetaU, 2020. P. 85.

UDC 675.285: 627.36.008.84

THE EXPERIENCE OF RESEARCHING A NATURAL GAS SEPARATOR USING NON-DESTRUCTIVE CONTROL METHODS

N.O. Hryhor'eva, T.P. Miroshnikova

Professional College of Welding and Electronics named after E.O. Paton, Dnipro

Diagnostics of the equipment allows the customer to find out about the problems in the equipment and take timely measures to eliminate them. Diagnostic works - include a preventive inspection of the equipment and detection of possible defects (or the need for adjustment) of equipment nodes and mechanisms. One-time diagnostic work is carried out in the event of a malfunction. Scheduled diagnostic work is preferred. As a rule, they prevent equipment breakdown and, therefore, its long-term downtime.

Non-destructive testing is a set of properties and methods of objects in which destruction of the research object is not required. That is, the research object fully retains its properties and can be used for its intended purpose.

As part of the research, the following methods are used for diagnosing the non-destructive control of the natural gas separator:

- visual and measuring control;
- ultrasonic control and thickness measurement;
- magnetic powder control method;
- determination of hardness by the impact impression method.

A natural gas separator is a complex technical device designed to clean gas flows from mechanical impurities, water fractions and other foreign inclusions. It is used to equip gas processing enterprises, compressor and distribution stations. An additional function of such equipment is to maintain the pressure in the system at an optimal level.

UDC 621.771: 685.5

MODERNIZATION OF THE SYSTEM OF AUTOMATED ADJUSTMENT OF THE SPEED MODE OF THE SECTIONAL ROLLER GANG OF THE SMALL-ASSORTED REFRIGERATOR

O. Yu. Potap[1], Ph.D., M.D. Zinchenko[1], Ph.D., V.G. Kysliakov [1,2], Ph.D., M.V. Butenko[1]

[1]Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro
[2]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Accident-free stacking of rolled bars on the cooling table of a continuous bar mill is ensured by the appropriate setting of the speed mode of the approach sectional roller table. The optimal mode is considered to be one in which, at the moment the front end of the next rod arrives at the refrigerator, there is no spatial gap between it and the rear end of the previous rod. In this case, the ejecting device must be raised to a height that guarantees reliable separation of adjacent rods at the cooling table inlet [1].

Technical solutions for the automated adjustment of the speed of the sections of the feeding roller conveyor are based on the assumption of a negligibly small duration of the transition of the rods from one speed to another in the acceleration process [2]. In the work, the justification of such an assumption was verified by means of computer simulation modeling of the operation of the corresponding automatic control system. It has been proven that for certain values of the rolling speed and the length of the rods being transported, neglecting the duration of the transient processes of the acceleration of the rods on the roller table is unacceptable due to the occurrence of emergency situations due to the non-separation of adjacent rods at the entrance of the cooling table.

A multifactorial active experiment was conducted using a computer model of the rods transportation process. The result is a multiple regression equation that relates the length of the spatial gap ΔS between the end of the previous bar and the beginning of the next bar with process parameters such as rolling speed V_0, speed of the first V_1 and second V_2 rolling sections of the roller table and bar length. After determining the significance of the coefficients, the equation took the form

$$\Delta S = 2{,}62 + 0{,}39\overline{V}_1 + 0.42\,\overline{V}_2 + 0.07\overline{V}_1\overline{V}_2 - 1.5\overline{V}_0,$$

in which $\overline{V}_0$, $\overline{V}_1$ and $\overline{V}_2$ are the relative normalized values of the respective velocities.

The modernization of the existing automatic control system (ACS) consists in determining the optimal values of the speeds of the sections of the roller table based on this equation.

Simulation modeling of the modernized ACS for sectional roller table revealed its effectiveness and feasibility of implementation, in particular, at small-grade mills of ArcelorMittal Kryvyi Rih PJSC

References

1. Beshta A.S. Aavtomatyzatsiia tekhnologicheskikh processov na melkosortnykh prokatnykh stanakh: monografy// A.S. Beshta, V.N. Kuvayev, O.Yu. Potap, A.P. Yegorov. Dnipropetrovsk: Jurfond, 2014. 283 p.
2. Kuzmenko A.G. Proyzvodstvo mernogo prokata na nepreryvnykh melkosortnykh stanakh. – M.: Metalurhiia, 1997. 310 p.

UDC 621.771.23

INCREASING THE ACCURACY OF THE CALCULATION OF ENERGY-FORCE PARAMETERS OF ROLLING ON A PLATE MILL

I.Yu. Prykhodko, Dr. Sc., S.O. Vorobei, Dr. Sc.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The research was carried out on one of the thick-sheet mills (TLS) 3600. The program for calculating the energy parameters of rolling is used in the automatic control system of the sheet rolling process. The optimal rolling parameters and product quality depend on the accuracy of the calculations. The existing 3600 algorithm and computer program use so-called "hardness curves", which determine the dependence of hardness coefficients on the deformation temperature for a group of steels. Despite all its simplicity, this approach provides in most cases good results of predictive calculations of energy and temperature parameters of the rolling process. However, this does not take into account a number of important factors, in particular, the change in the chemical composition of steel within the same brand. In addition, the currently existing 25 hardness curves cover about 780 different grades of steel and they are grouped in such a way that in some cases they can lead to a high calculation error.

At Iron and Steel Institute, a program for calculating the temperature and energy parameters of rolling was developed and tested in the conditions of hot strip mills. The developed program takes into account the following additional factors that are not taken into account in the TLS 3600 algorithm:

- the specific content of the main chemical elements in steel (through the carbon equivalent);

- the rate of deformation, which varies from 3 to 50 sec^{-1} and therefore significantly affects the amount of resistance to deformation;

- the influence of friction and non-contact external zones - through the coefficient of stress in the deformation zone, adapted to the conditions of the finishing stand of mill 3600;

- dynamic and static weakening of steel depending on the time of pauses between passes;

- the effect of elastic deformations of the working rolls.

Taking into account the structure of the automation system of the 3600 mill, the only effective method of adapting the existing model is the correction of the coefficients of the hardness curves in the conditions of a specific rolling mode, in which the number of passes, crimping, temperature and power parameters of the process are known. This approach allows you to adapt the hardness curves, both according to our (conditionally accurate) model before rolling the first sheet of the batch, and according to the actually measured temperature-deformation and energy parameters in the second and subsequent passes.

The developed algorithm for adapting the coefficients of the hardness curve at nodal temperature points takes into account the linear interpolation of data provided by the existing algorithm.

Data processing showed that the adapted model made it possible to increase the accuracy of calculations by approximately 1.3 times. Thus, the root mean square deviation of the rolling force when using the existing model was 12.4 MN, and the developed and adapted model was 9.6 MN.

Metal Science and Heat Treatment of Steel

UDC 669.017:668.08.014.296.3

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN WEAR RESISTANCE, STRUCTURAL CONDITION AND PEARLITE HARDNESS OF HIGH-CARBON STEEL

O.E. Merkulov Dr.Sc., R.V. Podolskyi, Ph.D., O.A. Safronova, O.P. Klinova

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The operational properties of railway rails made of structural steels primarily depend on the mechanical properties. It should be noted that the wear resistance of railway rails in the wheel-rail system is one of the most important characteristics of its performance. Wear is considered to be a change in the profile of the surface along the rolling circle of the wheel of the surface of the rail head due to the forces of interaction between the wheel and the rail during operation. Hardness has traditionally been used to evaluate the wear resistance of pearlite rail steels. This does not mean that high hardness is the direct cause of high wear resistance. In pearlitic steels, the wear resistance increases as the carbon content increases and the interlaminar pearlitic distance decreases. Pearlite consists of alternating plates of iron and iron carbide and has a distance between the plates that varies depending on the temperature of formation as the rail cools after rolling. As the cooling rate increases, the distance between the pearlite rails decreases, thus increasing the hardness provided in head-hardened rails. A dislocation-enriched layer with a compacted structure of solid carbide itself probably increases the wear resistance.

Thus, in pearlite steels, wear resistance is provided by the high carbon content and the small distance between the pearlite plates (which is achieved due to the hardening process of the rail head), both of which increase the hardness. To confirm the secondary effect of hardness on wear, Hirakawa and others increased the hardness of samples with a pearlite structure by lowering the tempering temperature, but this statement was not confirmed in laboratory tests (they did not increase wear resistance).

UDC 621.74:669.13.017

ANALYSIS MATERIALS BRAKE PADS OF THE ROLLING STOCK

I.O. Vakulenko[1], Dr.Sc., S.O. Plitchenko[1], Ph.D., O.M. Perkov[2], Ph.D.

[1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro
[2]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

When choosing a material for rolling stock brake pads, in addition coefficient of friction, occurrence of a temperature gradient along thickness of the pad itself and rim of the railway wheel should be taken into account. Under conditions of intensive braking, the temperature on rolling surface of the wheel can exaggerate value beginning phase transformations in the steel. Based on this, in metal near the rolling surface of the rim wheel, starting from average range temperature, increase degree of the plastic deformation and heterogeneity of its distribution will contribute to the increase of heterogeneity development processes structural transformations of the metal. The random nature of the action a certain number influencing factors on the pair brake pad - rolling surface of a railway wheel practically makes it impossible to predict nature change a set of the metal properties. An additional complication general picture of the structural transformations in the wheel metal is the cyclic nature change heating temperature during operation of the rolling stock. Thus, when determining material of the brake pad, in addition to the coefficient of friction, one should take into account possible changes at properties metal of the railway wheel after each act of braking. Moreover, modern solution to the issues of increasing specific load on the wheel pair, due to the use of railway wheels after thermal strengthening, significantly

complicates the choice of brake pad material. Indeed, during formation of the carbon steel structure without forced cooling of the railway wheel rim, degree super saturation with carbon atoms ferrite layer of the pearlite colony practically does not differ from the ferrite of the steel after annealing. On other hand, use of the accelerated cooling to increase strength of the steel is accompanied not only by an increase dispersion of the pearlite colony, but also degree super saturation ferrite of the pearlite by carbon atoms. In this case, at accordance with increase strength characteristics of the steel, sensitivity of such wheels to heating during braking will increased. As a result, coefficient thermal conductivity (λ) material of the pad will become significant role. Moreover, increase on carbon concentration in general contributes to a decrease in λ of the cast iron. However, this is most likely caused by an increase at volume fraction of the metastable high-carbon phase. Indeed, proportion to the increase volume fraction of the cementite, decrease at coefficient of the thermal conductivity is observed. On other hand, appearance graphite inclusions in structure the cast iron have a qualitatively opposite effect on λ. As a result, the change at ratio between amount graphite and cementite in the cast iron structure can be considered as a factor affecting the value of λ. In addition to the dispersion of structural components, their morphology acquires a certain importance. After replacing graphite inclusions of the gray cast iron by flakes, the thermal conductivity can increase by up to 20%. Compared to cast iron, composite materials with a high level of friction coefficient have been widely used. Numerous attempts at application encounter certain difficulties. In addition to the more complex pad manufacturing technology, composite materials have a very low coefficient of thermal conductivity. As a result, there are restrictions on the seasonal nature of their use. Compared of the cast iron, alloys type of the bronzes with additional phases of the graphite and ceramics are less common. This made it possible to increase coefficient of thermal conductivity several times, compared to the gray cast iron. However, the high hardness of such material increases wear of the wheel and content of the chemical elements increases its cost. The given information can be useful for continuing search optimal structural state and chemical composition of the material for brake pads of the rolling stock.

UDC 532.64:669.046

ABNORMAL INCREASE OF CONTACT ANGLE OF WETTING OF THE STEEL SUBSTRATE WITH TIN AS A FUNCTION OF TEMPERATURE

E.P. Shtapenko[1], Dr.Sc., Yu.V. Syrovatko[2], Ph.D.

