Школяренко В.П., Середенко О.В.
(ФТІМС НАН України, Київ)

РАЦІОНАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ ПЛАВКИ СПЛАВУ «МІДЬ-ЗАЛІЗО»

E-mail: hvp@ukr.net

Відомо, що від вибору технологічних режимів плавки будуть залежати технологічні та експлуатаційні характеристики отриманих виливків. Тому дана робота присвячена обґрунтуванню раціональних технологічних режимів плавки сплаву «мідь-залізо».

Загальновідомо, що обґрунтування раціональних технологічних режимів плавок було і залишається актуальним науковим завданням у ливарному виробництві. Дана робота присвячена обґрунтуванню раціонального технологічного режиму плавки сплаву «мідь-залізо» з використанням механічного, магнітного, електромагнітного перемішування розплаву, температурних, швидкісних та часових режимів валкового лиття-прокатки.

У якості матеріалу використано Cu високої чистоти (99,99 %) і армко залізо. Методи дослідження включали: оптичну мікроскопію та статистичний аналіз отриманих результатів.

На основі комплексу досліджень вивчено та узагальнено особливості початкового періоду взаємодії добавки (1 % мас.) заліза з мідним розплавом при індукційній плавці. Встановлено вплив характеристик добавки відносно рідкої міді (структури, температурних залежностей щільності, питомого електроопору, магнітної проникності) на початковому етапі її розчинення при плавці в печі з графітовим тиглем і ламінарному русі розплаву та рівномірному підйомі температури від 1,07 до 1,29 температури плавлення міді. Встановлено, що за перші 30 с контакту добавки (маса 8 г, температура 293 К) з рідкою (1448 К) міддю виникли рідкі фази, які не змішувалися з нею та збереглись до кінця (30 хв) плавки. Розчинення Fe відбувалось як у кінетичному режимі, так і в дифузійному. Одразу після контакту Fe з Cu теплопередачею від розплаву і дією високочастотного (44 кГц) електромагнітного поля нагрівався дуже тонкий (до $5 \cdot 10^{-5}$ м) поверхневий

шар феромагнітного заліза. Перегрівання вище точки Кюрі зменшувало інтенсивність впливу поля на поверхневий шар, але концентрована дія поля підтримувалась розвитком електровихрових течій біля поверхні добавки. Підняття температури до 1643 К інтенсифікувало розчинення та розповсюдження рідких і твердих мікрооб'ємів у розплаві і насичення його киснем. Згідно отриманих результатів, сприятливим діапазоном плавки є 1523…1623 К при визначенні оптимального перемішування розплаву. Формування мікроемульсованих, суспензійних або біметалевих структур може реалізуватися у зливках спеціальними технологічними прийомами.

На основі проведених досліджень впливу підвищеної концентрації заліза (до 20 %), зроблено висновок про необхідність кардинальної зміни технологічного процесу виплавки високолегованих сплавів. Для запобігання неконтрольованої взаємодії заліза з вуглецем тиглю при виплавці сплаву з 10 % заліза, замість графітового застосовано тигель з карбіду кремнію, а при 20 % – алундовий. Враховано, що процес змішування (розчинення) заліза в рідкій міді супроводжується ендотермічним ефектом особливо у зоні концентрацій плаского ходу ліквідусу сплаву Cu-Fe, а питома потужність електроенергії переважно передавалась об'єму рідкого заліза завдяки його більшому питомому електроопору, ніж у міді (у 30 разів більше, ніж у твердої міді та у 5 разів при її рідкому стані). Такі співвідношення питомих електроопорів викликали інтенсивні електровихрові (при взаємодії електроструму з власним електромагнітним полем) та магнітогідродинамічні (обумовлені взаємодією електроструму з магнітним полем індуктора) течії, що турбулізувало розплав безпосередньо у пограничному шарі рідкого металу, який оточував добавку міді. Це інтенсифікувало процеси тепломасообміну в системі добавка – розплав. На цих особливостях засновано технологічний прийом переходу на першочергове розплавлення заліза в індукційній тигельній печі при виплавленні сплавів з його підвищеним вмістом. Тому проводилось першочергове розплавлення заліза з поступовим насиченням розплаву міддю невеликими твердими добавками при незначному перегріванні розплаву над температурою ліквідусу (до 25 К) і русі металу в ламінарному режимі

в об’ємі тигля і турбулізованому безпосередньо біля добавки.

