

УДК 669.715:533.9:643

А. В. Нарівський, д-р техн. наук, член-кор. НАН України, директор,
e-mail: opprs@ptima.kiev.ua

М. І. Тарасевич, д-р техн. наук, заст. директора

В. І. Дубодєлов, д-р техн. наук, академік НАН України, зав. відділу,
e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

І. М. Тарасевич, гол. програміст

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕНОСУ ПАРОВОЇ ФАЗИ ПРИ ПЛАЗМОВІЙ ОБРОБЦІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Глибинна плазмова обробка сплавів дає можливість об'єднати перемішування розплаву високотемпературним газом з регульованим нагрівом. Використання глибинної обробки сплавів плазмою дозволяє перевести матричний розплав до рівноважного мікрооднорідного стану з подальшим перетворенням його компонентів та добавок у пар, що підвищує інтенсивність фізико-хімічних процесів та міжфазних взаємодій у розплаві з конденсацією пароподібних фаз і створенням значних концентраційних та температурних градієнтів у матричному охолоджувачі. У цій роботі визначили розподіл температур та напрямок переміщення рідкого алюмінієвого сплаву АК6 в реакційній зоні плазмового струменя. Дослідження проводили з використанням обчислювального експерименту, математичного та комп'ютерного моделювання. В основу математичної моделі покладено фундаментальні рівняння тепломасопереносу з відповідними граничними умовами. Плазмовий нагрів моделювали у вигляді концентрованого джерела, яке має постійну температуру. Джерело розташовано в реакційній зоні зануреного в метал плазмового струменя.

Ключові слова: плазма, алюмінієвий сплав, комп'ютерне моделювання, парова фаза.

Головною перевагою технології глибокої плазмової обробки сплавів, у порівнянні з відомими, є можливість об'єднання перемішування розплаву високотемпературним газом з регульованим нагрівом (залежить від електричної потужності плазмотрону). Температура розплаву в реакційній зоні плазмового струменя, зануреного в рідкий метал, при наближенні до сопла плазмотрону збільшується до 4500 °С та більше [1]. При таких високих температурах випаровуються: алюміній (> 2700 К), мідь (2820 К), марганець (2370 К), магній (1360 К), цинк (1180 К). Ці компоненти в різних кількостях містяться в алюмінієвих сплавах. При обробці алюмінієвого сплаву АК7 плазмотроном (18–20 кВт) швидкість випаровування компонентів у розплаві досягає 180 г/хв.

Зі зростанням потужності плазмотрону маса компонентів, що випаровуються з розплаву, збільшується. Частина парів компонентів, що сформувалася, надходить у газові бульбашки і разом з ними виноситься з реакційної зони струменями в периферійні об'єми ванни. Решта парів перебуває в розплаві та миттєво охолоджується до його середньомасової температури («конденсується»). Внаслідок

дроблення газових бульбашок і об'єднання їх в збільшені пари металів вони надходять до розплаву та охолоджуються. При охолодженні парів у розплаві утворюються часточки конденсату та мікрооб'єми, які в залежності від розміру інтенсифікують процес зародкоутворення в сплавах і сприяють виникненню бульбашок водню. Утворені при охолодженні парів мікрооб'єми можуть деякий час знаходитись у розплаві в якості кластерів з великою кількістю активованих атомів. При конденсації парів компонентів виділяється теплота фазового переходу, яка збільшує час існування в розплаві активованих атомів та мікрогрупувань.

Використання глибинної обробки сплавів плазмою дозволяє перевести матричний розплав до рівноважного мікрооднорідного стану з подальшим перетворенням його компонентів та добавок у пар. У результаті цього суттєво підвищується інтенсивність процесів фізико-хімічних та міжфазних взаємодій у розплаві з конденсацією пароподібних фаз і створенням значних концентраційних та температурних градієнтів у матричному охолоджувачі (середньомасова температура розплаву ~ 1000 K). Такий спосіб обробки сплавів дозволить одержувати нові матеріали, у яких армуючі високотемпературні та нанорозмірні фази будуть споріднені з матричним металом та рівномірно розподілені в ньому.

У цій роботі визначили розподіл температур та напрямок переміщення рідкого алюмінієвого сплаву АК6 у реакційній зоні плазмового струменя. Дослідження проводили з використанням обчислювального експерименту, математичного та комп'ютерного моделювання. В основу математичної моделі покладено фундаментальні рівняння тепломасопереносу з відповідними граничними умовами. Плазмовий нагрів моделювали у вигляді концентрованого джерела, яке має постійну температуру. Джерело розташовано в реакційній зоні зануреного в метал плазмового струменя. Об'єм реакційної зони при цьому дорівнював $3141,5 \text{ см}^3$ (визначено експериментально).