[1]Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro
[2]Dnipropetrovsk Branch of the State Institution "Soil Protection Institute of Ukraine", Dnipro

Studying of the temperature dependence of the contact angle of wetting of the solid substrate with a melt drop is of practical interest in many industries. For example, when composite materials are impregnated to ensure better wetting between the structural components, it is necessary to determine the temperature of wetting threshold of the system. Several studies [1, 2] have noted the cases of abnormal increase of the contact angle with the rise in temperature of melt drop - solid substrate systems. The authors of [1, 2] assume that the increase in wetting angles occurs as a result of formation of new chemical compounds between the contacting substances or a change in the surface structure. We studied this phenomenon in the system of tin drop – substrate of steel 12Х15Г9НД.

The contact angle of wetting of the steel substrate with liquid tin was determined with the use of sessile drop method. In order to avoid the formation of unwanted substances, the heating was carried out in the nitrogen atmosphere. To construct each subsequent point of dependence of the contact angle on the temperature, a new individual drop of tin was provided on the substrate and examined. The wetting angle was calculated by scanning digital photographs of the drop using the TLC-manager software. After the experiment, no iron atoms were detected on the surface of the tin drop during the research by the X-ray fluorescence and atomic absorption methods. Insignificant amount of nitrogen oxides was found on the surface of the tin drop by the ion-selective method. However, it could not significantly affect the contact angle dependence on the temperature.

During the experiment, it was found that at the beginning of the study at the temperature of 525 K the value of the wetting angle was 130°. With the increase in temperature the wetting angle decreased, and its value was equal to 55° at 650 K. However, as the temperature increased further to 725 K the wetting angle value became higher again, reaching 112°. We can assume that the increase in wetting angle in the tin-steel system is observed as a result of changing energy of interaction between the melt and substrate atoms. Wetting in the liquid tin–steel substrate systems was previously studied in [3]. However, the phenomenon of abnormal increase of the angle was not found in [3], since the authors investigated the contact angle dependence on temperature by continuously heating the system to high temperatures. Therefore, after a decrease in the contact angle of wetting of the solid substrate by the melt drop in [3], no further increase in the angle was observed as the temperature increased. Regarding our study, a new drop of tin was provided and studied each time to construct each point of dependence of the contact angle on temperature. Thus, at each point of dependence, the wetting angle was formed anew, which did not exclude its higher values compared to the values of wetting angles of previous drops of the substrate at the lower temperature.

References

1. Reaction induced anomalous temperature dependence of equilibrium contact angle of TiZr based glass forming melt on Al_2O_3 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

UDC 539.385.016.3.01

DETERMINATION EFFECT PEARLITE DISPERSITY ON ENDURANCE AT CYCLIC LOADING OF THE CARBON

I.O. Vakulenko[1], Dr.Sc., O.M. Perkov[2], Ph.D., S.O. Plitchenko[1], Ph.D

[1]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro
[2]Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

According to experimental studies of the carbon steel, thickness ferrite layer of the pearlite has a certain influence not only on endurance of the fatigue, but also on appearance of the cyclic load diagram itself. Conditional distribution of curves on region of the low- and high-cycle fatigue is caused by qualitative changes at mechanism propagation of the plastic deformation in structural components of the steel. As a result, transition from one section of the cyclic load curve to another is quite often accompanied by occurrence significant violations of its monotonous course. Due appearance of the load curve violations, they are often called "break points", with coordinates on the abscissa (N_d) and ordinate (σ_d) axes, although in reality the sector of the violation has a certain size. Moreover, depending on structural state of the carbon steel and conditions of cyclic loading, position specified section on the curve can significantly shift and change size and appearance. Regarding the reasons for their occurrence, there is no unambiguous interpretation. According to various research results, most often, the cause is considered to be violation development processes of structural transformations, the homogeneity distribution of the plastic deformation, or a change at sliding system of the dislocations under cyclic loading. There are assumptions about a change at stress state of the metal material before of the crack front moving. It is believed that under conditions of a relatively low degree of the cyclic overload, the metal is mainly in a flat deformed state. Other conditions of crack growth correspond to area of the low

cyclic fatigue (area high degree of the cyclic overload). This case corresponds to the plane stress state. According to analysis of the cyclic load curves of the carbon steel with a pearlite structure, it was determined that decrease dispersion of the pearlite is accompanied by a shift position of the transition area on direction of the increased endurance, with a simultaneous decrease spread values of the cycle amplitude. To determine nature accumulation defects in the crystal structure during load cycle, depending on the dispersion of pearlite, the ratio $\sigma_a=K(Ni)^{-m}$ was used, where σ_a is amplitude of the cycle , N_i - is endurance at fatigue , K is a constant, and m is an exponent. After converting the specified ratio, it became possible to estimate rate of the change cycle amplitude ($d\sigma_a/dN_i$), which is a tangent of the cyclic load curve at a certain endurance value. For the corresponding thickness ferrite layer of the pearlite colony, measurement density of the dislocation accumulation (ρ) showed existence of the ratio $d\sigma_a/dN_i \sim 1/\rho$. Its use made it possible to substantiate mechanism of the structural transformations under cyclic loading. When σ_a decreases, the density of mobile dislocations decreases proportionally, that is necessary to maintain conditions at constant propagation of the deformation per cycle. The low increase in ρ corresponds to the increased uniformity location of the dislocations in structural components of the steel. As a result, the moment occurrence of the sectors with a non-monotonic location of the dislocations and their transformation into cores of the metal destruction is shifted in the direction increase endurance of the fatigue. When σ_a corresponds of the sector high amplitudes of the curve, the structural changes in the metal have a qualitatively different character. At high increase dislocations to ensure the appropriate high degree of deformation per cycle will accelerate formation of area with a non-monotonic location of dislocations in structure of the steel. Accordingly, moment of formation germ of the destruction at cyclic loading will be shift towards decrease endurance at fatigue.

UDC 669.018.294:620.19

INFLUENCE OF ACTIVE MEDIUMS AND NON-METALLIC INCLUSIONS ON THE DURABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF BEARING STEEL

S. I. Gubenko[1, 2] Dr.Sc., E. V. Parusov[1], Dr.Sc.

[1] Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[2]Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro

The influence of the types of non-metallic inclusions on the level of their activity in the initiation of corrosion damage and the mechanical properties of bearing steels was studied. Accelerated corrosion testing methods were used, which made it possible to cause in a short time the obvious destruction of steels ШХ15 and ШХ15SG from specially prepared melts programmatically contaminated with various types of non-metallic inclusions [1-5]. Low cycle fatigue tests were carried out in the air and in corrosive environments. An accelerated method was used to test the susceptibility of steels to corrosion cracking using the «IM-12» installation. Fatigue strength tests were carried out on a «NU» type machine with base $N=3\cdot10^6$ load cycles.

When testing steel BCr15 and BCr15SiMn for low-cycle fatigue N in the air, the influence of the type of non-metallic inclusions on the fatigue characteristics is observed: the lowest value of N was obtained for steels contaminated with sulfides, then it increases in the presence of corundum and spinels, silicates and, finally, titanium carbonitrides, respectively. The corrosive environment has led to a significant decrease in the durability of steels under low-cycle fatigue, however, the type of inclusions significantly affects this indicator. The coefficients of influence of the environment βc have been determined, which are the ratio of the durability of steel in air to a similar indicator in a corrosive environment. It is shown that the greater the value of this coefficient, the more strongly non-metallic inclusions reduce low-cycle durability. A decreasing series has been established showing the degree of harmful effects of inclusions on the initiation and development of corrosion damage: sulfides (Fe, Mn)S, FeS-MnS → corundum and spinels Al_2O_3, $MgO\cdot Al_2O_3$, $MnO\cdot Al_2O_3$, $(Mn, Mg)O\cdot Cr_2O_3$ → silicates SiO_2, $MnO\cdot SiO_2$, $FeO\cdot SiO_2$ → titanium carbonitrides TiCN.

High-speed tests to determine the susceptibility to corrosion cracking showed that the mechanical properties of steels depended on the type of non-metallic inclusions when tested in air. Tests in corrosive environments led to a redistribution of the relative influence of the type of inclusion on the mechanical properties of bearing steels. The tensile strength of steel σ_B, tear resistance S_c, plasticity characteristics δ and ψ decreased most significantly for melting with sulfides; for other types of inclusions this decrease is less significant.

The most harmful role of sulfides in reducing the durability and mechanical properties of bearing steels in active environments is shown and justified.

References

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.
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.

UDC 668.01-122.51: 631.4.005.13

EFFECT OF CARBON CONTENT IN BAINITE GRADE STEELS ON MECHANICAL PROPERTIES AFTER NORMALIZATION AND TEMPERING

O.I. Babachenko, Dr.Sc., G.A. Kononenko, Dr.Sc., R.V. Podolskyi, Ph.D., Safronov O.L.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

According to current technology, Ukrainian-made rails are inferior to foreign analogues in terms of mechanical properties and, as a result, operational durability. The throughput capacity of rails produced in Ukraine is 0.5 billion gross tons, while a similar indicator in France, Japan is 1 billion gross tons, i.e. 2 times more. It is shown that increasing the strength characteristics of steel due to the development of a new chemical composition and heat treatment leads to an increase in operational characteristics.

From the literature analysis, it was established that the steels used in steel production cannot form a worn surface layer enriched with carbide. Also, since strain hardening is enhanced by the presence of a second phase (such as carbide), low carbon bainitic steels can be expected to deform less than pearlitic steels. The consequence of this is that, although a bainite steel may have an initial higher bulk hardness than a pearlitic steel, the bainite hardened worn surface may be softer than a pearlitic steel. This effect was observed in laboratory wear tests.

After normalization and tempering, it was found that the deviation of the average values of temporary resistance after tempering of all experimental steels 1...4 has a decrease in values by -15.46, -9.55, -7.94 and -2.52%, respectively, compared to the average values after normalization. The yield strength of experimental steels 1...4, in turn, has values of -16.31, +14.62, -12.42 and +29.75%, respectively, compared to the values of experimental steels after normalization. The relative elongation of test steels 1...4 has increased values by +15.12, +1.68, +24.91 and +22.18%, respectively, compared to the average values of test steels after normalization. The relative narrowing of test steels 1...4 has a

value of +28.73, +18.72, -32.74 and +32.15%, respectively, compared to the test steels after normalization.

UDC 669.162.262:669.131.6.001.5

INFLUENCE OF LIQUATION ON THE FORMATION OF GRAPHITE IN CAST IRONS

A. Yu. Borysenko Dr. Sc., G. V. Levchenko Dr. Sc.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The emergence of chemical, phase and different levels of structural heterogeneity in condensed media is an urgent scientific problem of the theory of phase and structural transformations during crystallization and in the solid state of metal alloys, the solution of which is necessary for the targeted formation of their properties. Different types of heterogeneity of the initial phases of metal alloys during subsequent transformations determine the regular formation of the final microstructure with its characteristic heterogeneity of chemical composition, type and distribution of defects in the crystal structure, internal stresses and other components of the internal structure and state of substances that affect their properties. It is obvious that in foundry alloys, among which gray irons occupy an important place, the hereditary influence of initial phase heterogeneity on their final structure and properties should be the most pronounced.

The results of analytical studies of the relationship between the chemical heterogeneity of gray cast irons and the structure of graphite are presented.

It is shown that in order to determine the values of chemical heterogeneity caused by liquation during the crystallization of metal alloys, it is necessary to use not calculated values of liquation coefficients based on thermodynamic calculations or analysis of state diagrams, but experimental data obtained by metallographic methods of analysis. The degree and direction of liquation depend on the composition of the alloy and the conditions of crystallization. The greatest influence on the degree of liquation has the carbon content, the increase of which leads to an increase in the liquation of most elements.

Crystallization of high-carbon cast irons (more than 2.8–3.0% C) leads to reverse liquation with silicon concentration in those areas of austenite that were previously separated from the liquid, that is, in the dendrites of primary austenite and in the central areas of eutectic colonies. In low-carbon (1.5–2.0% C) silicon-containing cast irons, silicon leaching is direct: in the core of dendritic branches, silicon is less than in the graphite eutectic matrix and on the periphery of the colonies. In low-carbon cast irons, silicon liquation in eutectic colonies is relatively small and turns out to be more difficult than in high-carbon cast irons.

