

УДК 669.715:669.054

Скоробагатько Ю.П.¹, Семенко А.Ю.², Семірягін С.В.³, Горшков А.О.⁴,
Ященко О.В.⁵

¹ канд.техн.наук, старший дослідник, ФТІМС НАН України

² канд.техн.наук, старший дослідник, ФТІМС НАН України

³ канд.техн.наук, доцент, ФТІМС НАН України

⁴ науковий співробітник, ФТІМС НАН України

⁵ молодший науковий співробітник, ФТІМС НАН України

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ ОБРОБКИ РІДКОГО МЕТАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЯВИЩА ПІНЧ-ЕФЕКТУ ТА ЛОКАЛЬНОГО РОЗРІДЖЕННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Головною умовою одержання високоякісних виливків із алюмінієвих сплавів є мінімальний ступінь їх забрудненості воднем та оксидними включеннями. З цією метою широко використовуються різні способи позапічної обробки алюмінієвих сплавів. При цьому особлива увага приділяється тим з них, в яких застосовуються екологічно чисті фізичні методи на розплав, зокрема електромагнітні поля [1, 2], причому для їх реалізації найбільш прийнятні багатофункціональні електротехнологічні установки магнітодинамічного типу [3, 4]. Це пояснюється тим, що в них органічно поєднуються операції регульованого індукційного нагріву та керованого електромагнітного перемішування рідкого металу, що поєднується з дозованим електромагнітним розливом металу [5].

При використанні такого обладнання в процесах приготування та розливання алюмінієвих сплавів, навіть у відсутності обробки металу реагентами, спостерігається зниження вмісту в металі водню та неметалевих включень. При цьому встановлено, що видалення водню та неметалевих включень відбувається внаслідок впливу на розплав електричного струму, вихрових структур та електродинамічних коливань у каналах магнітодинамічної установки (МДУ) [4, 5].

У даній роботі для підвищення інтенсивності силовій імпульсній дії на рідкий метал МДУ використовували явище лінійного пінча, який має місце у провідниках з електричним струмом [6]. Його фізична сутність полягає в тому, що паралельні провідники, якими протікає електричний струм в однаковому напрямку, притягуються. Рідкий метал, що заповнює канал МДУ, можна подати у вигляді великої кількості паралельних провідників, які притягуються один до одного. Якщо щільність струму однакова у всьому поперечному перерізі каналу, то будь-якій точці цього перерізу сила спрямовано до його геометричному центру.

У раніше проведених дослідженнях [7] для створення пінч-ефекту МДУ

застосовували спеціальну неелектропровідну вставку з круглим отвором, розташовану вертикально. При цьому створювалися умови, за яких щільність електричного струму перерізу цього отвору була рівномірною і вищою, ніж у каналі. Тиск у розплаві від дії лінійного пінчу зростає від стінок, що формують рідкий провідник, до його центру, тому металостатичний тиск на стінки послаблюється. Якщо використовувати полярну систему координат, прийнявши центр поперечного перерізу круглого провідника за її початок, то градієнт тиску вздовж радіуса виражається рівнянням:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot r \cdot j^2}{2}, \quad (1)$$

де p – додатковий тиск від лінійного пінча, Па; r – відстань від центру рідкого провідника до точки, в якій діє додатковий тиск, м; μ_0 – магнітна стала, Гн/м($4\pi \cdot 10^{-7}$); μ – магнітна проникність розплаву, безрозмірна величина; j – щільність струму в поперечному перерізі рідкого провідника, А/м².

Негативне значення градієнта додаткового тиску обумовлено тим, що його величина зменшується у напрямку від центральної точки, прийнятої за початок координат.

Після інтегрування диференціального рівняння (1) отримаємо залежність величини тиску в рідкому металі від щільності струму та відстані від початку координат:

$$P = -\frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot j^2 \cdot r^2}{4} + P_M \quad (2)$$

де P – результуючий тиск у рідкому металі, Па; P_M – металостатичний тиск, Па.

