УДК 621.74:669.0173

Kyung-Hyun Kim¹, PhD, Principal Researcher, e-mail: khkim3332@hanmail.net**Sim Hyun Suk²**, PhD, President, e-mail: hs8388@dscast.co.kr**В.М. Цуркін³**, канд. фіз.-мат. наук, пров. наук. співр., e-mail: dpta@iippt.com.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2697-579X>**А.В. Іванов³**, канд. тех. наук, ст. наук. співр., e-mail: artiomsan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3247-6121>**О.О. Жданов³**, канд. тех. наук, ст. наук. співр., e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com**М.К. Гумененко³**, мол. наук. співр., e-mail: dpta@iippt.com.ua**М.В. Честних³**, мол. наук. співр., e-mail: dpta@iippt.com.ua**Ю.Н. Дьогтєв³**, пров. інженер-конструктор, e-mail: dpta@iippt.com.ua¹Korea Institute of Materials Science (Changwon, Korea)²Dong San Tech. Co., Ltd (Changwon, Korea)³Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (Миколаїв, Україна)

Вплив електрострумової обробки розплаву алюмінієвого сплаву В95пч на механічні властивості та структуру литого стану з урахуванням додаткової термічної обробки

В роботі наведено результати досліджень обробки сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu модифікації В95пч у рідкому стані імпульсами електричного струму у комплексі з реагентною обробкою (AlTi5B1 та NaCl) з метою визначення умов та параметрів впливу, за яких досягається рівень механічних властивостей, що відповідає показникам литого сплаву після термічної обробки.

Як відомо, сплави системи Al-Zn-Mg-Cu активно застосовують у машинобудуванні та літакобудуванні. У цьому випадку службові характеристики деталей із цих сплавів потрібно забезпечити на найвищому рівні. Для цього використовують після операцій лиття термообробку, яка суттєво підвищує ціну готових заготовок. Тому актуальною постає задача пошуку методів обробки сплаву ще на стадії лиття, які б забезпечили рівень механічних властивостей литого сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu на рівні, що відповідав би результату після термообробки. Дослідження, результати яких наведено у даній роботі, показали принципові можливості досягнення такої мети.

Запропоновано для обробки використовувати імпульси електричного струму у комплексі з реагентами. Якщо обробка реагентами діє вибірково на елементи структури сплаву, то енергетична – формує комплекс явищ, що забезпечують активне підвищення якості литого сплаву. Доведено, що при застосуванні електрострумової обробки потрібно використовувати різно заглиблені електроди з ізольованою бічною поверхнею та забезпечувати оптимальну величину густини електричної енергії порядку 10^8 Дж/м³.

Запропонований принцип обробки розплаву забезпечує практично округлу форму зерен α -Al, зростання ступеня однорідності мікроструктури виливка. Показники міцності (σ_B , $\sigma_{0.2}$) підвищено у 2,3 рази, що практично відповідає значенням у термообробленому стані за режимом Т6.

Такий результат можна пояснити комплексною дією на розплав енергетичного та реагентного впливу, які змінюють механізми структуроутворення та твердіння, у тому числі за рахунок активної гомогенізації та дегазації металевої рідини при збільшенні центрів кристалізації, забезпечуючи формування субструктури литого металу з більш «вигідною» морфологією твердого розчину на основі Al та евтектичних складових, яке зазвичай виникає для сплавів системи Al-Zn-Mg-Cu при гартуванні.

Ключові слова: розплав, електрострумова обробка, термообробка, структура, властивості, якість.

Вступ. Головна проблема ливарного виробництва – отримання потрібного рівня показників якості литих металовиробів – вирішується при застосуванні технічних, технологічних та організаційних заходів на всіх стадіях металургійного циклу «Шихта-Розплав-Виливок». З урахуванням ефектів спадко-

вості найбільша увага приділяється проміжній стадії, на якій, крім ретельного дотримання технологічних інструкцій плавлення та розливання, застосовують різні методи обробки розплаву або додавання реагентів, та/або вплив енергетичних полів різної фізичної природи. У першому варіанті реагенти діють вибірково,

забезпечуючи окремий позитивний ефект. Енергетична обробка є багатофункціональною та багатфакторною, тому, за окремих умов, вона забезпечує досягнення комплексу проміжних цілей, інтегрально позитивно впливаючи на співвідношення «Структура-Властивості» рідкого стану, відбиваючись також позитивно на кінцевому результаті обробки для отримання сприятливого співвідношення «Ціна-Якість».