Graphite formation occurs in liquation areas enriched in silicon and carbon. The reasons for the graphitizing effect in the liquation areas of some chemical elements and the absence of such an effect in other chemical elements remain unclear and require further research.

The most common alloying elements in gray cast iron: Ni, Cr, Mo, Cu, Al do not significantly affect the structure of graphite and eutectic colonies. The main effect of these elements is to regulate the structure of the metal matrix in the solid state. Mn, Cr, Mo and As are prone to direct liquation, i.e. they enrich peripheral areas of dendritic branches and eutectic colonies. Ni, Cu and Al, like silicon, are prone to reverse liquation with concentration in the middle of branches and eutectic colonies. There is no explanation of the reasons for the lack of action of these elements, comparable to the action of silicon and sulfur, on the formation of graphite in the presence of fundamentally identical laws of their liquation.

By affecting the phase-concentration inhomogeneity of crystallized gray cast irons, through a directed change in the chemical composition, the processing of the melt and the conditions of its crystallization can be controlled by the structure of the graphite and the metal matrix in order to achieve the required properties of castings.

UDC 621.771.23.09

INFLUENCE OF DEFORMATION MODES ON THE FORMATION OF SPECIAL BOUNDARIES IN THE STRUCTURE OF ULTRA-LOW CARBON STEEL

M. A. Kovzel[1], Ph.D., T. V. Kotova[2], Ph.D.

[1]Dnepropetrovsk scientific research institute of forensic expertise Ministry of Justice of Ukraine, Dnipro
[2]Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

An urgent problem at the present time is the improvement of the quality characteristics and the ability to deep drawing thin-rolled sheets made of ultra-low carbon steels, which are used for the production of structural parts in the automotive and machine-building industry by the method of cold stamping [1]. A promising method of increasing the complex properties of metal products from polycrystalline materials is the principle of grain boundary construction. This method consists in the development of temperature-deformation regimes that contribute to the formation of a structure with the maximum possible number of special low-energy grain boundaries of the $\Sigma 3^n$ type, and is based on the concept of lattices of coincident nodes [2].

It is of scientific interest to determine the relationship between the regimes of temperature and deformation treatments, the specific surface area of special grain boundaries of the $\Sigma 3^n$ kind and the improvement of the properties of low-alloy and high-alloy steels. For the first time, the presence of special grain boundaries in ferrite with a volume-centered cubic crystal lattice of low-alloy ferritic-pearlite steels was established [3].

In this work, the content of special boundaries $\Sigma 3$ 60° <111> in the structure of 01ЮТ steel deformed in the austenitic and ferritic temperature regions with air cooling was determined using EBSD-analysis. It was established that the content of special boundaries $\Sigma 3$ 60° <111> in the structure of 01ЮТ steel reaches a maximum value of 13,2% after rolling in the austenitic region with a degree of deformation of 32,3%. An increase in the content of special $\Sigma 3$ 60° <111> boundaries in the structure of steel processed in one pass at a temperature of 970-980°C, in comparison with the deformation in two passes and the end of rolling in the ferrite region at a temperature of 730-740°C (degree of deformation 62,9%), contributes to increasing the ability to deep draw hot-rolled steel 01ЮТ. Determination of rational temperature and deformation regimes will allow to control the properties of rolled metal by increasing the content of special boundaries in the structure of ultra-low carbon steel to obtain a high-quality thin sheet capable of deep drawing.

References

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. T. 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 α+γ фазовим станом. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2017. № 3. С. 10-21. ISSN 2312-2676.

UDC 621.785:669.15-194:669.1.017

INFLUENCE OF QUENCHING TEMPERATURE ON STRUCTURE FORMATION OF ALLOY STEEL

V. A. Lutsenko, Dr. Sc., T. M. Golubenko, Ph. D., O. V. Lutsenko, Ph.D.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The main mechanical properties of alloy steel products are acquired after heat treatment. Violation of the temperature and time regime of processing and excessive heating of metal products often leads to products with a change in the size of the initial austenite grains. Subsequently, changes in the size of austenitic grains can affect the martensitic structure obtained during the final heat treatment. Changes in the morphology of martensite affect the reduction of mechanical properties: impact strength, yield strength, hardness, etc. Therefore, studies of the effect of increasing the austenitization temperature on the martensite structure of 31CrMoV9 steel were conducted. In the normalized state, the structure of this steel consists of bainite and martensite.

The experimental steel is characterized by the fact that with an increase in temperature from 850°C to 1050°C, the amount of martensite in the structure increases from ~10 to ~50%, respectively, during normalization. This is mainly due to an increase in the total area occupied by martensite without changing its morphology. After heating to 850°C, 950°C and 1050°C, quenching and tempering, the structure of 31CrMoV9 steel consists of tempered martensite and residual austenite.

As the temperature increases, the initial average diameter of austenite grains increases, and the size of blocks and packets in martensite also increase. The size of martensite needles after quenching from a temperature of 850°C is on average 4 μm, from 950°C – 10 μm, and for quenching from 1050°C – 18 μm. The size of the austenite grain affects the martensitic transformation by changing the density of the nuclei and stabilizing the austenitic phase as the transformation progresses. With an increase in the quenching temperature, an increase in the microhardness of the segregation areas is also observed, while the total average microhardness of the steel decreases from 4060 MPa when heated to 850°C, 3960 MPa at 950°C, to 3894 MPa at 1050°C. This change in microhardness is likely due to an increase in the amount of residual austenite, since an increase in the quenching temperature increases the amount and degree of metastability of residual austenite, its beneficiation with carbon and alloying elements, which causes a decrease in the temperature of the onset of martensitic transformation and, as a result, an increase in the amount of residual austenite. When quenching from 1050ºC, the widest interval between the minimum and maximum microhardness values is observed, which may further adversely affect the properties of 31CrMoV9 steel. Therefore, it is recommended to set a quenching temperature of 850°C for the test steel, which will further save resources.

UDC 629.764

STUDY OF THE FEATURES OF THE 316 L STEEL MICROSTRUCTURE MANUFACTURED USING SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

Adzhamskiy S.V. [1,2], Ph.D., Kononenko G.A.[1,3], Dr.Sc.,
Podolsky R.V. [1,3], Ph.D., SafronovaO.A. [3]

[1] LLC "Additive Laser Technologies of Ukraine", Dnipro
[2]Institute of Transport Systems and Technologies of NASU, Dnipro,
[3] Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Corrosion-resistant alloys and steels are widely used in the medical, chemical, food, automotive, and aerospace industries. The modern technology of selective laser melting (SLP-technology) provides additional opportunities for the implementation of complex geometry and the design of metal products.

It is known that the method of production significantly affects the microstructure, which determines the complex of mechanical and operational properties. The purpose of the work was to investigate the features of the structural state of stainless steel 316 L, which is formed during production using SLP technology.

From the microstructural studies, it was established that the steel consists mainly of austenite, the average microhardness in the transverse and longitudinal section is 268 kg/mm^2, the presence of a small number of pores with a size of 1-7 μm and hot microcracks was established. When studying the microstructure after etching using the Marble reagent, the boundaries of the primary austenite grains were revealed and the directionality of the formation of the primary austenite grain in the form of an arc-shaped structure of the melt bath, which is characteristic of the repetitive Gaussian distribution of the laser energy during melting, was established. It should be noted that during etching with this reagent, no duplicates of the primary austenite grain were detected.

When studying the microstructure of the samples after etching with Kalling's reagent, an atypical multidirectionally oriented intragranular substructure was found, which is mainly located in the area of the space between the tops of the tracks of the next layer in the area where the tracks of the previous layer overlap. The microhardness in the area of the above-mentioned structure along the direction of construction is 239...251 kg/mm^2, and when checking the cross-section of this section, the hardness was 286...317 kg/mm^2, which indicates anisotropy of properties.

When applying differential interference-contrast illumination and a Nomarsky prism, the presence of elongated columnar grains spreading across the borders of the melt bath and having epitaxial growth in the direction of the maximum temperature gradient was established. It was established that the direction angles of these columnar grains are 15° to the construction direction. This is probably due to the rotation of the next layer of construction relative to the previous one. The length of these grains is 140±μm, which indicates the melting of about 3 layers of applied powder.

Thus, when analyzing the microstructure, it was established that 316L steel, manufactured by VLP-technology, has an arc-shaped austenite structure, which is characteristic of melting with a normal distribution of laser energy.

UDC 621.774.35

LOCALIZATION OF EPY FORMATION OF GRAIN STRUCTURE OF LOW-CARBON STEELS DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION

S. I. Gubenko, Dr. Sc.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro

Severe plastic deformation is one of the promising methods for obtaining the Ultrafine-Grained structure of metallic materials, which makes it possible to obtain a high-strength state, as well as unique functional properties of these materials without changing the chemical composition. The local processes of structure formation occurring in low-carbon steels near non-metallic inclusions during severe plastic deformation by the method of equal-channel angular pressing have been studied. Samples of steels 08Al, 08Cr18Ni10Ti, 09Mn2Si, having dimensions of ø20x80 mm, were subjected to plastic deformation by the ECAP method in four passes (one pass with a channel intersection angle of 90° and three passes with an angle of 120°), which corresponded to a true deformation of 3.2 [2, 3]. Structural analysis was performed using an Olympus PME 3 optical microscope, as well as JEM 100CX and JXA-50F electron microscopes; the nanohardness of the steel matrix was measured on a Nano Indenter II setup at a load of 10 mN.

It has been established that in the steel matrix, near inclusions and at the inclusion-matrix interfaces, the nature of the stressed and deformed states changes; the increment in deformation is determined by the angle of rotation of the inclusion as it moves in the plastic region. Various options for the spatial development of deformation are realized by changing the position of the shear planes, the nature of which depends on the degree of plasticity of the inclusion. Near the inclusions, zones of localized deformation are formed, containing difficult curved fragmented shear bands, hanging subboundaries, microtwins and

vortex formations due to rotational localization and the formation of discrete misorientations. The deformation mesobands near the inclusions are two-phase; in some zones of the mesobands, the so-called cold dynamic recrystallization develops. In the steels under study, structure formation during severe plastic deformation is associated with the formation of oriented structural elements that have dimensions of 100…260 nm and are separated by high-angle boundaries, which are characterized by the presence of dispersed curved mesobands of deformation, and in steel 08Cr18Ni10Ti also martensitic plates. With an increase in the number of passes, fragmentation of the mesobands of deformation occurred, which led to a significant fragmentation of the grains. Near the inclusions, the grain sizes are significantly smaller than far from them and are 75…100 nm. The nanohardness values of the steel matrix near the inclusions were 25…40 % higher than the similar values far from the inclusions. Near plastic inclusions of sulfides and silicates, the values of nanohardness are lower than near non-deformable oxides and titanium carbonitrides, which is associated with a certain deformation relaxation of stresses in the plastic inclusion-matrix system. In cases of localization of dynamic cold recrystallization near inclusions, the nanohardness of the steel matrix decreased by about 10 %.

The influence of non-metallic inclusions on the local refinement of the steel microstructure is an important effect during severe plastic deformation, which makes it possible to obtain additional nanostructural strengthening near the inclusions during the general refinement of grains to a submicrocrystalline state.

References

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.

UDC 669-413: 112.227.333

PROSPECTIVE WAYS OF INCREASE PROPERTIES THICK ROLLED SHEET

Kononenko G.A. [1], Dr.Sc., Kimstach T.V. [1,2], Ph.D.,
Podolskyi R.V.[1], Ph.D, Safronova O.A.[1]

[1] Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro
[2] Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

Rolled sheet metal is one of the main types of products of ferrous metallurgy, which is consumed in large volumes by all branches of industry. With the constant development of production, the requirements for the complex of mechanical properties and durability of rolled sheet are constantly increasing.