Слід особливо відзначити, що тиск, обумовлений лінійним пінчем, спрямований від стінок циліндричного каналу, в якому знаходиться рідкий метал, до його осі, тоді як статичний тиск, навпаки, впливає на стінки. Якщо негативний доданок у рівнянні (2) перевищить величину металостатичного тиску, відбудеться перетискання рідкого провідника та його розривання. Електричний струм, отже, і сили, викликані лінійним пінчем, в розірваному рідкометалевому витку зникають унаслідок чого відбувається відновлення цілісності витка. У металі знову виникає тиск, який викликається явищем «пінч-ефекту», і відбувається його розрив. Таким чином, в рідкому металі на ділянці, що розглядається, виникає складний періодичний процес розриву рідкометалевого провідника і відновлення його цілісності, що супроводжується виникненням електричної дуги [8], підвищенням температури і пульсацією тиску. Даний ефект реалізується в закритих непроникних для повітря каналах, тому між поверхнею металу і стінкою каналу утворюється область зниженого тиску, в яку можуть дифундувати розчинені в розплаві гази.

При розриванні електричної ланцюга на цій ділянці рідкому металі виникає дуговий розряд, відбувається іонізація газів та адіабатичне нагрівання, тобто, має місце адіабатичний процес, у якому система не поглинає і віддає тепло [8]. Тиск газу в розрядному проміжку зростає, причому його величина може бути визначена:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (3)$$

де P_1, P_2, T_1, T_2 – відповідно початкові та кінцеві величини тиску та температури в розрядному проміжку, Па, К; γ – показник адіабати (для двоатомних газів $\gamma=1,4$).

Для забезпечення теплосилової обробки рідкого алюмінієвого сплаву МДУ зону комплексного впливу на розплав створювали в центральній гілці Ш-подібного каналу магнітодинамічної установки [9]. При цьому за допомогою електромагнітної сили забезпечували багаторазове циркуляційне прокачування рідкого металу через зону зниженого (щодо атмосферного) тиску з ініціюванням у вільно витікаючому струмені, на виході з насадка, що дроселює, явища пінч-ефекту із забезпеченням умов розриву рідкометалевого провідника (струміль розплаву заданого діаметра) обумовленого пропусканням через розплав змінного електричного струму великої густини (рис. 1).

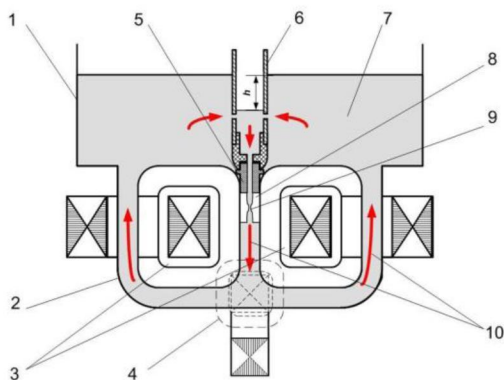


Рисунок 1 - Схема комплексної обробки алюмінієвого розплаву в МДН-6А при створенні розрідження в локальній зоні та ініціювання пінч-ефекту в струмені металу, що вільно витікає: 1 – тигель; 2 – канал; 3 – індуктори; 4 – електромагніт; 5 – змінний дроселюючий насадок з калієвого фторфлогопіту (дросель); 6 – металопровід; 7 – алюмінієвий розплав; 8 – локальна зона розрідження; 9 – ділянка виникнення пінч-ефекту; 10 – напрямок циркуляції розплаву

Слід зазначити, що при розрахунку умов виникнення пінч-ефекту у струмені, що вільно витікає, у вираженні (2) складової можна знехтувати. В результаті в цій зоні періодично спостерігалось виникнення електродинамічних коливань та циклічне виникнення електродугових розрядів при розриванні струменя металу, що є рідкометалевим провідником.

На етапі відпрацювання методики проведення експериментальних досліджень для створення зниженого тиску в герметичному металопроводі центральної гілки Ш-подібного каналу МДУ, над його устям по чергово встановлювали змінні неелектропровідні, виготовлені з калієвого фторфлогопіту, дроселіруючі насадки ($\varnothing 5, 10$ і 12 мм).).