При плазмовому нагріванні рідкий метал біля концентрованого джерела швидко нагрівається. Спочатку швидкості нагрівання розплаву перевищують 1000 град/хв. Після утворення в реакційній зоні парової фази (температура кипіння ~ 2500 градусів) швидкість нагрівання металу зменшується до 200 і нижче градусів за хвилину. Нагрівання металу плазмою відбувається рівномірно за всіма напрямками. У результаті цього границя нагрітого до високої температури металу має сферичну форму (рис. 1). Швидкість переміщення такої границі знижується в міру збільшення об'єму парової фази в розплаві. Це обумовлено меншими значеннями коефіцієнту теплопровідності при підвищених (> 1800 K) температурах розплаву і великими витратами тепла на процес пароутворення різних фаз у реакційній зоні. Теплота плавлення алюмінію складає $393,6$ Дж/г, а теплота його пароутворення у $2,7$ разів більше і дорівнює 10530 Дж/г.

При плазмовій обробці протягом ~ 5 хв режим нагрівання металу в реакційній зоні струменя переходить у квазістаціонарний стан. При нагріванні розплаву в такому стані кількість тепла, що підводиться з плазмою, дорівнює теплу, що відводиться нагрітими об'ємами сплаву в більш холодні шари рідкометалевої ванни, та витрачається на процеси пароутворення і синтезу фаз у розплаві. Зона теплового впливу на рідкий метал при квазістаціонарному режимі нагрівання стабілізується на відстані $35\text{--}40$ мм від концентрованого джерела (рис. 1).

Через незначний тепловідвід бічними та торцевими поверхнями конвекційні потоки вздовж вказаних меж майже відсутні. Але велика різниця між температурою плазми і рідкого металу сприяє утворенню кільцевого вихрового потоку. Він спрямований від плазми до бічної поверхні, потім переміщується вниз і розпадається на два потоки, які інтенсифікують циркуляцію розплаву. Швидкість поверхневих потоків при наближенні до ядра вихру збільшується від $0,01$ до $0,03$ см/с. Ядро діаметром до $10\text{--}15$ мм при цьому має нульову швидкість конвекційних потоків.

Зменшення відстані джерела нагріву від дна призводить до зміни конфігурації високотемпературної області. Сфероподібну форму вона зберігає при відстані між плазмою і дном більше 80 мм. При подальшому зменшенні цього параметру сферична форма порушується. Високотемпературна зона обігріву та утворення пароподібної

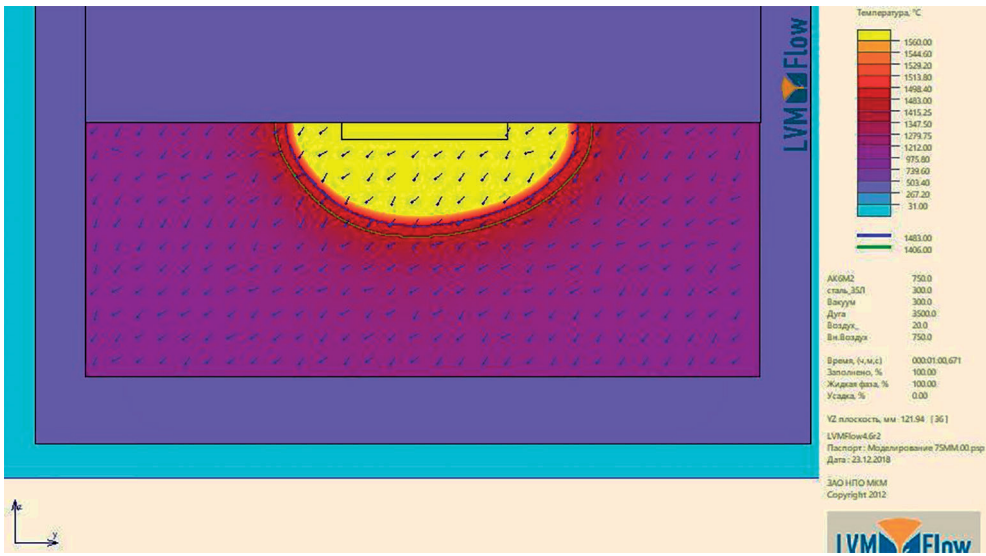


Рис. 1 Квазистационарное тепловое поле при плазмовой обработке алюминієвого сплаву (висота розплаву 100 мм) при теплоізоляції бічної та донної поверхонь