One of the promising directions for obtaining a high complex of strength and toughness of structural steels for the production of rolled products is the development of low-alloy steels with the structure of lower carbide-free bainite (NBKB), which is a combination of low-carbon bainite ferrite and high-carbon residual austenite [1, 2]. The conditions for the formation of NBKB, the structure of the α-phase, and the morphology of the residual austenite of carbide-free bainite depend on the carbon content, the degree of alloying of the steel, and the transformation temperature [3]. The structure of NBKB provides a unique combination of strength, viscosity and crack resistance [4, 5].

Recently, work has been actively conducted to study the formation of the NBKB structure in workpieces with a fairly large cross-section - up to 100 mm during continuous cooling [6]. It has been

established that the necessary conditions for the formation of the NBKB structure during continuous slow cooling of blanks and parts of a large cross-section are:

- high stability of supercooled austenite in the region of pearlitic and bainite transformation, while the stability in the bainite region should be lower than in the pearlitic region;
- the temperature at the beginning of the bainite transformation should not exceed 400°C to prevent the appearance of upper bainite;
- additional doping with silicon (aluminum), which contributes to the flow of bainite transformation according to the carbide-free scheme.

Thus, the problem of improving the chemical composition and obtaining a certain structural state of low-alloy steels, which are used for the production of high-strength sheet metal in order to improve its mechanical and service characteristics, is extremely relevant for modern metallurgy.

References

1. Bojarski 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. Incresing the fracture toughness of a maraging steel type alloy. *Metallurgical and Materials Trans actions*. 1976. Vol. 3, no. 7A. P. 465–468.
4. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels. London: The In- stitute of Materials, 2001. 460 p.
5. Garcia-Mateo C., Sourmail T., Caballero F.G., Smanio V., Kuntz M., Ziegler C. Nanostructured steel industrialisa- tion: plausible reality. *Mater. Sci. Techn*. 2014. Vol. 9, no. 30. P. 1071–1078
6. Goulas C., Mecozzi M.G., Sietsma J. Bainite formation in me- dium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. Metallurgical and Materials Transactions. 2016. No. 47A. P. 3077–3087.

UDC 669.15′.-74.-194-15.669.17

IMPROVING THE PROPERTIES OF STEEL BY HEAT TREATMENT WITH HEATING IN THE INTERCRITICAL TEMPERATURE INTERVAL (ITI)

D.V. Burova, Ph.D.

Priazov State Technical University, Dnipro

The work investigated the effect on the structure and mechanical properties of steels 20GL, 20GFL, 14G2 of various modes of heat treatment with heating in ITI, which are not usually used for them. It was found that the application of normalization with heating in the intercritical temperature interval compared to the usual normalization allows to obtain a more favorable level of properties. In all studied steels, an increase in both strength and plasticity properties is observed. Plasticity and impact toughness increase most significantly. In addition, carrying out normalization with heating in ITI allows not only to obtain a higher complex of mechanical properties, but also to reduce the costs of the production process. For steel 20GL, normalization with heating in ITI with preliminary and subsequent austenitization was additionally carried out. Short-term austenitization after aging in ITI eliminates the alignment of the austenite composition and ensures its fine grain. The role of preliminary austenitization before aging in ITI is explained by obtaining a fine-grained structure, which facilitates the redistribution of elements in ITI. This option is simpler than doing short-term austenitization after aging in ITI, because it can be done in one furnace. After carrying out these processing regimes, a high level of plasticity and impact toughness was obtained compared to that after normal normalization while maintaining the strength characteristics at the level required for this steel. Tempering with heating in ITI and low

tempering allow to obtain a level of strength properties close to the low tempering state (tempering with heating above Ac_3) with higher plasticity. At the same time, the heating temperature for quenching is much lower. The optimal exposure time in the ITI is 60 minutes. In addition, compared to the improvement, the strength properties after such heat treatment are higher, and the plasticity and impact toughness remain at the same level, and in some cases, even higher. The use of tempering with heating in ITI and high tempering led to an increase in the entire set of properties for steels compared 20GL, 20GFL and 14G2to the improvement.

The use of isothermal tempering with heating in ITI compared to the improvement allows to obtain higher strength in the studied steels, with satisfactory plasticity and impact toughness. The optimal holding time in the bainite transformation interval is 60 minutes. For steel 20GL, a heat treatment regime was carried out and showed a high level of properties, which consists in isothermal quenching with ITI exposure and preliminary austenitization. Strength and impact toughness significantly exceed these characteristics after improvement. The plastic characteristics also increase somewhat.

Thus, the application of tempering and normalization with heating in ITI, which were not previously used for the studied steels, made it possible to obtain a higher level of mechanical properties compared to the properties after typical treatments, but at the same time, the heating temperature is more than 100 ºC lower than is usually used. This allows energy carriers to be saved in production. In addition, the cooling medium during this type of heat treatment is air or water, which simplifies and increases the environmental friendliness of production. Taking into account the positive results of the conducted research, as well as the influence of the scale factor, it is planned to work out new modes of heat treatment with heating in ITI in production conditions, namely: normalization with heating in ITI, normalization with heating in ITI with preliminary austenitization, quenching with heating in ITI and high relaxation, isothermal quenching with holding in ITI, as well as isothermal quenching with holding in ITI with preliminary austenitization.

The work investigated the influence of heating in the intercritical temperature interval, quenching from it with subsequent low tempering on the abrasive wear resistance of steel 60S2A. This treatment was compared with that of this steel after isothermal tempering from a temperature of 860°C and holding for 10 minutes at 350°C, which provides the highest level of wear resistance. According to the data of X-ray phase analysis, ~30% of metastable austenite is present in the structure of the studied steel, which is almost completely transformed into deformation martensite under abrasive action. Approximately the same amount of austenite and wear resistance was obtained after tempering with ITI and low vacation. Such heat treatment is simpler and more environmentally friendly than isothermal hardening.

References

1. Malinov L.S. Development of economically alloyed high-strength steels and methods of hardening using the principle of regulation of transformed martensitic steels. Dissertation of Dr. technical Sciences: 05.16.01 - Yekaterinburg, 1992. - 381 p.
2. Yehorova S.V., Sterenbogen Yu.A., Yurchyshyn A.V. Possibilities and prospects of using intercritical normalization for hardening of low-alloy steels and welds
3. Petrunenkov A.A., Yarovoi V.V., Bukreev B.A. The structure of low-alloy steels with the PNP effect after heat treatment and deformation //Izv. universities Chern. metallurgy.- 1991.- P. 73-74.
4. Malinov L.S. Improving the properties of steels and high-strength cast iron by obtaining multiphase structures in them, including bainite and metastable austenite // Metal and Casting of Ukraine.-2004.- No. 7.- P. 24-28.

UDC 669.15-194:621.785:669.112.227.1

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT METHODS FOR DETERMINING RESIDUAL AUSTENITE AFTER HEAT TREATMENT OF ALLOY STEEL

S. V. Bobyr Dr. Sc., E. V. Parusov Dr. Sc., I. M. Chuiko, Ph. D., O. E. Baranovs'ka Ph. D., E. V. Oliinyk

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Steels containing a significant amount of deficient alloying elements (Cr, Ni, V, Mo) are used during the manufacture of metal products of responsible purpose (rolled rolls, hot forming dies, shafts, rotors, etc.). A certain amount of residual austenite (*RA*) remains in the structure of such steels after heat treatment, which subsequently affects the operational stability of finished metal products. Currently, there are various ways of determining *RA* in alloyed steels, but it should be understood that precisely the accuracy of the latter measurement allows you to reasonably approach the selection of the final parameters of heat treatment in order to increase the reliability of the operation of finished metal products.

The method of X-ray structural analysis in practice is the most accurate, which allows you to reliably determine the content of *RA*. However, with an insignificant *RA* content (≤ 5.0 %) in the steel structure, the relative error of its measurement can be ~ up to 50 %, which corresponds to the sensitivity limit of X-ray structural method, and the main drawback is the significant laboriousness of this method.

The magnetic method of determining the content of *RA*, which is based on measuring the difference between the forces of attraction of a permanent magnet to the test and reference samples, turns out to be unsuitable for determining *RA* in the structure of alloyed steels, since they contain non-magnetic carbides, which affects the accuracy of the measurement results.

An ultrasonic method for determining *RA* is also known, but it is limited and cannot be extended to alloy steels, due to the fact that it was developed exclusively for X12 type steels.

Taking into account the above, the authors of this work have developed a universal ultrasonic method for determining the content of *RA*: first, the speed of ultrasound in ferrite and austenite of reference samples of alloy steel is set, then the thickness of the sample is measured with an ultrasonic thickness gauge at the set speed of ultrasound, then the thickness of the controlled sample is measured with metric devices (caliper), and the amount of Azal is calculated according to the formula. In accordance with the developed method, determination of the content of *RA* was carried out on test samples of steels 38CrNi3MoV, 4Cr5MoV1Si, X37CrMoV5-1, 60Cr2SiV and 80Cr5MoV. In order to confirm the reliability of the obtained results, the content of *RA* was additionally determined by the X-ray diffraction method on the diffractometer «DRON-2.0» in copper radiation with a monochromator.

A comparative analysis of the results of measuring the amount of *RA* in experimental alloyed steels testified that the use of the proposed method provides sufficient accuracy for much less time-consuming than X-ray structural analysis, so it can be used as an express method of quality control of finished metal products. At the same time, the error in determining the content of residual austenite is minimal, since the developed method eliminates the effect of special carbides in the alloy steel structure.

Thus, the proposed method, unlike other analogues, makes it possible to significantly simplify the determination of the amount of *RA* in the structure of alloyed steels and significantly expand the scope of its application with the corresponding assurance of measurement ac curacy.

UDC 621.762.5

ON THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF CUBIC BORON NITRIDE POLYCRYSTALS OF THE cBN – Al SYSTEM, DEPENDING ON THEIR PHASE COMPOSITION

M. P. Bezhenar, Dr. Sci., Ya. M. Romanenko, Ph.D., A. M. Patsyk

V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Polycrystalline superhard materials (PCBN) on the basis of cubic boron nitride (cBN) are used in the tool working in rough, semi-finish and finish turning of products made of iron-carbon alloys with a hardness of up to 63 HRC, including those alloyed with chromium, manganese and nickel. Such materials are obtained by high-pressure sintering of cBN powders with various additives, most often with the addition of aluminum [1].

During the reactive sintering of cubic boron nitride powders with aluminum, chemical interaction occurs with the formation of aluminum nitride and borides [2], examples of such interaction are given below:

$$Al + \frac{2}{3} BN \rightarrow \frac{2}{3} AlN + \frac{1}{3} AlB_2 \quad (1)$$

$$Al + \frac{12}{13} BN \rightarrow \frac{12}{13} AlN + \frac{1}{13} \alpha AlB_{12} \quad (2)$$

$$Al + BN \rightarrow AlN(B) \quad (3)$$

The phase composition of the obtained composites will be respectively cBN, AlN, AlB_2 in the first case, cBN, AlN, AlB_{12} in the second and cBN, a solid solution of boron in AlN (Al(NB)). Each of the options has its advantages and disadvantages. Let's list them:

Composite1 of cBN, AlN, AlB_2 composition. **The advantages** are high hardness and crack resistance due to the formation of a strong sBN frame, the pressure and temperature of the production process are not higher than 4.5 GPa and 1450 ºC. **The peculiarity** is that such a phase composition is usually realized during the sintering of relatively large grains of BN (more than 10 μm), this is due to the kinetics of chemical interaction. The disadvantage is reduced heat resistance due to the decomposition of AlB_2 at temperatures above 1000 ºC according to the AlB_2 AlB_{12}+Al scheme.

Composite 2 of the composition cBN, AlN, AlB12. Advantages - very high hardness and heat resistance, acceptable crack resistance. **The disadvantage** is the high pressure and temperature of the production process, not lower than 6 GPa and 1800 °C.