Фіксацію насадка в усті металопроводу центральної гілки каналу МДН-6А здійснювали за допомогою металопроводу, в якому виконані два бічні отвори, розташовані нижче рівня металу в тиглі. Крім того, металопровід служив для визначення перепаду рівнів металу (h) у тиглі установки та забезпечення циркуляції розплаву через зону обробки. Визначення перепаду рівнів металу в тиглі установки та металопроводі, в якому були виконані отвори заданого перерізу, було необхідним для розрахунку масової витрати розплаву через зону обробки [10-11].

Виконані в бічній поверхні металопроводу отвори підбиралися таким чином, щоб їхній загальний переріз був удвічі більшим, ніж у дроселя. Діаметр отвору дроселі в насадці приймали рівним 10 мм.

Для забезпечення протікання електричного струму через центральну гілку Ш-подібного каналу і створення умов виникнення пінч-ефекту в струмені, що вільно витікає з дроселюючий насадка, індуктора МДН-6А включали в несиметричний за напругою режим. Знижений тиск у локальній зоні центрального каналу МДУ створювали при включенні установки режим всмоктування металу через центральну гілку каналу і нагнітання через бічні. Під встановленим насадком, що дроселює, за рахунок зміни поперечного перерізу металотракту, при русі розплаву виникала область зниженого тиску, в якій створювалися умови для виділення розчиненого в металі газу. Експериментально встановлений час утворення газової порожнини в цій зоні відповідало $15-30$ секунд, а в струмені рідкого металу, по якому протікав індукований електромагнітними системами МДН-6А електричний струм, створювалися умови для ініціювання «пінч-ефекту».

Таким чином, при включенні установки в режим всмоктування під дією електромагнітних сил метал, що знаходиться в металопроводі центральної гілки каналу, виштовхувався у бічні, а з них – на тигель МДН-6А. При цьому розплав з тигля установки, через бічні отвори в металопроводі надходив усередину нього, а далі через отвір в насадці, що дроселює, в центральну гілку Ш-подібного каналу (рис. 1).

Зважаючи на те, що локальна зона зниженого тиску знаходиться під

рівнем металу, а електромагнітний тиск підбирали таким чином, щоб рівень металу в металопроводі був вищим за отвір у насадці, потрапляння газу з атмосфери було виключено. Щоб уникнути розривання рідкометалевого витка в робочій зоні МДУ внаслідок заповнення каналу газом, установку вимикали через кожні 2,5 хвилини роботи в такому режимі, при цьому з металопроводу через отвір насадка виходив пухирець газу.

При проведенні експериментів встановлено, що оптимальним режимам процесу комплексної обробки металу відповідав діаметр отвору в насадці 10 мм, тому що в цьому випадку спостерігалось стійке явище пінч-ефекту. Воно супроводжувалося повним розриванням струменя металу і виникненням дугового розряду в локальній зоні, яка розташована нижче дроселюючого звуження (щільність струму 21 А/мм^2), при значенні витрати розплаву $0,7-0,8 \text{ кг/с}$ через зону МГД-дії. При цьому маса рідкого металу, що пройшов через зону обробки протягом 15 хв, склала 600-700 кг (близько 7-8 обсягів металу в установці). Використання насадка з меншим діаметром (5 мм) також дозволяло забезпечувати умови стійкого виникнення «пінч-ефекту» та циклічного розриву рідкометалевого провідника з виникненням дугового розряду безпосередньо в дроселюючому отворі (щільність струму – $80-85 \text{ А/мм}^2$). Однак при цьому витрата розплаву через зону обробки становила не більше $0,2-0,3 \text{ кг/с}$, що відповідало прокачування протягом 15 хв всього 3-х обсягів металу в установці. Збільшення діаметру насадка до 15 мм призвело до зменшення щільності струму в перерізі отвору до $10-11 \text{ А/мм}^2$ і зникнення умов виникнення «пінч-ефекту» з розривом рідкометалевого провідника, як в отворі насадка, так і в зоні, розташованій нижче дроселюючого звуження. Крім того, внаслідок збільшення витрати розплаву через зону розрідження до $0,9-1,0 \text{ кг/с}$, відбувалося часткове повторне насичення металу воднем і оксидними включеннями.