Останнім часом активно розвиваються дослідження впливу електричного струму, який пропускають через розплав, на показники якості литого стану. Зацікавленість у розвитку цього методу пояснюється насамперед відносно невеликими енерговитратами за наявності можливості отримати достатній ефект обробки [1–3]. І, якщо наприкінці XX століття із-за малої кількості експериментальних результатів багато аспектів цього явища навіть не підходили під поняття «дискусійні», то вже зараз отримано дані, які переконливо підтверджують інноваційну перспективу цього методу. У цьому плані наразі актуальними для розв'язання визначаються задачі, які мають більш прагматичну мету. Наприклад, визначення оптимального сукупного екстремуму впливу взаємообумовлених факторів електрострумової обробки розплаву на кінцевий її ефект, який відображається співвідношенням «Ціна-Якість».

Зазначимо, що здебільшого публікації щодо обробки струмом розплаву стосуються Al та його ливарних сплавів. Відносно багатокомпонентних деформівних сплавів на основі Al результати застосування обробки розплаву струмом практично відсутні.

У попередній статті авторів [4] досліджено вплив різних принципів обробки розплаву сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu (B95пч). Проведено порівняння електрострумової обробки, електрогідроімпульсної, як окремо, так і в комплексі з модифікуванням реагентами (AlTi5B1 та NaCl). Обробку проводили у печі при температурі 740 °С. Застосовано обробку як імпульсами струму, так і пульсуючим випрямленим струмом та змінним. Маса сплаву була незмінною (400 г). Аналіз структури та механічних властивостей литого виливка показав, що найкращий результат отримано після реагентної обробки розплаву у комплексі з обробкою імпульсами струму.

Як відомо, для багатокомпонентних сплавів системи Al-Zn-Mg-Cu формування пересиченого твердого розчину відбувається при гартуванні, що забезпечує формування необхідного рівня властивостей виливків після старіння. Така додаткова обробка дозволяє суттєво підвищити механічні властивості, на відміну від двокомпонентних силумінів, для яких гартування та старіння лише незначною мірою покращують ці характеристики.

У роботі [4] авторами було показано, що електрострумова обробка (ЕСО) у комплексі з реагентною обробкою дозволяє отримати показник σ_b практично на рівні значення без обробки розплаву, але після термічної обробки виливка.

Тому можливість застосування ЕСО розплаву сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu задля отримання високих показників механічних властивостей виливків без

необхідності виконання подальшої термообробки є актуальною задачею.

Мета роботи – визначити параметри обробки розплаву сплаву B95пч імпульсами електричного струму, за яких досягається рівень механічних властивостей, що відповідає показникам литого сплаву після термічної обробки.

Умови та параметри експерименту. Досліджували сплав B95пч ГОСТ 4784-97, який плавляли у тигельній печі опору при температурі 730 °С. Після ізотермічної витримки за необхідністю при перемішуванні міксером вводили AlTi5B1 у кількості, що відповідає масі Ti 0,15 % маси сплаву. Далі, після другої ізотермічної витримки (також за необхідністю) вводили при перемішуванні у розплав NaCl у кількості до 1 % від маси сплаву. А вже потім проводили обробку високоевольтними імпульсами струму. Розливання проводили при температурі ≈ 720 °С у дві різні форми: тигель, який мав температуру ≈ 20 °С та у який відливали зразки лише для металографічних досліджень, та металеву форму для отримання зразків для визначення межі міцності відповідно до ГОСТ 1497-84 та аналізу структури. Форму попередньо нагрівали до температури 280 °С. Таким чином із-за різної маси сплаву, що заливається, та різних температур тигля і форми отримували зразки з різною швидкістю охолодження 30 та 5 °С/с.

Крім того, для визначення часу, упродовж якого розплав зберігає свій стан після обробки, проводили ще одне аналогічне розливання через 25 хвилин після обробки.

