

М. А. Фон Прусс, аспірант, e-mail: m.fonpruss@gmail.com

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

СПОСОБИ ТА МЕТОДИ ЗМІНИ МОРФОЛОГІЇ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ФАЗ У СИЛУМІНАХ

Алюмінієві сплави залишаються одними з найбільш уживаних матеріалів сучасності. Важливою технологічною перевагою цього виду матеріалів є простота і доцільність їх рециклінгу та повторного використання. Проте, саме під час переробки алюмінієвих сплавів вони насичуються домішками, які шкідливо впливають на структурно-фазові характеристики і механічні властивості литих виробів. Особливо шкідливою домішкою можна вважати залізо, вміст якого збільшується із кожним циклом переробки. До певної концентрації (~ 1 %мас.) залізо можна вважати корисним через зменшення пригару до сталевих прес-форм під час лиття під тиском. В інших випадках роль заліза негативна. Через свою нульову розчинність майже все залізо в алюмінії утворює інтерметалічні фази різного складу (Al_3Fe , Al_5Fe_2 , Al_8Fe_2Si , Al_5FeSi , Al_4FeSi_2 , Al_3FeSi та ін.), які неможливо видалити з розплаву. Залізовмісні фази мають здебільшого несприятливу морфологію, особливо у сплавах, які містять кремній, та є причиною падіння механічних і технологічних властивостей. Зниження вмісту заліза в силумінах можливе лише завдяки розбавленню розплаву чистими компонентами, але найбільш доцільним рішенням зменшення його негативного впливу є модифікування. У роботі розглянуто низку модифікаторів та технологій обробки алюмінієвих розплавів. Було проаналізовано особливості впливу додавання Mn, Ni, Cr, Co, V, La та інших елементів до силумінів різного складу, а також вплив деяких технологій фізичного модифікування та обробки алюмінієвих розплавів. У статті проводиться аналіз проблемних питань, пов'язаних з ефективністю дії різних модифікаторів та способів модифікування для нейтралізації негативного впливу заліза на властивості силумінів змін морфології залізовмісних фаз та підвищення властивостей сплавів.

Ключові слова: Al–Si–Fe, Al–Si–Cu–Fe, залізо в алюмінієвих сплавах, модифікування, фізичне модифікування розплаву.

Вступ

Завдяки високим технологічним, механічним та експлуатаційним властивостям алюмінієві сплави за обсягом виробництва займають друге місце після сплавів на основі заліза [1]. Силуміни систем Al–Si та Al–Si–Cu є класичними, надійними та широкоживаними матеріалами для ливарної промисловості завдяки чудовим триботехнічним властивостям, низькому коефіцієнту теплового розширення, низькій температурі плавлення, високій питомій міцності, низькій вартості, а також ливарним властивостям [2, 3]. Загальна частка литва силумінів становить приблизно 90 % від усіх ливарних алюмінієвих сплавів [4].

Використання при виробництві алюмінієвих сплавів відходів та вторинної сировини є цілком логічним та доцільним [5–8]. Простота процесів переробки алюмінієвої вторинної сировини і рециклінгу додає силумінам економічної привабливості [6, 8]. Відсутність в Україні виробництва первинного алюмінію тим більше обумовлює використання брухту та відходів алюмінію та його сплавів в якості сировини [1].

Повторне застосування алюмінієвих сплавів дозволяє в 5–10 разів знизити витрату енергоресурсів на виплавку тонни металу. Крім того, рециклінг алюмінію шляхом переплаву генерує на 95 % менше шкідливих викидів в атмосферу порівняно з виробництвом первинного алюмінію, отриманого металургійним шляхом [5, 6]. З огляду на це, виробництво вторинного алюмінію і його сплавів через менші енергетичні витрати і викиди в навколишнє середовище має тенденцію до зростання.