Composite 3 composition cBN, Al(NB). Advantages - high heat resistance, crack resistance, increased damping characteristics, acceptable hardness, pressure and temperature of the production process not higher than 4.5 GPa and 1450 ºC. **The peculiarity** is that this phase composition is usually realized during the sintering of small grains with BN (less than 7 μm), this is due to the kinetics of chemical interaction. **The disadvantage** is that during the sintering of cBN powders with a grain size of less than 3 μm, the formation of hexagonal boron nitride is possible. The reasons are a decrease in pressure in the high-pressure apparatus due to a low initial density and subsequent increased shrinkage of the pressing, as well as impurities on the developed surface of cBN powders.

Controlling technological factors (pressure, temperature and duration of sintering, dispersity of the initial cBN powder) we obtain materials with the desired structure (phase composition) and properties. Composite 1 is best for rough turning of iron-based alloys, composite 3 for finishing.

References

1. Novikov N.V., Shulzhenko A.A., Bezhenar N.P., Bozhko S.A., Borymskyi A.I., Nagornyi P.A. Kyborite: preparation, structure, properties, application // Superhard materials. - 2001. No. 2. - P. 40 - 51.

2. Bezhenar N.P., Bozhko S.A., Belyavina N.N., Markiv V.Ya., Nagornyy P.A. Phase composition of polycrystals obtained during reaction sintering of cubic boron nitride with aluminum// Superhard materials. – 2002. – No. 1. - P.37-48.

UDC 669.15-194.57:620.18

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETECTING THE STRUCTURE OF FERRIT STAINLESS STEEL

T. V. Balakhanova, Ph. D., E. V. Parusov Dr. Sc., I. M. Chuiko, Ph. D., E. V. Oliinyk

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Today, the nuclear industry is an ideal option for an ecological source of energy based on the fission of uranium-235. At the same time, the main disadvantage of nuclear power generation is the formation of radioactive waste (spent nuclear fuel during electricity production). After removal from the reactor, these wastes are placed in special containers containing absorption and retention elements. Materials used to manufacture containers must meet certain requirements: stable structural and elemental condition, stable geometry of spent fuel storage assemblies, nuclear radiation safety of criticality. Stainless steel with a high boron content is still a well-known material used when working with spent fuel, which, in addition to absorption capabilities, has other properties that are mandatory for this type of product. The most common material for making containers in Ukraine is steel 04Cr14Ti3B1V, which belongs to stainless steels of the ferritic class and contains 1.1–3.0 % boron. Despite the fact that this steel was developed in the last century, questions related to the processes of structure formation, as well as the improvement of technological and operational properties, are still debatable. Since boron has a low ability to dissolve in both austenite and ferrite, this leads to the formation of various types of borides in the steel structure. In addition, ferrous phases embrittle steel. At the same time, the formation, morphology, and uniformity of the distribution of one or another type of borides in the volume of the finished metalwork determine not only the complex of mechanical properties and the stress state, but also determine the protective properties of the material and the degree of complexity of manufacturing the final products from them.

The conducted informational and analytical research in this direction testified to the limitations of the used metallographic methods of detecting the structure of stainless steels with a high boron content, which is due to the complex phase composition of boride inclusions. The purpose of the work was to determine a reliable methodology for studying the structure of highly alloyed steels of the ferritic class containing a significant amount of boron. On the basis of known methods and practical experience of the authors, a method of surface preparation of the studied samples made of 04Cr14Ti3B1V steel was developed, which simplifies the detection of the structure and microrelief on the surface of the cut, which allows you to reliably assess the quality of the material. The essence of the method consists in the use of two types of reagents with step-by-step immersion of the studied samples in the mordant. At the same time, there is a stable differentiation of boride phases and a clear definition of the border between the steel matrix and the boride phase. During sample preparation, the first reagent dissolves the matrix and some types of borides, and the second reagent allows you to color the borides of each type, which are present in the 04Cr14Ti3B1V steel, in a different shade. With the help of the proposed method of sample preparation, a structure was detected in the 04Cr14Ti3B1V steel, the reliability of which was additionally confirmed by the results of micro-X-ray structural and micro-X-ray spectral analyses.

UDC 629.764

DEVELOPMENT OF PROPOSALS REGARDING REQUIREMENTS FOR THE QUANTITY OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN RAILWAY WHEELS WHEN CREATING A NEW NATIONAL STANDARD

O.I. Babachenko, Dr.Sc., G.A. Kononenko, Dr.Sc., R.V. Podolskyi, Ph.D., O.A. Safronova

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Today, the main domestic consumer of railway wheels, JSC "Ukrzaliznytsia" is technically not ready to switch to the use of wheels in accordance with European regulations, but at the same time, the requirements of DSTU GOST 10791 are morally and technically outdated and do not correspond to the modern level of complexity of operating conditions and the significantly increased actual level of quality railway wheels Thus, it is necessary to develop a new national standard for railway wagon wheels, which corresponds to the current stage of development of equipment and technologies.

To develop proposals for the use of additional indicators of the quality of railway wheels (microstructure, chemical composition of the product, etc.) and to increase the level of existing requirements (contamination by non-metallic inclusions, the level of mechanical properties, etc.) in the new version of the state standard for railway wheels in comparison with the existing DSTU GOST 10791:2016 and in the international standard GOST 10791-2011 with Amendment 1, a statistical analysis of the actual level of quality indicators achieved during the production of railway wheels in the conditions of PJSC "INTERPIPE NTZ" was performed.

Non-metallic inclusions can significantly reduce the technological and mechanical properties of steels, contributing to the formation of various types of defects. One of the ways to increase the reliability and durability of heavy-duty steel products is to reduce contamination by non-metallic inclusions. Therefore, strengthening the requirements for limiting their content and increasing the number of controlled products will contribute to increasing the safety of railway traffic.

As a result of the statistical analysis of the distribution of the number of non-metallic inclusions during 2019-2021, it was established that the quality of the metal is significantly superior to the requirements of the current standard. A much smaller amount is observed for such types of non-metallic inclusions as: sulfides, row oxides, plastic silicates, brittle silicates, and point oxides.

Proposals have been developed regarding new stricter requirements regarding the maximum permissible level of pollution by non-metallic inclusions for wheels of category B: point oxides - 2.0 points instead of 2.5; plastic silicates - 1.5 points instead of 2.0; silicates that do not deform - 2.0 points instead of 2.5. In addition, it is proposed to evaluate the purity of steel using DSTU 8966:2019 "Steel. Metallographic methods for determining non-metallic inclusions", which was introduced to replace GOST 1778-70.

UDC 669.162.262:669.131.6.001.5

HEREDITY OF GRAY CAST IRONS

A. Yu. Borysenko Dr. Sc., G. V. Levchenko Dr. Sc.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

The results of analytical studies on the problem of heredity of gray cast irons are presented. It is shown that the concept of heredity of cast iron and other metal alloys usually means the connection between the properties of the original charge materials and the properties of the castings produced from them. The phenomenon of heredity in gray cast irons is a component of the general problem of heredity in metal alloys, and in a broader sense – metallurgical heredity.

The most important component of the structure of foundry (blast) cast iron is the characteristic of graphite. It is believed that the phenomenon of heredity in gray cast iron consists in the hereditary transmission to castings of the size, morphology, nature of the distribution of graphite inclusions, as well as the structure of the metal matrix (base) of the original cast irons. The negative heredity of cast irons is most strongly manifested in castings due to the coarse lamellar structure of graphite. Cast irons of the same brand, having the same or similar chemical composition, but from different manufacturing plants, have different structures and mechanical properties, which are preserved during subsequent remelting. At the same time, the nature of cast iron is more pronounced with a high carbon equivalent of secondary smelting iron. The difference in the properties of cast irons of the same chemical composition, but from different metallurgical plants, is explained by the presence of different amounts of impurities, non-metallic inclusions and the content of gases (O_2, N_2, CO) and iron oxides (FeO, Fe_3O_4).

The hereditary properties of cast irons are affected by blast furnace production factors: the volume of the blast furnace, temperature and blowing mode, the degree of ore recoverability, features of pouring cast iron in the foundry, etc. Cast iron produced in a particular blast furnace has its own characteristics in terms of sensitivity to shrinkage and porosity, tendency to graphitization and formation of the structure of the metal base. These features are transferred to the castings after remelting the cast iron.

The heredity of cast alloys, and gray cast iron in particular, is also determined by the dependence of their properties and crystallization kinetics on the structural state of the melt from which castings are made. One of the factors influencing the structural heredity in gray cast irons is the degree of dissolution of graphite inclusions in the melt, depending on their initial size, shape, and melt superheat temperature.

The phenomenon of inheritance of foundry alloys, including gray cast irons, is widely covered in literary sources. Despite this, there are few works aimed at establishing the causes of heredity, and the mechanism of its implementation still remains unclear. The above determines the urgency of conducting further research in this direction.

To control the formation of the structure of graphite and the metal matrix of gray cast irons, on which the properties of castings depend and to eliminate their negative heredity, it is necessary to know the mechanism of influence of the main chemical elements, micro impurities, the amount and composition of gases on the structure of the melt and liquid-solid phase transformations of gray cast irons depending on the conditions of their crystallization.

UDC 621.762.5

THERMODYNAMICS OF THE CHEMICAL INTERACTION OF CUBIC BORON NITRIDE WITH ALUMINUM AND REFRIGERANT TITANIUM COMPOUNDS

Y. M. Romanenko, Ph.D., A. M. Patsik, M. P. Bezhenar, Dr. Sci.

V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Polycrystalline superhard materials based on cubic boron nitride (PCBN) are obtained by high-pressure sintering of cBN powders with additives, among which refractory compounds of titanium and aluminum are most often used. The selection of the composition and quantitative ratios of additives is based on the fact that as a result of their physical and chemical interaction with boron nitride, solid ceramics are formed, which ensures high bond strength along the boundaries of cBN grains.

In [1], the change in Gibbs energy was calculated for toponymic reactions of the interaction of cubic boron nitride with transition metals of groups IVa-VIa, taking into account the effect of high pressure, and in [2] - the change in Gibbs energy during the interaction of cBN with aluminum at high pressures. In this work, similar calculations are performed for the interaction in the ternary system, namely: cBN – a refractory compound of titanium (TiN, TiC, TiB_2) – Al. The situation with aluminum needs an explanation. The sintering of PCBN composites was carried out in two stages: the first - preliminary impregnation of the compressed charge with aluminum at a pressure of 2 GPa and a temperature of 1300 K, the second stage - sintering at a pressure of 4.2 - 7.7 GPa and a temperature of

1750 - 2300 K. Under such conditions, aluminum is in the liquid state, and therefore entropy and molar volume for liquid aluminum were taken for thermodynamic calculations. When choosing possible reactions for consideration, those during which no gas phase is formed (for example, N_2) were selected, in addition, when choosing options for interaction reactions, data from X-ray structural analysis of sintered composites were taken into account.

The calculation of the Gibbs energy was performed in the approximation of $\Delta Cp = 0$. The dependence of the Gibbs energy on pressure $(dG/dp)T = V$ was established taking into account the volumetric effect of aluminum melting $\Delta V = 0.724$ cm^3*mol^{-1}. Phase compression was neglected, as its effect in such reactions is small. Thus, the effect of high pressure on the Gibbs energy for all the indicated reactions was determined only by the volume effect of aluminum melting and the volume effect of the reactions.

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

For the Gibbs energy, we obtain the expression:

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

It follows from the given data that, from the point of view of thermodynamics, chemical interaction must take place in the systems we have chosen, and since the entropy and volume components of reactions are negative, the probability of such an interaction increases with increasing temperature and pressure.

Conclusion. A thermodynamic analysis of the chemical interaction at high pressure of cubic boron nitride with refractory compounds of titanium and aluminum was performed. It is shown that such an interaction is possible in the range of temperatures up to 2300 K and pressures up to 7.7 GPa, the isobaric-isothermal potential ΔG (Gibbs energy) is negative for this range of pressures and temperatures. When the temperature increases, the absolute value of ΔG increases, when the pressure increases, the absolute value of ΔG increases, that is, the increase in pressure and temperature contribute to the chemical interaction in the considered systems.