Обробку струмом виконували за допомогою паралельно розташованих титанових електродів з ізолюваною бічною поверхнею. Електроди занурювали у розплав на різну глибину: позитивний – практично до дна тигля, а негативний – на 3–5 мм від поверхні. Такий спосіб введення електродів, як показали результати попередніх досліджень, є оптимальним для формування у розплаві електромагнітного поля з найкращими потенційними можливостями термосилового впливу на об'єкт обробки [5].

Як і реагентна обробка розплаву, так і енергетична повинні бути дозованими. Тільки за умов дотримання цієї необхідної вимоги можна очікувати позитивний ефект обробки. Так, для енергетичної обробки із застосуванням ультразвуку експериментально підтверджено необхідність введення у розплав сумарної густини акустичної енергії заданої дози [6, 7]. В роботі [8], розглядаючи термодинамічні умови утворення зародків кристалізації, визначено величину загальної дози густини енергії, яку потрібно ввести у розплав (E_0).

Що стосується обробки розплаву на основі Al, то авторами даної статті була спеціально визначена величина E_0 у межах від $(0,8 \text{ до } 4) \cdot 10^8$ Дж/м³ [1]. Ці дані співпадають з даними робіт [6–8]. Таким чином, обробляючи різні сплави в лабораторних умовах, є можливість скоротити кількість експериментів.

У даній роботі задля підтвердження гіпотези про необхідність забезпечення оптимальної дози густини введеної енергії (E_0) при обробці струмом сплаву B95пч в експериментах застосовували три маси

сплаву: 0,5 кг; 1,5 кг; 3 кг. При цьому для кожної обробки зберігали постійними величину енергії імпульсу струму та частоту їх чередування. Для обраних мас сплаву оптимальний час обробки складав 140 с; 420 с; 840 с відповідно.

Для визначення додаткового впливу термообробки на структуру та властивості сплаву, який попередньо обробляли у рідкому стані реагентами та імпульсами струму, виконували термічну обробку за режимом згідно з інструкцією ВІАМ № 747-59: гартування при температурі 470 ± 5 °С, витримка 60 хв., охолодження в проточній воді при температурі ≈ 30 °С. Старіння при температурі 140 ± 5 °С, час витримки складав: або 4 год., або 8 год., або 12 год., або 16 год. Охолодження – на повітрі. Дослідження ліквідації легуючих елементів на всіх етапах термічної обробки та після заливання зразків здійснювали за допомогою растрового електронного мікроскопу РЕММА-102. Шліфи готувалися за стандартною методикою для виявлення структури алюмінієвих сплавів, використовували реактив Келлера. Структуру аналізували за допомогою мікроскопа НЕОФОТ-32. Окрім структури, елементний склад сплаву визначався у місцевих точках (досліджувана площа 5 мкм): у центрі зерен та на їх межах. Величину твердості вимірювали за методом Брінелля на приладі ТБ5004 згідно з ДСТУ ISO 6507-4:2008.

Аналіз отриманих результатів. У табл. 1 показано, що за умов однакового значення величини E_0 для різних мас сплаву отримано практично однакові значення механічних властивостей (σ_B ; $\sigma_{0,2}$; δ ; Ψ ; HV).

За допомогою обробки струмом показники σ_B збільшено практично удвічі у порівнянні з необробленими струмом зразками. Заливання у форми через 25 хв. після обробки знижує механічні характеристики виливка. Але все ж вони перевищують значення, отримані для контрольних зразків.

Одним із факторів, що підтверджує покращення структури сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu, є зменшення об'єму евтектики [9]. Дані табл. 1 свідчать про такий факт. А саме, після обробки струмом та реагентами, незалежно від маси сплаву, об'єм евтектики при різних швидкостях охолодження зменшено у порівнянні з необробленим струмом.

На рис. 1 наведено мікроструктури дослідних зразків. Ретельний аналіз ступеня однорідності зерен α -Al свідчить про позитивний ефект обробки рідкого стану у порівнянні зі зразком, який отримано без обробки. Обробка призводить до формування більш однорідної структури та сфероїдизації зерен α -Al.

Як показують металографічні дослідження (рис. 2), структура зразка, який оброблено струмом, після заливання та наступного відпалу стає практично гомогенною та стабілізованою з ознаками дисперсного твердіння, на відміну від зразка, який отримано без обробки струмом та реагентами.