З метою досягнення сталого розшарування рідких фаз при виплавленні мідного сплаву з 20 % мас. Fe у склад залізної шихти було додано 0,2 % вуглецю за рахунок застосування сталі. Процес сплавлення компонентів було узгоджено з особистостями діаграм стану Cu-Fe та Cu-Fe-C у зоні низьких концентрацій С. Це забезпечило його постійне перебування у стані передрозшарування (зародки емульсії, які безперервно зароджувались і розчинялись), що притаманно розплавам Cu-Fe. В шарах розплаву, які оточували добавки міді у процесі їх розчинення, підвищувався вміст Cu і вони за концентрацією входили у зону розшарування системи Cu-Fe, легованою С. Там відбувалось спонтанне емульгування і набуття сталої структури дисперсними фазами. При їх подальшому переході в зону змішування успадкована сталість структури затримувала процес розчинення глобуляризованих утворень. Охолодження металевої рідини супроводжувалось конкуренцією процесів глобуляризації і утворення дендритів. Це проявилось у розмірах об’ємів розплаву, які характеризувались перевагою одного з типів фаз або їх паритетом у залежності від температурно-концентраційних та часових умов, а також особливостей їх виникнення і розвитку. В структурі отриманого безперервним розливанням у валковий кристалізатор (швидкість охолодження ~1000 К/с) стрічки виявлено 19 типів глобуляризованих утворень (0,2…250 мкм), три з яких (0,2…1,0 мкм) представляли заморожені мікроемульсії.

При узагальненні результатів досліджень морфології зерен у сплавах системи мідь-залізо (Fe 0,7…20 %), охолоджених у діапазоні швидкостей $1{,}0\cdot10^{0}…2{,}5\cdot10^{5}$ К/с у різних умовах тепловідведення виявлено, що відбувалась відповідна зміна співвідношення довжини зерна до його ширини (l/b) від значень 1,1 до 9,0. Зерна, що мали подовжену форму (l/b = 2) формувались в умовах охолодження виливків з циліндричною боковою поверхнею, які моделювали процес безперервного лиття циліндричних заготовок і охолоджувались зі швидкістю $V = 1{,}0\cdot10^{0}…1{,}5\cdot10^{1}$ К/с. Охолодження безперервнолитої стрічки в умовах відведення тепла з двох поверхонь при валковому розливанні ($V = 1{,}0\cdot10^{3}$ К/с) та пласких часток, що утворювались Із краплі розплаву при її

розтіканні по металевій підкладці, яка забезпечувала переважне відведення тепла у напрямку однієї поверхні частинки зі швидкістю $1{,}0\cdot10^4\ldots2{,}0\cdot10^4$ К/с призводило до формування у структурі компактних зерен з $l/b = (1{,}1\ldots1{,}3)$. Підвищення швидкості охолодження пласких частинок на підкладці до $3{,}0\cdot10^4\ldots2{,}5\cdot10^5$ К/с дало в їх структурі стовпчасті зерна, спрямовані поперек частинки зі співвідношенням $l/b = (2{,}5\ldots9{,}0)$. Безперервнолитий біметалевий стрижень зі структурою мідного осердя у залізній оболонці, в середині осердя якого метал охолоджувався зі швидкістю $\sim1{,}0\cdot10^{-1}$ К/с характеризувався зернами, спрямованими вздовж його вісі зі стовпчастою морфологією при $l/b = 5$.