References

1. Bozhko S.A., Bezhenary N.P. Thermodynamics of solid-phase interaction of cubic boron nitride with transition metals of IVa-VIa groups at high pressures // The influence of high pressures on the properties of superhard materials.-Kyiv: ISM AN of the Ukrainian SSR, 1985.- P.62-65.
2. Sintering of cubic boron nitride with aluminum/ A.A. Shulzhenko, S.A. Bozhko, N.P. Bezhenary and others// Superhard materials.-1986.-N5.- -P.14-17.

UDC 669.1

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF THE PRODUCTION OF REINFORCEMENT ROLLED ROD OF INCREASED STRENGTH IN COILS

G.I. Perchun, Ph.D., A.O. Ivchenko

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro

The availability of rebar (RR) in coils on the domestic market ensures the advantages of its use in the construction industry due to the introduction of industrial methods of manufacturing reinforced concrete structures and a reduction of steel costs by 5-7% during cutting. The most widely used in construction in Ukraine, as well as in European countries, is RR strength class 500 N/mm^2 (A500C according to DSTU 3760, Bst 500/550 according to DIN 488 - Germany, B500B according to BS 4449 - England).

The production of RR with a diameter of 6.0-18.0 mm in skeins in Ukraine is carried out at metallurgical enterprises, where products of strength class A240C, A400C and A500C are manufactured. At the same time, during the production of RR A500S due to thermomechanical strengthening, there is a large inhomogeneity of the yield index along the length of the rod (rolling) in the range of 350-550 N/mm^2, which indicates the presence of three strength classes in one skein of products at the same time. This does not correspond to the technical meeting the requirements of the RR standards. Therefore, in order to eliminate this shortcoming, high-quality RR class A500C is produced abroad using a combined technology, when using hot deformation, a rolled product with a yield level of 350-450 N/mm^2 is produced (thermal strengthening is not used), and with the help of cold deformation, this indicator is brought to 500 - 600 N/mm^2. That is, additional strengthening is carried out. Cold deformation technology is implemented on specialized equipment by stretching a workpiece with a ready-made periodic profile in the process of rewinding it from skein to skein (stretching technology).

The paper [1] considered the possibility of obtaining RR in skeins that meets the requirements of the national standard with an optimal ratio of strength and plasticity indicators by introducing stretching technology. For the implementation of such a technology, rolling of periodic profile of class A400C according to DSTU 9130 from steel grades St3Г, 18Г2С, 20Г2 and 25Г2С with a carbon content of 0.16...0.24% is used as a workpiece, with subsequent production of products of a higher strength class. Experiments in laboratory conditions have shown that when using a periodic profile with a diameter of 8.0 mm from low-alloy steel (wt.%: C – 0.24; Mn – 1.39; Si – 0.76), when it is deformed by additional by stretching (%, Ɛ) by 2.0 and 4.0% at ambient temperature, RR was obtained with a yield strength of 580 and 650 N/mm2, respectively. This indicates that by means of cold tensile deformation from RR of strength class A400 it is possible to obtain RR of higher strength class - A500C and A600C. Additional equipment (technological line) is required for the introduction of stretching technology and the organization of mass production of RR of increased strength in skeins. Such domestic lines do not exist, but there are foreign ones that have been in use for some time and have proven their efficiency and reliability.

References

1. 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.

UDC 669.017.15: 620.18

FORMATION OF THE CELLULAR STRUCTURE OF THE INTERPHASE SURFACE DURING STATIONARY α→γ RECRYSTALLIZATION OF FERTITIC IRON ALLOYS

K. O. Chornoivanenko, PhD, O.V. Movchan, PhD

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro

Studies of steady-state α→γ recrystallization during isothermal carburization of a ferritic iron alloy with a cellular structure of the interphase boundary have been carried out.

Diffusion transfer of carbon through the γ-phase to the interphase surface is the main factor that determines the kinetics of α→γ recrystallization during carburization.

The α→γ phase transformation was represented as a set of successive stationary states. The α→γ transformation process was considered in a two-dimensional approximation, assuming axial symmetry of the cell. An expression for the distribution of carbon in the γ-phase upstream of the flat PI during a steady-state process was derived.

The boundary concentration differences between curved and flat PI were determined by constructing a common tangent plane to the surfaces of thermodynamic potentials G^{α} and G^{γ} for flat and curved PI.

Diffusion processes in the α phase before PI have been described. The average boundary concentration of the α-stabilizer in the α-phase is higher than in the growing γ-phase. An expression connecting diffusion processes in the α-phase before PI with the speed of front advancement was obtained.

Longitudinal sections of cells corresponding to limiting cases of surface tension coefficient σ and microstructures during α→γ recrystallization are presented. The disturbance amplitude φ(x) was approximated by a piecewise continuous function consisting of fragments of second-order curves and straight lines when performing these calculations.

A detailed study of the microstructures of the transformation front shows that PI cells have a pronounced crystalline facet during solid-phase recrystallization. Two or more columnar crystals of the γ-phase can grow from one grain of the α-phase. The growth of the boundary plane occurs at the maximum speed if {111}γ and {110}α are mutually oriented according to one of the variants of the Kurdyumov–Sachs orientation relationship.

The resulting model can be used as a base model for studying the growth of a natural austenite-carbide composite.

Progressive Metal Processing Technologies

UDC 621.771.22.04

CHOICE OF THE METHOD OF DETERMINING THE ENERGY-FORCE PARAMETERS OF THE PROCESS OF DRAWN OF THE STACK THROUGH A BENDING-TENSIONING DEVICE

K.Yu. Kluychnikov, I.Yu. Prykhodko, Dr. Sci., V.G. Razdobreev, PhD, D.G. Palamar, A.I. Leshchenko

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

In the practice of manufacturing metal products, shaped profiles of a complex configuration, including thin-walled, strip and periodic cross-section profiles, play a special role. High-quality, high-precision shaped profiles with different ratio of the width to the height of the tape, which are produced in small-tonnage batches abroad and are widely used in machine-building, instrument-building, aircraft-building and other industries. In Ukraine, the production of high-precision shaped profiles is extremely limited, and the production of strip-type profiles is completely absent. Tape-type shaped profiles are usually produced by cold deformation on drawing, flattening or sheet-rolling mills. The use of drawing in roller drawing in comparison with cold rolling and flattening has higher technological flexibility, does not require large capital costs for the organization of production. Compared to traditional drawing with the use of monolithic drags, the drawing process in roller drags has the following advantages: lower energy consumption; higher permissible deformation per pass; higher homogeneity of product properties, expensive drawing lubricants are not used, additional special metal preparation operations for drawing are not carried out (phosphating, oxalate, copper plating, brown coating, etc.). The main drawback of the roller drag method is the presence of traction force. Tensions that stretch the profile in combination with a decrease in plasticity of the metal during the drawing process can lead to the destruction of the rolled product. In order to eliminate the harmful effects of residual tensile stresses, it is necessary to either eliminate them or convert them into compressive stresses that increase the workability of the steel billet. For this purpose, two methods are used in the practice of wire production: thermal and mechanical. The thermal method used in industry requires significant energy consumption. The mechanical method has several varieties, of which the most rational is the process of sign-changing deformation with wire stretching in a bending-stretching device.

The process of cold deformation with the use of a bending-stretching device is carried out with a counter-tension, the value of which is equal to the effort of drawing the workpiece through this device. The counter-tension determines the force of cold deformation and the power of the drive motor of the traction device, the value of the maximum possible deformation during the first pass, the stability of the cold deformation process and other parameters. When working with a large back tension, frequent breaks in the rolling stock are possible. Therefore, it is very important to correctly calculate the force of cold deformation using bending and stretching roller devices.

The purpose of the work: on the basis of the performed analysis, to choose a technique for determining the energy parameters of the process of drawing the staffs through the bending and stretching device.

As a result of the analysis, the method of calculating the force parameters of the process and the change in shape of the wire rod in the bending-stretching roller device with comprehensive consideration of the mutual dependence of the degree of deformation, the tensile strength of the metal, and the changes in mechanical properties during the deformation process was determined. The headquarters in the roller bending-tension device adopted the methodology that was developed earlier in the ISI of the National Academy of Sciences of Ukraine. The chosen methods serve in the future for the development of a mathematical model for calculating energy parameters and shape change parameters of the process of stretching the staffs through the bending-stretching device, which will allow for a reasonable choice of the parameters of the sign-changing bending of the staffs.

UDC 669.1

PRODUCTION OF REINFORCING ROLLED PRODUCTS FROM LOWALLOY MODIFIED NITROGEN STEELS

A.V. Ivchenko[1], PhD, V.Y. Pererva[2], PhD, O.V. Zuev[1]

[1] Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro;
[2] Dnipro University of Technology, Dnipro

The actual task in the production of rolled steel from low-alloyed steel grades is to increase the strength without increasing the cost of production. Implementation of methods of modification and micro-alloying allows to increase characteristics of steel products [1, 2] both to strength and operation. New technologies for modifying steel by isolating nanodispersed excess phases under various conditions significantly increase the strength and plastic properties of rolled steel, including reinforcement.

The possibilities of obtaining reinforcing rolled products that meet the requirements of international standards with an optimal ratio of strength and ductility by implementing the technology of carbonitride strengthening of low-alloy structural steels [3, 4] are considered.

The increase in the consumption of reinforcement with the corresponding strength and plasticity indicators leads to high requirements for its manufacture, which is achieved by the technology of carbonitride strengthening of steels containing vanadium and less often niobium. The production of reinforcing rolled products of strength class 500-600 MPa from low-alloy steels modified with nitrogen [5] significantly increases the consumer properties of the finished product, such as endurance, cold resistance, seismic resistance, fire resistance and fire safety. The use of such rolled products in construction in regions with increased seismic activity and large differences in ambient temperatures will have a beneficial effect on the reliability of reinforced concrete structures and structures.

References

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., Ивченко 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., Нурумгаліев А.Х., Зуєв О.В., Бубликов Ю.О., Андрюшкін А.В., Перчун Г.І., Єржанов А.С., Жуніскаліев Т.Т., Куатбай Е.К.

UDC 669.15-194:621.771.06:620.18

EXISTING AND PROMISING METHODS FOR COOLING STEELS FOR WELDING PURPOSES IN A ROLLING LINE

E. V. Oliinyk, E. V. Parusov, Dr. Sc.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

To produce cold-deformed welding wire from alloy steels using modern technology, it is necessary to have high-quality raw materials – wire rod, which must have an improved combination of strength and ductility properties. The microstructure of alloy steel wire rod determines its ability to cold plastic deformation, and the ratio of structural components, their quantity and uniformity of distribution have a significant impact on the process of stable, break-free drawing. Modern technology for producing welding wire using an energy-saving principle, the so-called “direct” drawing, assumes the absence of additional heat treatments during cold plastic deformation of rolled products in metal production conversion. Reducing the strength and increasing the ductility of welding wire rod is ensured by selective requirements for the chemical composition of steel within grade intervals, additional binding of free nitrogen, as well as the use of special modes of softening treatment with an adjustable rate of post-deformation cooling on a roller conveyor.

The theoretical foundations of deformation-heat treatment of wire rod are based on the laws of the kinetics of austenite decomposition and, accordingly, the peculiarities of the course of phase-structural transformations occurring under the influence of hot plastic deformation in alloy steels. When determining the parameters of deformation-heat treatment of wire rod, one should take into account the chemical composition of the steel, the completion temperature of hot rolling, the duration of the post-deformation pause, as well as the temperature-time cooling conditions.