Для контрольних зразків дані рис. 2 показують, що зразок, який отримано без обробки електричним струмом у рідкому стані, має гіршу однорідність структури зерен α -Al, аніж той, що отримано після обробки струмом. Ці показники відрізняються у середньому у 5 разів.

Таблиця 1

Загальні характеристики мікроструктури та властивостей зразків

Вид обробки	Параметри мікроструктури				Властивості				
	середній розмір α -зерна, мкм		об'єм евтектики, %		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	НВ
	швидкість охолодження V_c , C°/c								
	30	5	30	5					
Контрольний, без обробки	30	60	11	22	63	57	2	1,2	85
Контрольний, без обробки струмом, (AlTiB+NaCl) реагентна обробка	40	60	22	18	69	59	2	1	85
$m = 0,5$ кг, реагентна обробка; обробка струмом; заливання після обробки	20	50	4	12	130	97	1,5	0	80
$m = 1,5$ кг, реагентна обробка; обробка струмом; заливання після обробки	20	40	4	12	120	96	1,7	0	86
$m = 3$ кг, реагентна обробка; обробка струмом; заливання після обробки	20	45	5	6	140	102	1,8	0	85
$m = 3$ кг, реагентна обробка; обробка струмом; заливання через 25 хв. після обробки	40	50	5	6	100	82	0	0	81

Рис. 1. Показники мікроструктури зразків сплаву В95пч при різній швидкості охолодження: а – контрольний зразок; б – 3 кг, реагентна обробка та обробка струмом

Рис. 2. Мікроструктура зразків сплаву В95пч після відпалу

Рис. 3. Мікроструктура зразків сплаву B95пч після гартування та наступного старіння протягом різного часу

Рис. 4. Залежність величини міцності при розтягуванні зразка від часу термообробки

Порівняння зразків, які піддано загартуванню та штучному старінню протягом 4; 8; 12 або 16 год., показує наступне. Структура зразків, які отримано після обробки струмом, зовнішньо практично не змінюється. У той же час структура контрольних зразків, які отримано без обробки струмом, зі збільшенням часу термічної обробки суттєво змінюється. Рис. 3 наочно підтверджує цей факт.

Відносний ступінь однорідності зерен α -Al у зразках, які не піддавали обробці струмом у розплаві, практично не змінився після відпалу, перебуваючи на рівні 0,04. Але у подальшому при збільшенні часу старіння аж до 16 год. відносний ступінь однорідності поступово знижується від значення 0,01 до 0,005. В той же час для зразків, які у рідкому стані обробляли електричним струмом та реагентами, ступінь однорідності структури зерен α -Al після відпалу збільшився практично у 1,6 рази. Наступна термообробка тільки через 12 год. дозволила підвищити ступінь однорідності структури у порівнянні з контрольним зразком також практично у $\approx 1,5$ рази. При 16 год. термообробки ступінь однорідності підвищується у 2 рази.

Дані, які отримано після механічних випробувань на розтягування зразків, які після обробки струмом розплаву піддавались термообробці, свідчать про наступне (рис. 4).

Порівняння зразків, які отримано без обробки струмом та після його застосування, свідчать про те, що після обробки струмом σ_b підвищується практично у 2,2 рази, а $\sigma_{0,2}$ – у 1,7 рази у порівнянні з необробленим зразком. Термообробка тільки через 12 год.

дозволила збільшити величини σ_b та $\sigma_{0,2}$ для зразка, який не піддавали обробці струмом, практично у 1,8 рази. Для зразка, який обробляли струмом, значення σ_b після 12 год. зрівнялось зі значенням σ_b для контрольного зразка. А значення $\sigma_{0,2}$ не суттєво підвищилось ($\approx$ на 20 %). Через 16 год. термообробки значення σ_b та $\sigma_{0,2}$ практично співпали для зразків без і після обробки струмом.

Як свідчать дані роботи [9], для отримання після термічної обробки високих показників міцності не потрібно досягати відносно однорідної структури. Але її високий показник позитивно впливає на корозійну стійкість виробів зі сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu.

У дослідженнях в роботі авторів зразків без обробки розплаву струмом оптимальний режим термообробки протягом 16 год. дозволив отримати межу міцності у 2,6 рази більшу, ніж для контрольного зразка. В той же час, практично таке саме підвищення межі міцності спостерігається після обробки розплаву струмом без додаткової термообробки.