При валковому розливанні-прокатці в зоні накопичення рідкого металу у міжвалковому просторі кутового двовалкового кристалізатора при вертикальній подачі металу в цю зону, генерується турбулентна течія розплаву. Турбулізований розплав поступає в міжвалковий зазор, де формується стрічка в умовах високої швидкості охолодження, яка фіксує турбулентний характер стану металу, що твердне. В окремих зонах міжвалкового простору формуються застійні зони. Турбулентно-кінетична в'язкість, а також турбулентно-кінетична енергія і швидкість її дисипації мають найбільше значення в кінцевій зоні простору і його центральній зоні, а в застійних зонах вони значно нижчі. Як відомо, зовнішнє постійне магнітне поле перерозподіляє кінетичну енергію турбулізованого потоку між зонами інтенсивної і зменшеної турбулентності, що призводить до зближення рівнів турбулентності. З урахуванням такої дії постійного магнітного поля в проведених експериментах завдяки вертикальному введенню струменя розплаву Cu-Fe в металеву форму і накладання на розплав в ній горизонтального постійного магнітного поля змодельована турбулентна ситуація у міжвалковому просторі в разі накладання постійного магнітного поля з припущенням відсутності транзитної течії. Магнітогідродинамічна дія (МГД) на розплав, що рухається, передусім зумовлена силовою дією, яка виникає при перетинанні потоком горизонтально спрямованих силових ліній постійного магнітного поля. Стан металу, що рухається, визначено за критерієм Рейнольдса (Re) – співвідношенням сил інерції та в'язкості. Його максимальне значення в проведених експериментах складало

$8{,}0\cdot10^4$ (початок заливання) та $1{,}6\cdot10^4$ (кінець заливання), що відповідало вираженому турбулентному стану розплаву у міжвалковому просторі.

Заливання металу з високою швидкістю при турбулентному режимі течії викликало велику питому потужність перемішування розплаву під час всього періоду заповнення форм. Дія магнітного поля на розплав у ливарних формах характеризувалась значеннями чисел подібності Гартмана – (*Ha* – відношення електромагнітної сили до сили в'язкості), магнітогідродинамічної взаємодії (*N* – співвідношення електромагнітних та інерційних сил), Альфвена – (*Al* – співвідношення магнітної і кінетичної енергії), магнітного числа Прандтля – Pr_m, що характеризує співвідношення дисипації електромагнітної енергії до дисипації механічної енергії (за рахунок в'язкості). Ефект локальної дії магнітного поля на характер руху розплаву (пригнічення тривимірних турбулентних вихрів у рідині і перетворення їх у двовимірні) визначався за величиною безрозмірного комплексу *Ha/Re*. Для металу, що заливався в ливарні форми, по-різному розміщені по відношенню до постійного магніту, значення чисел *Ha, N, Al,* Pr_m та *Ha/Re* були відповідно: в зазорі магніту – *Ha* = 336; *N* = 0,61 (початок заповнення форми) та *N* = 3,1 (закінчення заповнення форми); *Al* = 2,9 (початок заповнення форми) та *Al* = 67,9 (закінчення заповнення форми); $Pr_m = 1{,}3\cdot10^{-5}$, $Ha/Re = 4{,}2\cdot10^{-3}$ (початок заповнення форми) та $Ha/Re = 4{,}0\cdot10^{-3}$ (закінчення заповнення форми); на відстані від магніту – *Ha* = 134; *N* = 0,1 (початок заповнення форми) та *N* = 0,5 (закінчення заповнення форми); *Al* = 0,47 (початок заповнення форми) та *Al* = 11,0 (закінчення заповнення форми); $Pr_m = 1{,}3\cdot10^{-5}$, $Ha/Re = 1{,}68\cdot10^{-3}$ (початок заповнення форми) та $Ha/Re = 8{,}4\cdot10^{-3}$ (закінчення заповнення форми).