In metallurgical practice, when producing wire rod, «short» and «long» Stelmor lines are used. Cooling of structural and high-carbon steels is carried out on the «short» Stelmor line (conveyor length ~ 70–90 m), and alloy steels for welding purposes are cooled on the «long» Stelmor line (conveyor length ~ 110–150 m). Increasing the length of the conveyor allows you to create different conditions for cooling wire rod over a wide temperature-time range and combine continuous and quasi-isothermal cooling. The main advantage of the «long» Stelmor line is the possibility of cooling the metal under the heat-insulating covers of the conveyor under conditions close to isothermal, which allows achieving the most effective combination of structure and mechanical properties of alloy steels wire rod. Slow cooling of alloy steels under the heat-insulating covers of the conveyor promotes the formation of ferrite-pearlite structures with a minimum amount of bainite-martensite areas, which ensures an increase in its technological plasticity during drawing without the use of additional annealing.

An alternative reserve for ensuring slow cooling of wire rod may be additional sealing of conveyor sections under heat-insulating covers, installation of special circulation fans, as well as thermal imagers. It is obvious that the temperature and speed regulation of the cooling of rolled steel plays a significant role in the formation of its quality, and the general manufacturing process consists of technological operations, each of which makes its own contribution to the formation of the final set of properties. It should be noted that currently the most rational cooling modes in the production of alloy steels wire rod are not fully used, which allows us to offer national metallurgical plants effective technological measures aimed at improving the production process with relatively minimal material costs.

UDC 629.764

METHOD FOR STUDYING THE DEPTH OF PENETRATION OF THE CUMULATIVE JET OF THE PYROTECHNIC DEVICE OF THE LAUNCHER ROCKET SEPARATION SYSTEM

Yevhen Boliubash

State Enterprise "Yuzhnoye State Design Office", Dnipro

Pyrotechnic devices play an important role in many rocket and space technology systems, where instantaneous operations are required, in particular, the separation of launch vehicle stages. One of the most effective types of pyrotechnic devices for performing such operations are linear shaped charges (LSC).

The depth of penetration of the cumulative jet (CJ) is one of the main characteristics that determine the efficiency and reliability of the pyrotechnic devices of the separation system. If the penetration depth of the CS is insufficient, then the pyrotechnic device will not be able to effectively destroy the connections between stages or structural elements in rocket and space technology.

The purpose of this work is to develop a methodology for studying the penetration depth of CJ LSC used in launch vehicle separation systems.

The research methodology consists of the following stages: preparation of interference samples; preparation of LSC; establishing LSC on an obstacle; penetration depth measurement; data analysis.

The developed technique makes it possible to study the depth of penetration of CJ LSC with high accuracy and reliability. The research results obtained using this technique make it possible to confirm the performance, efficiency and reliability of pyrotechnic devices at the LSC.

UDC 629.764

DEVELOPMENT OF MEANS OF PRODUCTION OF TECHNOLOGICAL LUBRICANTS FOR PROCESSING METALS BY PRESSURE

S.B. Karhin, Ph.D., S.A. Syhomlin

SHEI “Pryazovsky State Technical University”, Dnipro- Mariupol

Most technological lubricants for pressure metal processing (OMT) contain graphite. Such lubricants include: OGV-75, GFP, Ukrinol-7, Delta-31, Sumidera, etc. In these lubricants, the graphite fraction has a size of 2-5 microns. Layer mills are widely used at the enterprise for the production of lubricants with these sizes of graphite. The process is time-consuming and energy-intensive. We developed and implemented at the Mariupol Graphite Plant a means of producing fine graphite using a hydraulic dispersant. At the same time, with the help of cavitation jets, large parts of graphite are quickly crushed into size fractions 2 — 5 μm. The obtained samples were verified on an electric microscope. It was established that it is possible to obtain 60% of fine graphite with a fraction of 2 — 5 μm. At the same time, layer mills would require 10 times more time and 5 times more labor. Technological lubricants OGV-75, GFP, Ukrinol-7 were produced using the developed tool, which were tested in forging and stamping shops (Azovmash, Tokmak; YuZhMASh, Dnipro) and showed good results. We consider that the developed tool is promising, environmentally friendly and can be implemented at enterprises that manufacture technological lubricants.

UDC 330:005.35(047.31)

IMPROVEMENT OF THE ROLLING ROLL FORGING PROCESS

S.B. Karhin Ph.D., I.A. Malii

SHEI "Pryazovsky State Technical University", Dnipro- Mariupol

When forging rolling rolls using traditional technology, ingot sedimentation operation is widely used to ensure the required forging. We have proposed a form of strikers, in the forging of which there is no need for the time-consuming operation of depositing the ingot. The forging shop used three-beam forgings on a hydraulic press to forge a rolling roll weighing 25 tons, which made it possible to obtain a three-beam ingot. The deposition operation was not applied. Further forging of this three-beam ingot was carried out using traditional technology. At the same time, the technical parameters of the roll rolling met all the requirements of the standard (DSTU), and the process itself was 30% faster. Theoretical studies carried out using the slip line method showed that forging with these punches allows good rolling of the ingot over the entire cross-section. We think that the developed and implemented design of the new three-beam form of forging hammers can be widely used in the forging of various forgings, including rolling rolls.

Modeling and optimization of technological processes

UDC 004.02:519.63:669.717

RESEARCH OF CALCULATION METHODS FOR MODELING THE PROCESS OF MELTING MATERIALS

M.V. Babenko Ph.D., H.O. Tonkoshkur

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The mathematical modeling of multiphase media is rooted in the fundamental postulates and principles of continuous media mechanics. However, it is important to note that the equations governing these processes in multiphase media are predominantly intricate and nonlinear partial differential equations, often possessing analytical solutions only in a limited number of cases, typically lacking practical significance.

To extract quantitative insights into the progression of such processes, numerical methods executed via computational devices have become indispensable. This has given rise to the emergence of novel scientific disciplines, including computational physics, computational fluid dynamics, and computational thermal physics.

Automated systems of scientific research are systems in which, in order to increase the efficiency of scientific research, a number of procedures for obtaining, analyzing, transmitting and accumulating information related to the use of mathematical modeling methods in the course of research are formalized and performed automatically.

Within the Department of Systems Software at Dnipro State Technical University, a significant endeavor has been undertaken in the form of developing an automated research system titled "Melting of Materials". This initiative has yielded specialized software tailored to deliver comprehensive and highly precise data regarding the dynamics of heat and mass transfer processes during material melting. These modeling outcomes enable the formulation of recommendations for optimizing the corresponding technological processes.

UDC 004.94

STUDY OF SPEED AND MEMORY CONSUMPTION FOR THE STAR INTERACTION ALGORITHM ON GRAPHICS ACCELERATORS

K.S. Krasnikov, Ph.D., S.V. Deineka, N.M. Lymar

Dniprovskyi state technical university, Kamianske

It is presented a detailed investigation into the performance aspects of the N-body interaction algorithm when implemented on graphics accelerators. The N-body algorithm plays a crucial role in various scientific simulations, ranging from astrophysics to molecular dynamics. With the increasing reliance on graphics accelerators for scientific computations, understanding the algorithm's behavior in this context is of paramount importance.

The study focuses on two key performance metrics: speed and memory consumption. Through a series of carefully designed experiments, we systematically analyze the algorithm's execution time and memory usage across different configurations of graphics accelerators. The study encompasses a diverse set of scenarios, including varying particle densities and interaction strengths, to provide a comprehensive understanding of the algorithm's behavior under different conditions.

Additionally, we explore the impact of optimization techniques on both speed and memory consumption, aiming to identify strategies that enhance the algorithm's efficiency on graphics accelerators. Our findings not only contribute valuable insights into the performance characteristics of the N-body

interaction algorithm but also offer practical guidance for researchers and practitioners seeking to leverage graphics accelerators for large-scale simulations.
Overall, this research sheds light on the intricate interplay between the N-body algorithm and graphics accelerators, paving the way for improved computational efficiency in a wide range of scientific applications.

UDC 621.771.06:681.518.54:531.3

STEAD TORQUE CORELATION FIELDS IN ROLLING CLUTES

V.V. Verenyov, Dr.Sc., V.V. Korennoy

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

On the basis of numerical pre-production vibrations [1,2] on wide-strip mills, an empirical statistical determination of the maximum dynamic torque Mm when gripping metal with rolls is established at the moment Mc in the old rolling mode. The greater the Ms, the greater the MD. This location has the appearance of a thin correlation field of points Md, Ms, which is approximated by the linear location Md (Ms). The width of the field is determined by the change in static moment when rolling strips of different sizes. On rolling mills, only the electromagnetic moment of the motor and the static moment during the rolling of the leather strip are constantly vibrating. The importance of MD and MS allows you to complete a number of important tasks.

1. Predict the maximum dynamic moment during the mastering of rolling of strips of a new grade size, embossing movement, and changed rolling temperature.

2. Simultaneously changing the moment in 2-3 separate stands of the rolling mill from the daily correlative fields MD, MS by their analysis allows you to follow the passage of drilling through the stands and more accurately and more accurately evaluate them There is a rolling process and a rolling mill.

3. Vary the data of the empirical division of static and dynamic moment in the development of resource ownership.

4. By specifying in a mathematical model the actual values of the moment MC with the regulation of the influx of technological developments and gaps in the way of statistical modeling, the maximum dynamic moments are determined and the tasks are clearly identified. 1 and 2 without carrying out trivial natural experiments.

5. Determine the characteristics of the division of moments Мд and Mc – the average value, the mean square variation and the coefficient of variation according to the method of determining the stability of the technological process and the state of ownership.

6. The way to link grade sizes to correlative fields is to determine the one with which dynamic pressures reach the greatest value and remain stable when correcting rolling modes.

7. By increasing the information content and reliability of assessing the stability of the technology, we will be able to fully obtain before analyzing the additional fields for the spindle section, as well as the field of static tension - metal temperature lu and dynamic navantazhennya – rolling temperature. For this purpose, the required temperature is measured on one of the spindles and the temperature of the metal at the inlet in the monitored cage.

8. The results of pre-trace simulations and statistical modeling show that the formation of correlative fields MD, MS becomes a characteristic feature for broadband and other mills with the expression of the transition process and steel rolling mode.

The formation of a more significant position allows for constant monitoring of the maximum dynamic moment across all cages without interruption and, if necessary, adjusting the rolling parameters in the direction of changing the impact forces.

References

1. Веренев В. В. Динамические процессы в широкополосных станах горячей прокатки. – Д.: Літограф, 2018. – 158 с.

2. Веренев В. В., Подобедов Н. И. Статистическое моделирование динамических нагрузок в широкополосных станах. – Днепр: ЛИРА. – 2021. – 74 с.

UDC 621.7:681.5

OPTIMIZATION OF WRITING CODES FOR MACHINING PARTS ON CNC MACHINES BY THEIR AUTOMATIC GENERATION

Sokolan K.S., Larionov I.V.

Khmelnytsky National University, Khmelnytsky

The process of automatic generation of part processing codes on Roland MDX 40A [1] and HAAS VM3 [2] machines was studied. In order to optimize the writing of machining codes, a framework was created in the SRP software.

The first step in automated part code writing is to create a parametric model in Catia V5. After analyzing the code in Catia V5, a set of parameters will be created. Such a set is created for the variables present in the code, which include the depth of cut, position coordinates along the X and Y axes, etc. At this stage, the parameter sets are linked using formulas, resulting in the geometry-code relationship. If an automated method of generating NC codes is used, they are generated automatically. Thus, after analyzing the code for any of the product and/or part dimensions, the operator has the opportunity to generate new codes in case of a change in the model dimension. You can change the model dimension by changing its main parameters.

The code is generated automatically in text format, after which it can be changed to the ".NC" file format for further running on the CNC machine. This approach will also be used for the HAAS VM 3 CNC machine. Using this code leads to a simulation on the display panel of the CNC machine and checks the accuracy of the written code.

The main disadvantage of generating codes manually using CATIA V5 is that if any model parameters or dimensions are changed, the code creation process must be completely carried out from the first to the last stage, i.e., the choice of surfaces and planes, the machining process, etc. Another disadvantage of generating codes from CATIA V5 is that these codes are quite long and contain from 300 to 2500 lines.