Зіставляючи отримані дані, можна рекомендувати після обробки розплаву струмом в разі потреби проводити додаткову термообробку: гартування, зі старінням не більше 12 год., що дозволить отримати як однорідну структуру, так і високі показники міцності.

Вплив обробки розплаву струмом на пористість виливка сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu показав позитивний ефект. Контрольний зразок (без обробки струмом) мав пористість на рівні 2,5 %. Зразок масою 3 кг мав пористість 0,1 %, масою 1,5 кг – 0,25 %, масою 0,5 кг – 0,24 %.

6

Рис. 5. Мікроструктура зразків: а – після заливання без обробки високовольтним струмом; б – після обробки високовольтним струмом

Таблиця 2

Елементний склад зразків без та після обробки високовольтним струмом

Контрольна точка	Хімічний склад, %			
	Mg	Al	Cu	Zn
Зразок після заливання без обробки високовольтним струмом				
P1	10,17	67,50	8,05	14,29
P2	3,12	91,20	0,72	4,95
P3	8,90	66,48	10,21	14,41
P4	3,48	90,75	0,86	4,92
Зразок після обробки високовольтним струмом				
P1	3,05	91,33	0,96	4,66
P2	11,09	63,92	9,65	15,34
P3	2,72	90,67	1,01	5,60
P4	4,07	82,43	4,42	9,08

Контрольний зразок після заливання характеризувався досить нерівномірною структурою та нерівномірним розподілом Mg та Zn на границі зерна (рис. 5). Концентрація Mg досягає 10 %, а Zn – до 14 %, що характерно для литих зразків. Зерна містять 3,5 % Mg і 5 % Zn.

У табл. 2 представлено дані щодо елементного складу в окремих точках (P1–P4) зразка після заливання та після електрострумової обробки.

Варто зазначити, що зразок, оброблений струмом, зберігає схильність до дрібнозернистості навіть після рекристалізаційного відпалу. Зразок має рівномірний розподіл легуючих елементів, таких як Mg (~ 2 %) та Zn (~ 5 %).

Як показав контроль елементного складу, обробка розплаву високовольтним струмом не призводить до зміни хімічного складу виливка. Концентрація легуючих елементів, як евтектики, так і у середині зерна, відповідає марочному значенню В95пч. Тобто, можна стверджувати, що підвищення рівня механічних властивостей після обробки високовольтним струмом відбувається не за рахунок зміни хімічного складу твердого розчину Al та інтерметалідного зміцнення, а за рахунок формування тонкої субструктури з більш «вигідною» морфологією твердого розчину на основі Al та евтектичних складових.

Висновки

1. Обробка рідкого стану сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu модифікації В95пч імпульсами електричного струму та при застосуванні реагентів AlTi5B1 + NaCl за умов оптимального значення густини електричної енергії, що її введено у розплав, дозволяє забезпечити механічні характеристики литого металу практично на рівні, що відповідає результату термообробки за процедурою Т6.

2. Запропонований принцип обробки розплаву забезпечує практично округлу форму зерен α -Al, зростання ступеня однорідності мікроструктури виливка. Показники міцності (σ_B , $\sigma_{0,2}$) підвищено у 2,3 рази, що практично відповідає результату термообробки за процедурою Т6.