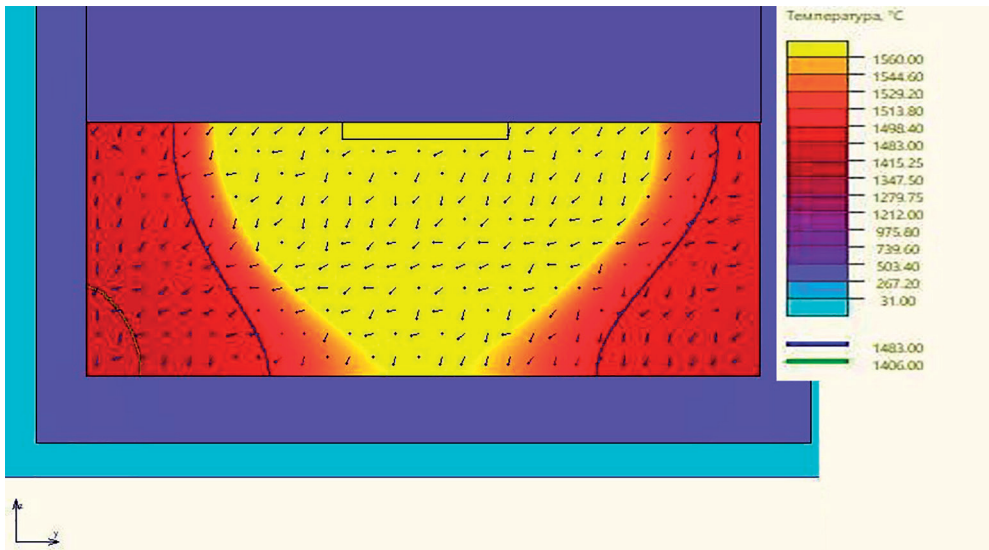


Рис. 2. Квазистационарное тепловое поле при плазмовой обработке алюминієвого сплаву (висота розплаву 75 мм) при теплоізоляції бічної та донної поверхонь

фази в ній переміщуються до бічної та донної поверхні (рис. 2). У результаті цього формується чашоподібна високотемпературна область з широкою зоною нагріву вільної поверхні (біля концентрованого джерела нагріву) і вузькою біля дна. Завдяки зменшенню відстані між дном та плазмою відбувається трансформація стаціонарної вихрової зони. У результаті такої трансформації пароподібна фаза утворюється, в основному, в шарах розплаву, що розташовані біля донної поверхні. Для інтенсифікації процесу синтезу фаз необхідно, щоб частки, які утворюються при швидкому охолодженні парів, разом з перегрітим металом відводилися від донної поверхні. Перегрітий розплав з частками «конденсату» з новими фазами може відводитися від високотемпературної зони конвективними потоками. Інтенсивність і розподіл конвективних потоків у рідкометалевій ванні при обробці сплавів плазмою залежить від глибини занурення і температури плазмового струменя (рис. 3). Залежно від цих параметрів, конвективні потоки в розплаві розподілені нерівномірно, а їх швидкість

змінюється від 0,5 до 6,0 м/с. Для рівномірного розосередження синтезованих фаз у рідкометалевій ванні необхідно перегрітий розплав цілеспрямовано відводити з регульованою швидкістю від донної поверхні реакційної зони. Найбільш раціонально такий відвід здійснювати МГД-пристроями, у яких плазмовий випарник встановлюють над однією з вертикальних ділянок Ш-подібного каналу. При розташуванні парника над центральною ділянкою каналу нагрітий плазмою розплав разом з парами і частково синтезованими фазами засмоктують із випарника і спрямовують через активну (термосилову) зону в канал, що розташований між полюсами електромагніту, назад у тигель установки. Під час проходження по центральному каналу рідкий метал додатково нагрівається індукторами установки.