Для оцінки ступеня впливу такого способу обробки рідкого алюмінієвого сплаву МДН-6А на його якість було експериментально встановлено, що мікроструктура вихідного металу (рис. 2, а) відповідає типовій структурі силуміну [12]: дендритна структура, всередині зерен спостерігаються точкові виділення до 1 мкм. Середнє значення міжвісьової відстані дендритів α -твердого розчину алюмінію знаходиться в межах 12,5 мкм. Зерна Si дрібні з міжзеренною евтектикою по формі кута закруглені. По межах зерен розташовані скупчення кремнію розміром 18-60 мкм.

Після 15 хвилин комплексної обробки в режимі циркуляційного прокачування металу через зону локального розрідження та ініціювання пінч-ефекту (рис. 2, б), було відзначено подрібнення зерен твердого розчину алюмінію до 7-10 мкм, при цьому скупчення Si зменшилися до 10-15 мкм, чим у вихідному сплаві, і були рівномірно розподілені, хоча залишилися гострі кути. У α -твердому розчині виділилася вторинна фаза, що складається

з темно-сірих включень, рівномірно розподілених по структурі в кількості 1,5%. Розмір цих включень від 16 до 30 мкм. Утворені включення представляють собою світлі скелети у вигляді китайських ієрогліфів, відповідають фазі $Al_8Si_6Mg_3Fe$.

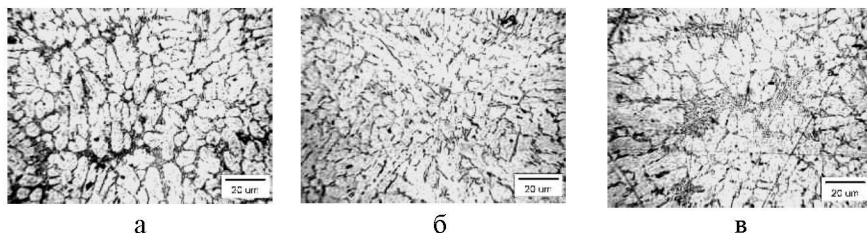


Рисунок 2 - Мікроструктура вторинного алюмінієвого сплаву АК7:

а) вихідного; б) після 15 хв. та (в) 30 хв. комплексної обробки, травлено, $\times 400$

Внаслідок безперервної обробки металу протягом 30 хв (рис. 2, в) розмір зерен α -твердого розчину алюмінію зменшився до 5-8 мкм. Включення Si стали коротшими і компактнішими. У зернах α -твердого розчину спостерігається 2-3% великих (розміром до 20 мкм) темних вторинних включень.

Для оцінки ефективності обробки алюмінієвого розплаву в МДУ із застосуванням комплексного впливу пінч-ефекту та локального розрідження в процесі обробки на якість алюмінієвого розплаву відбирали проби металу для механічних випробувань. Результати механічних випробувань зразків наведено у табл. 1.

Таблиця 1 –Результати механічних випробувань зразків

Номер зразка	Час обробки, хв	Міцність на розрив, МПа	Відносне подовження, %
1	вихідний	88-96	0,7-0,8
2	15	130-135	2,4-2,5
3	30	125-130	1,4-1,6

Аналіз отриманих даних показав, що комплексна обробка рідкого алюмінієвого сплаву шляхом його багаторазового циркуляційного прокачування через зону локального розрідження забезпечувала видалення розчиненого в розплаві водню з 0,6 до 0,05 $cm^3/100$ г металу.

Встановлено, що додатковий теплосиловий вплив, зумовлений проявом пінч-ефекту, сприяє переходу заліза з фази Al_3Fe у фазу – $Al_8Si_6Mg_3Fe$, яка у вигляді світло-сірих скелетоподібних пластин, розміщується по межах зерен α -твердого розчину алюмінію та сприяє дробленню скупчень первинного кремнію та власне подрібненню мікрозерна.

Однак в результаті витримки металу після обробки більше 20 хв, кількість водню поступово (протягом 3-4 годин) повертається до вихідного рівня. Зважаючи на те, що насичення воднем відбувається в основному з атмосфери, а відбір проб здійснювали з поверхні розплаву в тиглі, то об'єктивно судити про відновлення кількості водню у всьому обсязі металу не можна [7, 13].

Згідно з даними, отриманими за допомогою термічного аналізу [14], після 15 хв обробки вміст водню в металі зменшився з 0,3-0,6 см³/100 г у вихідному металі до 0,05 см³/100 г - в обробленому сплаві.