Такий результат можна пояснити комплексною дією на розплав енергетичного та реагентного впливу, які змінюють механізми структуроутворення та твердіння, у тому числі за рахунок активної гомогенізації та дегазації металевої рідини при збільшенні центрів кристалізації, забезпечуючи формування субструктури литого металу з більш «вигідною» морфологією твердого розчину на основі Al та евтектичних складових, що зазвичай відбувається для сплавів системи Al-Zn-Mg-Cu при гартуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Cherepovskii S.S., Vasyanovich N.A. Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. № 2. P. 181–185.
2. Slazhniev M., Kyung Hyun Kim, Hyun Suk Sim, Se Won Kim. Research on MHD process for controlling the segregation of Al-Sn alloy. 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials, Oct. 2015. Cannes, France. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01334619>
3. Tsurkin V.N., Sinchuk A.V., Ivanov A.V. Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. Vol. 46. № 5. P. 456–464.
4. Kyung Hyun Kim, Sim Hyun Suk, Цуркин В.Н., Иванов А.В., Зайченко А.Д., Жданов А.А., Честных Н.В. Влияние энергетической обработки расплава на механические свойства алюминиевого сплава В95пч. *Металл и литье Украины*. 2018. № 9–10. С. 68–72.
5. Eskin D.G., Mi J. Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields. *Springer Series in Materials Science*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019. P. 328.
6. Zhang Y., Song C., Zhu L. et al. Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy. *Metall. Mater. Trans.* 2011. Vol. 42. P. 604–611. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9502-9>
7. Zhang Y.H., Xu Y.Y., Ye C.Y., Sheng C., Sun J., Wang G., Miao X.C., Song C.J., Zhai Q.J. Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Sci Rep*. 2018; 8: 3242. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
8. Пригунова А.Г., Зелинская Г.М., Кошелев М.В. Влияние обработки расплава однополярным импульсным электрическим током на формирование железосодержащих фаз в сплаве АК5М2. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2019. № 5. С. 655–672.
9. Ivanov A.V., Tsurkin V.N. Peculiarities of Distribution of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields for Conductive Electric Current Treatment of Melts in Different Modes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2019. № 1. P. 53–64.
10. Абрамов О.В., Добаткин В.И., Казанцев В.Ф., Кулемин А.В., Некрасова С.З., Панов А.П., Пугачев С.И., Семенова Н.И., Статников Е.Ш., Эскин Г.И. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986. 277 с.
11. Пат. 2590744. Российская Федерация, МПК C22C 21/00, C22F 1/04, B22D 1/00. Полуфабрикат из алюминиевого сплава с улучшенной микропористостью и способ изготовления / Филипп Жарри (Fr); CONSTELLIUM ISSUAR (Fr). № 2013142428/02; заявл. 16.02.12; опубл. 10.04.15. Бюл. № 10.
12. Абрамов О.В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М.: Металлургия, 1972. 256 с.
13. Балакин Ю.А., Гладков М.И. О взаимосвязи расхода энергии внешнего воздействия и структуры затвердевающего металла. *Металлы*. 2001. № 3. С. 20–25.
14. Mondolfo L.F. Aluminum alloys: Structure and Properties. M.: Metallurgy, 1979. 640 p.

Надійшла 10.08.2020

REFERENCES

1. Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V., Cherepovskii, S.S., Vasyanovich, N.A. (2016). Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 2, pp. 181–185.
2. Slazhniev, M., Kyung Hyun Kim, Hyun Suk Sim, Se Won Kim (2015, October). Research on MHD process for controlling the segregation of Al-Sn alloy. 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials, Cannes, France. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01334619>
3. Tsurkin, V.N., Sinchuk, A.V., Ivanov, A.V. (2011). Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 46, no. 5, pp. 456–464.
4. Kyung Hyun Kim, Sim Hyun Suk, Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V., Zaichenko, A.D., Zhdanov, A.A., Chestnych, N.V. (2018). Effect of energy treatment of the melt on the mechanical properties of the aluminium alloy B95пч. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 9–10, pp. 68–72 [in Russian].
5. Eskin, D.G., Mi, J. (2019). Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields. *Springer Series in Materials Science*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, p. 328.
6. Zhang, Y., Song, C., Zhu, L. et al. (2011). Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy. *Metall. Mater. Trans.*, vol. 42, pp. 604–611, doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9502-9>