В зазорі постійного магніту та на відстані від нього високі значення числа Гартмана (*Ha* >> 1) свідчать про те, що постійне магнітне поле пригнічувало турбулентні пульсації швидкості, перпендикулярні його силовим лініям. Ступінь впливу магнітного поля на турбулентність потоку та його ламінарізацію, виражена комплексом *Ha/Re*, показала, що у зазорі магніту його значення перевищувало критичне ($4{,}0\cdot10^{-3}$). Це вказувало на виражене пригнічення полем тривимірних турбулентних вихорів і перетворення їх на двовимірні та ламінарізацію потоку на

всьому етапі заповнення порожнини ливарної форми. На відстані від магніту, де дія постійного поля була послаблена, значення комплексу *Ha/Re* на початковому етапі заповнення ливарної форми було $< 4{,}0 \cdot 10^{-3}$, і постійне магнітне поле майже не впливало на турбулентні вихри. При переході до кінцевого етапу заповнення форми значення комплексу *Ha/Re* відповідало умові ($> 4{,}0 \cdot 10^{-3}$) спроможності поля до перебудови турбулентних вихрів у потоці розплаву і його ламінарізацію. Значення параметру магнітогідродинамічної взаємодії для обох типів розташування ливарних форм відносно магніту відповідало умові $N < 1$, і вказувало на перевагу інерційних сил над електромагнітними. Тому силова дія магнітного поля на течію розплаву була недостатня для сплощення епюри швидкостей потоку.

У разі заповнення ливарної форми, розташованої між полюсами постійного магніту, величина числа *Al* перевищувала 1. Таким чином постійне магнітне поле впливало на об’єм розплаву в цілому, пригнічуючи найбільш інтенсивну турбулентність, яка виникала у його локальних об’ємах, сприяючи стабільності потоку розплаву протягом всього періоду заповнення ливарної форми. Для випадку заповнення ливарної форми, розташованої на відстані від постійного магніту, на початковому етапі заливання питома магнітна енергія, уведена у розплав, була менша за питому кінетичну енергію його руху. На цьому етапі величина числа *Al* була менша за 1 та потужності магнітного поля було достатньо лише для впливу на окремі локальні об’єми у розплаві з найбільшою швидкістю переміщення (локальні пульсації у розплаві). Наприкінці заливання ситуація у розплаві, що піддавався дії постійного магнітного поля, була аналогічна тій, яка реалізована при русі розплаву у формі між полюсами магніту.

Отримані при заливанні у магнітному полі значення магнітного числа Прандтля вказують на те, що джоулеве тепло, яке виділяється за рахунок магнітної в’язкості, значно менше, ніж теплота, утворювана за рахунок в’язкого тертя у розплаві, що рухається перетинаючи силові лінії магнітного поля. Таким чином у постійному магнітному полі ефект нагрівання розплаву, що рухався, був нікчемним. Встановлено, що при обробленні постійним магнітним полем збільшується однорідність структури і знижується розмір структурних складових

сплаву.

Визначена можливість виникнення оболонкових форм у сплавах Cu-Fe при малій концентрації заліза (0,75 % мас.) у зразках в умовах швидкісного охолодження розплаву (~$1 \cdot 10^5$ К/с) і у макрозразках при низькій швидкості охолодження (~$1 \cdot 10^1$ К/с). Отримано мідний стрижень (діаметр 7…10^{-3} м, довжина 6 м) у залізній оболонці зі сплаву Cu – 10 % мас. Fe в процесах високочастотної індукційної плавки і безперервної розливки. В результаті по довжині стрижня виникли дві ділянки з різною формою оболонки. На першій ділянці (довжина ~ 3 м) оболонка від трьохшарової (залізний шар, середній та внутрішній з наростаючим вмістом розчиненої міді) будови товщиною ~ 500 мкм перейшла в одношарову залізну з товщиною 10 мкм. Наступна ділянка, розповсюджена до кінця стрижня, з острівковою оболонкою товщиною ~ 5 мкм на початку і ~ 3 мкм на кінці з окремими компактними утвореннями товщиною до 50 мкм. Шар осердя, що прилягав до оболонки першої ділянки, складався з дрібних (3 мкм) кристалів міді і її розчину в залізі та мав товщину ~ 65 мкм. На другій ділянці такий шар в осерді був відсутній. Осердя на обох ділянках складалось із дендритів, орієнтованих вздовж вісі стрижня та евтектики Cu + Cu_2O. Можливе застосування отриманих структур біметалевого стрижня – електроди, кабелі, дроти, каталізатори.