Комплекс експериментальних досліджень процесу обробки алюмінієвого розплаву марки АК7 з використанням для цих цілей методики термічного аналізу [12] показав, що комбінований вплив на метал у магнітодинамічній установці локального розрідження, високих температур і силових імпульсів тиску призводить до збільшення темпу охолодження в рідкому стані від $6,43 \cdot 10^{-3}$ до $6,76 \cdot 10^{-3}$ 1/с та відношення теплоти кристалізації до теплоємності (L/C) від 378 до 402. Обробка металу протягом 15 хвилин призводить до зменшення вмісту водню з 0,3-0,6 см³/100 г металу до 0,05-0,08 см³/100 г металу, при цьому вміст неметалевих включень залишається незмінним.

Зниження об'єму включень заліза в пластинчастій формі з 0,37% (у вихідному металі) до 0,002% після 15 хвилин обробки, а також зменшення об'єму евтектики з 88,2% до 65,2%, і збільшення її модифікації призводить до збільшення пластичності сплаву в литому стані (без термообробки) з 0,8% до 2,4% та збільшення міцності на розрив з 90 МПа до 130 МПа.

Список використаних джерел

1. В.І. Дубодєлов, В.О. Середенко, О.В. Середенко. Вплив електромагнітного поля на фази алюмінієвого сплаву в каналі магнітодинамічної установки. *Металознавство та обробка металів*. 2007. №2. С. 6-10.
2. В.Л. Рейтер, О.О. Бялик. Обробка кристалізованого сплаву електродинамічною вібрацією. Сб. Магнітодинамічні установки для плавлення, обробки та заливки ливарних сплавів. Київ:ІПЛ, 1989. С. 95-97.
3. V.L. Naydek, A.V. Nariivsky. Improvement of quality of aluminum and copper alloy castings by plasma-reagent treatment of their melts.alloys by plasma-reagent treatment of their melts. K: Naukova Dumka, 2008. 184 c.
4. L.L. Tir, M.Y. Stolov. Electromagnetic devices for control of melt circulation in electric furnaces. M.:Metallurgy, 1975. 224 p.
5. Cahn J.W., Hilliard J.E. Free Energy of a Nonuniform System. I. interfacial Free Energy. J. Chem. Phys.,1958. Vol. 28. No2. P. 258-267.
6. K.I. Vashchenko, V.S. Shumikhin. Melting and out-of-furnace processing

of cast iron for castings. K.:Vishcha Shk., 1992. 246 p.

7. V.I. Yakimov, B.N. Maryin, V.V. Zelinsky. Zelinsky. Influence of electric current on liquid aluminum alloy. *Metallurgy of Mechanical Engineering*. 2003. №3. P.36-39.

8. Tir L.L., Stolov M.L. Electromagnetic devices for control of metal circulation in electric furnaces. *electric furnaces*. M.:Metallurgy, 1991. 280 p.

9. В.І. Дубодєлов, В.О. Серєденко, В.М. Фіксєн. Оцїнка технологїчної ефектївностї режимїв комплексної магнїтодинамїчної і електрогїдроїмпульсної обробки алюмінієвих сплавїв. *Процеси лиття*. 2006. №3. С. 81-86.

10. В.П. Полїщук. Дослїдження процесу заливки металу в ливарну форму під дією магнїтного поля. Авторєф. Дис...канд.техн. наук. Київ, 1962. 24 с.

11. V.P. Polishchuk, B.A. Melnik. X-ray study of the structure of liquid alloys Al-Si, melted in a magnetodynamic furnace *Foundry production*. 1989. №7. P. 6-7.

12. Popel P.S. Metastable microdissolution of liquid alloys and its influence on the structure of a casting. *Foundry production*. 1992. №7. P. 3-6.

13. Brodova I.G. Conditions of formation of metastable phases at crystallization of alloys. *Journal Melts*. 1988. V.6. P. 23-27.

14. Deev V.B., Selyanin I.F., Tsetsorina S.A. About refinement of the cluster model of metallic melts. *melts. Izv. vuzov. Ferrous metallurgy*. 2008. №8. С. 66-67.