7. Zhang, Y.H., Xu, Y.Y., Ye, C.Y., Sheng, C., Sun, J., Wang, G., Miao, X.C., Song, C.J., Zhai, Q.J. (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific reports*; 8: 3242, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
8. Prigunova, A.G., Zelinskaya, G. M., Koshelev, M. V. (2019). The Effect of Melt Processing by Unipolar Pulsed Electric Current on Formation of Iron-Containing Phases in AK5M2 Alloy. *Metallophysics and advanced technologies. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, no. 5, pp. 655–672 [in Russian].
9. Ivanov, A.V., Tsurkin, V.N. (2019). Peculiarities of Distribution of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields for Conductive Electric Current Treatment of Melts in Different Modes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 1, pp. 53–64.
10. Abramov, O.A., Dobatkin, V.I., Kazantsev, V.F., Kulemin, A.V., Nekrasova, S.Z., Panov, A.P., Pugachev, S.I., Semyonova, N.I., Statnikov, E.Sh., Eskin, G.I. (1986). Influence of high power ultrasound upon the interphase surface of metals. Moscow: Nauka, 277 p. [in Russian].
11. Pat. 2590744. Russian Federation, IPC C22C21/00, C22F1/04, B22D1/00. Semi-finished product made of aluminium alloy having improved microporosity and manufacturing process. Jarry, P., zaiavl. 16.02.12, opubl. 10.04.15, Biul. no. 10 [in Russian].
12. Abramov, O.V. (1972). Crystallization of metals in ultrasonic field. Moscow: Metallurgiya, 256 p. [in Russian].
13. Balakin, Yu.A., Gladkov, M.I. (2001). Relationship between external energy consumption and structure of solidifying metal. *Metally*, no. 3, pp. 20–25 [in Russian].
14. Mondolfo, L.F. (1979). Aluminum alloys: Structure and Properties. Moscow: Metallurgy, 640 p.

Received 10.08.2020

Summary

Kyung-Hyun Kim¹, PhD, Principal Researcher, e-mail: khkim3332@hanmail.net
Sim Hyun Suk², PhD, President, e-mail: hs8388@dsccast.co.kr
V.M. Tsurkin³, PhD (Phys. & Math.), Principal Researcher,
 e-mail: dpta@iipr.com.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2697-579X>
A.V. Ivanov³, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: artiomsan@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-3247-6121>
O.O. Zhdanov³, PhD (Engin.), Senior Researcher,
 e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com
M.K. Gumenenko³, Junior Researcher, e-mail: dpta@iipr.com.ua
M.V. Chestnykh³, Junior Researcher, e-mail: dpta@iipr.com.ua
Yu.N. Degtev³, Leading Design Engineer, e-mail: dpta@iipr.com.ua

¹Korea Institute of Materials Science (Changwon, Korea)

²Dong San Tech. Co., Ltd (Changwon, Korea)

³Institute of pulse processes and technologies of the NAS of Ukraine (Mykolayiv, Ukraine)

Influence of electric current treatment of B95пч aluminum alloy melt on mechanical properties and structure of cast state taking into account additional heat treatment

The paper presents the results of investigation of pulse electric current treatment of liquid state of Al-Zn-Mg-Cu alloy of B95пч modification in complex with (AlTi5B1 and NaCl) reagent treatment in order to determine the conditions and exposure parameters under which the level of mechanical properties that correspond to indices of cast alloy after thermal treatment is achieved. As is known, alloys of Al-Zn-Mg-Cu system are widely used in mechanical engineering and aircraft construction. In this case, the performance properties of the pieces of machinery produced of these alloys must be ensured at the highest level. For this purpose, after casting operations the heat treatment is used that increases significantly the price of the finished billets. That is why the urgent task arises of searching for methods of alloy treatment at the casting stage, which would provide the indices of mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu system cast alloy at the level that would meet the result of heat treatment. The studies presented in this paper have shown the principle possibility of achieving this goal.

According to mentioned results it is proposed to use for treatment the pulses electric current in complex with reagents treatment. If reagent treatment acts on the elements of the alloy structure selectively, then energy processing forms a complex of phenomena that provide an active improvement of the cast alloy quality. It is proved that for application of electric current treat-

ment, it is necessary to immerse the electrodes with an insulated side surface to the different depth and introduce the optimal dose of electric energy density of the order of 10^8 J/m³.

The suggested principle of melt treatment provides practically rounded shape of α -Al grains and an increase of casting microstructure homogeneity degree. Strength indexes (σ_B , $\sigma_{0.2}$) are raised by 2.3 times, that practically corresponds to the result of heat treatment according to T6 procedure.

This result can be explained by the complex action on the melt of energy and reagent influence that changes the mechanisms of structure formation and solidification, inter alia through the active homogenization and degassing of metal liquids while increasing the crystallization centers, providing the formation of cast metal substructure with a more "advantageous" solid solution morphology based on Al and eutectic components that usually occurs at alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system during quenching.

Keywords

Melt, electric current treatment, heat treatment, structure, properties, quality.