The research was conducted for several typical parts, namely: a body with a hole in the center, a hollow cylinder, a body with three holes of different radii, a body with three holes of the same radius, and a pyramid. As a result, the manual method of generating part processing codes was compared with the automated method.

For the housing with a hole, the manual method of machining code generated in CATIA V5 contained 388 lines of code, and the automated method contained 32 lines of code. Machining the hollow cylinder resulted in a reduction of code lines from 267 to 50. A case with holes of different radii - 432 lines of code using the manual method and 53 lines using the automated method. A case with holes of the same radius - 418 lines and 45 lines, respectively. Pyramid - 1206 lines and 142 lines, respectively.

After analyzing the generation of codes for parts by manual and automated methods, it can be noted that this method is more optimal for machining parts, since the code for machining a part by the automated method is reduced several times compared to the code generated in Catia V5 software. In addition, the use of this method has a greater level of flexibility in part processing programs, since when model parameters are changed in the program in which the part geometry was created, the automatically generated part code will change without the intervention of the CNC operator.

References

1. Milling and engraving machine MDX-40A. [Access mode: https://rdm24.ua/products/frezernye-stanki/mdx-40a/.
2. VM3. [Electronic resource]. - Access mode: https://www.haascnc.com/ps/machines/vertical-mills/mold-machines/models/vm-3.html

3. Mirantsov S.L. Systems of computer-aided design of CNC machine tools: a textbook / S.L. Mirantsov, V.I. Tulupov, S.G. Onyshchuk, Y.B. Borisenko, E.V. Mishura, O.S. Kovalevska - Kramatorsk: DGMA, 2011. 152 p.

UDC 669.18

SOFTWARE FOR STUDYING THE HYDRODYNAMICS OF THE MELT IN A TUNDISH

K.S. Krasnikov, Ph.D., A.O. Krykhta

Dniprovskyi state technical university, Kamianske

This research uses a novel software platform designed for the in-depth study of melt hydrodynamics within tundish systems, a crucial component in metallurgical processes. The interactive website provides a user-friendly interface for researchers and practitioners to visualize, and analyze the intricate flow patterns of molten metal during casting operations.

Through the integration of user-defined parameters and customizable scenarios, the website allows users to explore various operational conditions and assess their impact on the melt flow dynamics.
Key features of the web application include simulation outputs, 3D visualizations, and comprehensive data analytics tools. Researchers can gain valuable insights into the thermal and fluidic characteristics of the melt, facilitating the optimization of tundish design for enhanced casting performance. Additionally, the platform fosters collaboration and knowledge-sharing within the metallurgical community by enabling the exchange of simulation models and results.

This paper highlights the significance of the web-based tool in advancing the understanding of melt hydrodynamics, ultimately contributing to the improvement of casting processes in metallurgical industries. The accessibility and versatility of the platform make it a valuable resource for both academia and industrial applications, promoting innovation and efficiency in the field of metallurgy.

UDC 004.94

TECHNOLOGIES OF SOFTWARE DEVELOPMENT FOR HYDRODYNAMICS RESEARCH IN AN AERATION TANK

K.S. Krasnikov, Ph.D., S.V. Dudnyk

Dniprovskyi state technical university, Kamianske

The paper explores advanced technologies in software development tailored for the investigation of hydrodynamics within an aeration tank, a critical component of municipal wastewater treatment facilities. The study focuses on the integration of computational tools to model and analyze the complex fluid dynamics within the tank, aiming to enhance our understanding of the aeration process and optimize its efficiency.

The proposed software leverages state-of-the-art programming languages, such as C#, and utilizes powerful libraries like ASP.NET for presenting hydrodynamic simulations. The graphical user interface, developed using ASP.NET MVC, facilitates user interaction, allowing researchers to input parameters and visualize simulation results with ease.
The significance of this research lies in its potential to revolutionize the field of wastewater treatment by providing a comprehensive, virtual platform for hydrodynamics research. By employing machine learning algorithms, the software aims to intelligently analyze data, identify patterns, and contribute to the development of optimized aeration strategies.

It is concluded the paper's relevance in addressing current challenges in wastewater treatment, emphasizing the potential environmental impact reduction, efficient resource management, and the creation of a digital framework for collaborative research in hydrodynamics.

Environmental problems of ferrous metallurgy

UDC 669.712.04

IMPLEMENTATION OF THE BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES IN THERMAL FURNACES IN THE CASE OF FOSSIL FUEL SHORTAGES

O.O. Yeromin, Dr.Sc., O.V. Gupalo Ph.D.

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro

In a time of fossil fuel shortage in Ukraine, especially natural gas, the issues of implementing the best available technologies in metallurgy and reconstruction of metallurgical thermal units are becoming relevant [1]. Reducing fossil fuel consumption decreases greenhouse gas emissions and is an important aspect of Ukraine's integration into the European community. The implementation of "Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)" is Ukraine's steps into the future and a way to economic and energy independence of the country.

An important area of greening technologies is the use of renewable energy sources to generate heat for technological processes. Renewable hydrogen and renewable electricity are most often considered promising sources of “green” energy. The conversion of thermal units to hydrogen heating requires the reconstruction of heating systems and process control systems of the units but almost always ensures the required process parameters [1]. The use of electric energy requires either a complete replacement of the heat treatment technology or a significant reconstruction of the existing equipment with the study of issues related to ensuring the necessary quality and performance of heat treatment.

The authors researched the thermal performance of a continuous furnace for pipe heat treatment when the furnace is heated with natural gas. They also developed technical solutions for replacing natural gas with renewable hydrogen or converting the gas furnace to electric one. During the study, authors developed mathematical models of gas and electric furnaces for pipe thermal treatment. They adapted the mathematical model of the gas furnace on the base of experimental results of metal heating when natural gas is used as fuel.

To evaluate the possibility of converting the gas furnace to electric heating without changing the overall dimensions of its chamber, furnace temperature regimes for reference pipe bundles were developed, and the technical and economic indicators of the furnace operation were determined. Based on the results of the calculations, recommendations for the selection of design and operating parameters of the electric furnace were formulated. Namely, the number and length of temperature control zones were changed, and their thermal capacity was determined; the type and size of eclectic heaters were selected, as well as their location in the furnace chamber.

A comparative analysis of the technical and economic performance of gas and electric furnaces led to the following conclusions. The use of hydrogen as a fuel makes it possible to fully implement the required regimes of heat treatment regime and guarantee a required furnace capacity. Without taking into account the investments for reconstruction, the replacement of natural gas with hydrogen is economically feasible at a ratio of natural gas and hydrogen prices not more than 2.9. The conversion of the furnace to electric heating can be achieved if the furnace capacity is reduced by 20 % for certain steels and dimensions of the pipe bundles. The replacement of natural gas with renewable sources of energy like electricity or hydrogen makes it possible to reduce carbon dioxide emissions by 765 kg/t of metal.

References

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

UDC 669.162.23:632.151

STUDY OF NITROGEN OXIDES EMISSION DURING AIR HEATING IN HOT-BLAST STOVES

L.P. Gres[1], Dr.Sc., O.V. Gupalo[1], Ph.D., O.O. Yeromin[1], Dr.Sc., L.B. Kabakova[2], Ph.D.

1- Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro
2 -M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Blast-furnace gas is used for air heating in hot-blast stoves. The combustion heat of blast-furnace gas does not ensure the achievement of the required temperature under the dome of the hot-blast stoves 1300-1350 °C, and therefore blast-furnace gas is usually enriched with natural gas. Another way to achieve the required temperature under the dome is to heat hot-blast stoves with blast furnace gas using oxygen-enriched air for fuel combustion. In this case, process oxygen enriches the air.

The paper considers both methods of increasing the temperature under the dome of hot-blast stoves and studies the impact of these methods on the nitrogen oxides (NOx) gross emission which is generated during fuel combustion. The research was performed for the operation of hot-blast stoves, which are ancillary equipment of the blast furnace with a volume of 1513 m^3. The initial conditions were the following:

- the temperatures under the dome: 1300 and 1350 °C;
- blast furnace gas composition (volume percentage): CO_2=15.95%; CO=22.55%; H_2=3.37%; N_2=44.39%; N_2O=13.74%;
- the calorific value of blast furnace gas and natural gas, respectively: 3.228 and 36.275 kJ/m^3;
- blast furnace gas consumption per one hot-blast stove: 25.000 m^3/h;
- the consumption of blast-furnace air was the same for both considered methods of increasing the temperature under the dome.

It was determined that to obtain the required temperatures under the dome in the hot-blast stoves (1300 and 1350 °C) when they are heated with a mixture of blast-furnace and natural gases, the calorific values of the mixture have to be respectively 4.550 and 5.013 kJ/m^3 and the natural gas contents have to be respectively 4.0 and 5.4 %. If the hot-blast stoves are heated with blast furnace gas and the combustion air is enriched with process oxygen, the required temperatures under the dome can be achieved when the oxygen content in the air is respectively 23.4 and 32.3 %.

For the considered fuel combustion conditions, the concentrations of nitrogen oxides (NOx) were calculated using the equations published in [1]. The results show that the concentrations of nitrogen oxides (NOx) are 44.5 mg/m^3 when the temperature under the dome is 1300 °C and 79.0 mg/m^3 when the temperature under the dome is 1350 °C. The NOx concentration does not depend on the method of increasing the temperature under the dome of hot-blast stoves because the fuel combustion conditions do not change.

Numerical modelling of heat transfer in the checker chamber was performed according to the methodology given in [2] and made it possible to calculate the consumptions of fuel, process oxygen and flue gases per hot-blast stove as well as gross NOx emission. It was determined that in order to obtain the same heat exchange conditions in the checker chamber of the hot-blast stove, it is necessary to ensure the same flue gas flow rate through the checker regardless of the methods of increasing the temperature under the dome. The gross NOx emissions practically do not depend on methods of increasing the temperature under the dome, and they are 50.75 t/year when that temperature is 1300 °C and 94.67 t/year when it reaches 1350 °C. Thus, both methods have the same environmental impact.

References

1. Kun P. Issledovanie goriachei pechnoi atmosfery v promyshlennykh pechakh i topkakh / P. Kun, D. Zuker// Ferrous metals [Chernye metally]. – 1988. – No. 5. – P. 26-31.

2. Gres L.P. Increasing the energy efficiency of blast heating [Povyshenie energoeffektivnosti nagreva domennogo dutia] / Pod. red. L.P. Gres . – Dnipro : NMetAU, 2001. – 612 p.

UDC 621.039.736:621.445

MELTING OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED METAL AS A COMPONENT IN SOLVING ENVIRONMENTAL PROBLEMS AT METALLURGICAL ENTERPRISES

V.E. Mashinistov Ph.D., Y.V. Romanko Ph.D., A.G. Meshkova, M.V. Suhareva

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

Metallurgical enterprises may receive scrap metal contaminated with radionuclides of both natural and artificial origin. This may cause a real threat of exposure to elevated levels of radiation to the company's personnel and the population in the adjacent areas.

As it is shown in [1,2], one of the most effective ways to prevent unreasonable deterioration of the environmental situation at an enterprise is to melt metal in a furnace which operates in the normal mode, and the incoming raw materials are not decontaminated beforehand.

During the melting process, radionuclides are mixed and distributed evenly in the melt volume. This distribution remains the same for products made from this metal.

Implementation of the proposed approach makes it possible to remove radioactive contaminants from the sphere of their direct contact with humans and, accordingly, to prevent and eliminate the possibility of unreasonable exposure and environmental contamination.

References

1. Balakin V.F., Mashinistov V.E., Koveria A.S. Perspective technology of recycling of radioactively contaminated metal based on its melting // Nuclear and Radiation Safety. - 2018. - №2(7,8), - C.43-48.
2. Balakin V.F., Mashinistov V.E., Koveria A.S., Lukin E.V. Industrial technology for the utilization of tubing contaminated with natural radionuclides based on their melting.// Oil and Gas Industry of Ukraine - 2019. - №4. C.33-37.