В наш час на машинобудівних підприємствах країн СНГ вторинні алюмінієві сплави доволі рідко використовують для виробництва відповідальних деталей [9]. Низька якість вторинних сплавів пов'язана, у першу чергу, з наявністю в їх складі шкідливої

домішки – заліза, інтерметаліди якого мають несприятливу морфологію та грають роль концентраторів напружень у матеріалі вилівка. У результаті спостерігається істотне зниження як пластичності, так і міцності вторинних сплавів. Відзначимо, що рівень заліза підвищується з кожним циклом переплаву сировини, а знизити його можливо лише розбавляючи розплав чистими компонентами [7, 10].

Залізо у вторинних алюмінієвих сплавах

Силуміни завжди містять залізо [10, 11]. Вплив заліза на властивості алюмінію настільки значний, що навіть відповідним ДСТУ 2839–94 (ГОСТ 1583–93) суворо регламентовано граничний вміст заліза для різних способів лиття [1, 10].

Залізо взаємодіє з алюмінієм, утворюючи інтерметалічні фази різних типів. Наприклад, при відсутності кремнію залежно від співвідношення алюмінію та заліза можуть утворитися тугоплавкі фази, такі як Al_3Fe , Al_5Fe_2 , Al_2Fe , $AlFe$, $AlFe_4$ та ін. [10]. Ці фази виділяються по межах зерен у нижній частині зразка, утворюючи пластинчасті кристали (на шліфах спостерігаються голкоподібні вклучення), великі розміри яких призводять до різкого зниження механічних властивостей [12, 13].

У присутності кремнію переважаючими фазами є крихкі утворення, які позначаються літерами α і β . Фазі α відповідає формула Al_8Fe_2Si , а фазі β – Al_5FeSi [10]. α -фаза кристалізується у вигляді рівноважних скелетоподібних вклучень («китайський ієрогліф») [10, 12]. β - Al_5FeSi фаза має тенденцію до утворення тонких пластин, які на площині шліфа з'являються у вигляді довгих голок довжиною часто більшою 100 мкм [10, 12]. Така фаза дуже тверда та крихка і має відносно низьку міцність зв'язку з матрицею [10, 12]. Ці дві фази негативно впливають на механічні та ливарні властивості алюмінієвих сплавів, суттєво знижуючи пластичність і корозійну стійкість [14], збільшують усадку, знижують рідкоплинність, а також збільшують об'ємну пористість [10]. Проте β - Al_5FeSi фаза є більш небажаною у структурі сплаву, оскільки її краї діють як місця концентрації напруги, полегшуючи ініціювання тріщин у матриці (тобто сприяє підвищенні крихкості), що призводить до утворення великих усадкових порожнин через неможливість рідкого металу заповнити проміжки між розгалуженими пластинами [15].

З підвищенням вмісту заліза можуть спостерігатися первинні фази δ - Al_4FeSi_2 у формі пластин і переважно присутні в сплавах, багатих кремнієм (> 14 %). У сплавах з підвищеним вмістом заліза (> 6 %) та кремнію (> 14 %) утворюється фаза γ - Al_3FeSi [16].

Порядок орієнтації інтерметалічних фаз залежить від вмісту заліза в алюмінієвих сплавах [10]. Такі фази виділяються переважно по межах зерен, орієнтуючись, як уздовж, так і впоперек. При утриманні 0,5–1,0 %мас. заліза вклучення мають голчасту структуру. При збільшенні вмісту заліза до 1,5 %мас. окремі голчасті виділення починають групуватися і формувати сітчасту або ієрогліфоподібну структуру. У сплаві, що містить 2 %мас. заліза і більше, інтерметалічні з'єднання виділяються як окремі великі вклучення.

Для сплавів алюмінію найбільш сприятливою формою залізовмісних вклучень є дисперсна скелетоподібна, компактна або глобулярна форми [12]. Однак залізо також є необхідним деякою мірою в алюмінієвих сплавах, тому що залізний слід може полегшити відділення ливарних деталей від ливарних форм, особливо при литті під тиском [17].

На сьогодні найбільш актуальним питанням в розрізі вищезгаданих проблем є підвищення якості сплавів, які виплавляються з брухту та відходів. Насамперед це стосується нейтралізації шкідливого впливу заліза. Основні задачі, які потребують вирішення – це зміна морфології залізовмісної фази в алюмінієвих сплавах.