При узагальнені результатів експериментів щодо отримання мідних стрижнів з оболонкою заліза методом безперервного горизонтального лиття, який, як відомо, має ряд переваг перед вертикальним, була врахована специфіка розливання через графітовий кристалізатор, безпосередньо вмонтований у стінку тигля індукційної печі, який був розташований у зоні активної дії змінного електромагнітного поля індуктора печі. Температурне поле стрижня при його формуванні при такій конструкції кристалізатора має три зони: 1) високотемпературна – частина каналу кристалізатора, яка безпосередньо розташована у стінці тигля, куди входить розплав з ванни печі; 2) водоохолоджувана, де починає формуватися початкова кірка; 3) зона виходу з кристалізатора кірки з рідким осердям до зони повністю затверділого тіла стрижня. Таким чином здійснюється послідовний перехід від рідкого стану до рідко-твердого та від нього – до твердого стану стрижня. Тобто поки метал знаходиться в

рідкому або твердо-рідкому стані у його об’ємах електромагнітне поле може впливати на формування структури сплаву. Оскільки силові лінії електромагнітного поля індуктора, які замикаються з його зовнішньої сторони, охоплюють значний простір (поле розсіяння), то воно діє на метал в усіх температурних зонах. Ця конструкція установки безперервного лиття стрижня має електромагнітний перемішувач, що розташований з зовнішньої сторони індуктора. У випадку працюючого перемішувача рідкий метал вказаних температурних зон також знаходиться під впливом і його змінного електромагнітного поля. Внаслідок суперпозиції полів електромагнітний вплив на зони стрижня посилюється. Як показали результати досліджень, змінне електромагнітне поле призводить до небажаних змін у структурі мідного сплаву, зокрема, значного зростання розмірів дендритів у порівнянні з контрольним металом не обробленим полем, а також відсутністю дрібних кулястих вкраплень. Експерименти, проведені при накладанні постійного магнітного поля на рідкі сплави системи Cu-Fe, що охолоджуються і тверднуть, навпаки показали суттєве покращення їх литих структур, зокрема, через подрібнення і фрагментацію дендритів, а також збільшення кількості та дисперсності кулястих вкраплень на основі заліза в порівнянні з контрольним сплавом.

На основі узагальнення результатів досліджень по особливостям дії постійного та змінного електромагнітного полів в експериментах, що моделювали елементи безперевного лиття циліндричних заготовок, випливає необхідність протидії деструктивного впливу змінного електромагнітного поля на формування структури заготовки постійним магнітним полем.

Раціонально покласти в основу підвищення ефективності функціонування обладнання для формування безперервнолитих заготовок з заданою структурою з розплаву, отриманого методом індукційної плавки, науковий підхід, заснований на накладанні на 2 і 3 зони безперервнолитої заготовки значної питомої енергії постійного магнітного поля (забезпечення значень чисел $Al > 1$ та $N \sim 1$), яка протидіятиме дестабілізуючому впливу на розплав інерційних ефектів, особливо під час здійснення ривків при витягуванні заготовки з кристалізатора ковзання при конструюванні обладнання і відпрацюванні технологічних режимів.