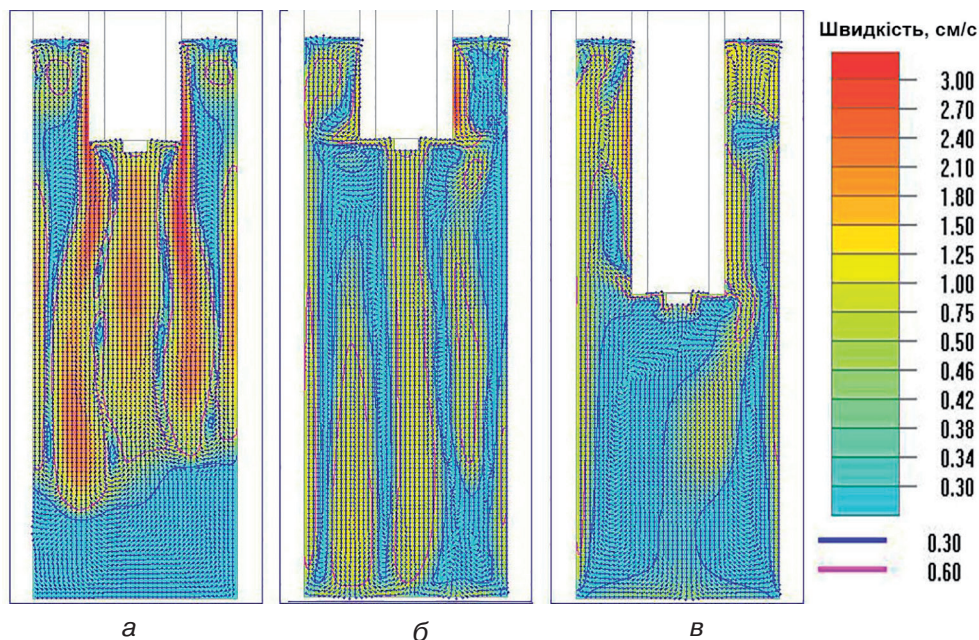


Рис. 3. Розподіл конвективних потоків у рідкометалевій ванні залежно від температури і глибини занурення плазмового струменя в розплав: а – глибина занурення 100 мм, температура дуги 2000 °С; б – глибина занурення 100 мм, температура дуги 2800 °С; в – глибина занурення 350 мм, температура дуги 2000 °С

В активній зоні каналу частки «конденсату» з парів сплаву будуть додатково диспергуватися та розподілятися в металі під дією електромагнітних сил, величина яких для охолоджених часток та перегрітого розплаву є різною. Таке технічне рішення дозволить одержувати литі та композиційні матеріали з унікальними експлуатаційними характеристиками.

Список литературы

1. Найдек В. Л., Наривский А. В. Повышение качества отливок из алюминиевых и медных сплавов плазмореагентной обработкой их расплавов. – К.: Наук. думка, 2008. – 185 с.

Поступила 12.07.2019

References

1. Naydek, V. L., Narivskiy, A. V. (2008) Improving the quality of castings from aluminum and copper alloys by plasma reagent processing of their melts. K.: Naukova dumka, 185 p. [in Russian].

Received 12.07.2019

А. В. Наривский, д-р техн. наук, член-кор. НАН Украины, директор,
e-mail: opprs@prima.kiev.ua

Н. И. Тарасевич, д-р техн. наук, зам. директора

В. И. Дубоделов, д-р техн. наук, академик НАН Украины, зав. отделом,
e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

И. Н. Тарасевич, гл. программист

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ПАРОВОЙ ФАЗЫ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Глубинная плазменная обработка сплавов дает возможность объединить перемешивание расплава высокотемпературным газом с регулируемым нагревом. Использование глубинной обработки сплавов плазмой позволяет перевести матричный расплав в равновесное микро-однородное состояние с дальнейшим превращением его компонентов и добавок в пар, что повышает интенсивность физико-химических процессов и межфазных взаимодействий в расплаве с конденсацией паробразных фаз и созданием значительных концентрационных и температурных градиентов в матричном охладителе. В этой работе определили распределение температур и направление перемещения жидкого алюминиевого сплава АК6 в реакционной зоне потока плазмы. Исследования проводили с использованием вычислительного эксперимента, математического и компьютерного моделирования. В основу математической модели положены фундаментальные уравнения тепломассопереноса с соответствующими граничными условиями. Плазменный нагрев моделировали в виде концентрированного источника, имеющего постоянную температуру. Источник расположен в реакционной зоне погруженного в металл потока плазмы.

Ключевые слова: плазма, алюминиевый сплав, компьютерное моделирование, паровая фаза.

A. V. Narivskiy, Doctor of Engineering Sciences, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Director, e-mail: opprs@prima.kiev.ua

N. I. Tarasevich, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director

V. I. Dubodelov, Doctor of Engineering Sciences, Academician of the NAS of Ukraine, Head of Department, e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

I. N. Tarasevich, Chief Programmer

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kiev, Ukraine)

PECULIARITIES OF VAPOUR PHASE TRANSFER DURING PLASMA TREATMENT OF ALUMINUM ALLOYS

The deep plasma treatment of alloys makes possible to integrate the melt stirring with high-temperature gas and regulated heating. The use of deep treatment of alloys by plasma allows transferring the matrix melt into equilibrium micro-homogeneous state with further transformation of its components and additions into a vapour that increases the intensity of physical and chemical processes and interfacial interactions in melt with condensation of vapour phases and creation of significant concentration and temperature gradients in matrix alloy. In this work the temperature distribution and movement direction for liquid AK6 aluminum alloy in the reaction zone of plasma jet were defined. The research was executed using computational experiment, mathematical and computing simulation. The fundamental equation of heat and mass transfer with corresponding boundary conditions was taken as a basis of the mathematical model. The plasma heating was simulated as a concentrated source with constant temperature. The source was placed in the reaction zone of plasma jet immersed into metal.

Keywords: plasma, aluminum alloy, computer simulating, vapour phase.