Відомі способи та методи зміни морфології залізовмісних фаз в силумінах

Щоб звести до мінімуму проблеми із забрудненням алюмінію залізним ломом, в промисловості застосовується ретельне сортування брухту перед завантаженням його в плавильну піч [18]. Це включає ручне, магнітне і електромагнітне сортування і так званий «повітряний ніж» для сортування частинок подрібненого брухту по щільності [18].

Одним із простих шляхів зниження вмісту заліза в алюмінії є розведення його чистим первинним алюмінієм і застосування тиглів з вогнетривких матеріалів, які не забруднюють сплав залізом. Однак, часто це є економічно не вигідним, тому більшість виробництв дотримується методу збереження вмісту заліза на рівні, близькому до максимального допустимому для кожного сплаву.

В останні роки набув розвитку інший напрямок – нейтралізація шкідливого впливу заліза за рахунок зміни морфології голчастих фаз за допомогою модифікування. У результаті легування деякими елементами інтерметаліди набувають більш компактної сприятливої форми та чинять менше негативного впливу на пластичність, тріщиноустійкість та інші властивості [12, 18, 19].

Серед усіх елементів марганець частіше від інших додається до вторинних алюмінієвих сплавів. Його роль полягає у нейтралізації шкідливого впливу заліза шляхом утворення розгалуженої модифікації «китайського ієрогліфа» залізовмісного інтерметаліду $(\text{FeMn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ [20, 21]. При високому вмісті заліза добавки марганцю не мають позитивного впливу на рідкотекучість ливарного алюмінієвого сплаву через те, що знижують його пористість та можуть сприяти надмірному утворенню шлаку. Надмірна добавка марганцю до силуміну викликає утворення твердих фаз, що також ускладнює обробку різанням. Для підсилення впливу марганцю додають мідь, нікель і хром. У цьому випадку утворюються фази типу $(\text{FeMnCu})_x\text{Si}_y\text{Al}_z$, $(\text{FeMnNi})_x\text{Si}_y\text{Al}_z$, $(\text{FeMnCr})_x\text{Si}_y\text{Al}_z$ та інші [21], які мають більш придатну морфологію. Крім того, комбіноване додавання марганцю та хрому (вміст у сплаві $\text{Mn} = 0,22\text{--}0,59$, $\text{Cr} = 0,06\text{--}0,10$ % мас.) є ефективним для нейтралізації шкідливих фаз $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ шляхом утворення компактної $\text{Al}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr})\text{Si}$ фази з багатогранною, зірковою морфологією «китайського сценарію». [22]. Інтерметаліди, багаті на Fe, повністю осаджуються у вигляді зірки, однак більш висока концентрація Cr не рекомендується через утворення розгалужених фаз [22]. Також хром сприяє утворенню первинного кремнію.

Як поширене доповнення для нейтралізації ефектів залізовмісної фази, дія Cr, ймовірно, буде аналогічною дії Mn [15]. Додавання Cr спричиняє утворення фаз $\text{Al}_{13}\text{Si}_4(\text{CrFe})_4$, $\text{Al}_2\text{Si}_8(\text{CrFe})_5$ з формою «китайського ієрогліфу».

У роботі [23] визначено, що молібден сприяє підвищенню механічних властивостей сплаву та забезпечує більш ефективно зв'язування заліза, ніж марганець. Морфологія залізовмісних фаз при цьому замість класичної голкоподібної форми є переважно розгалуженою, що забезпечує більш високу міцність.

Цікавим рішенням також є комплексний модифікатор для алюмінієвих сплавів [24], який включає хлористий натрій і хлористий калій, титан, ванадій, хром, молібден. Комплексна дія препарату, що виконує роль модифікаторів I і II роду, забезпечила помітну зміну морфології залізовмісних фаз на компактну форму.

За результатами роботи [25] можна зробити висновок про позитивний вплив ванадію на структуру силумінів системи Al–Si–Cu. Модифікування цим елементом дало можливість зв'язати залізо у більш компактну не голчасту фазу.

Якщо в сплавах системи Al–Si з кремнієм присутній ще й магній, то у сплаві можуть утворитися ω -фаза $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ і фаза Mg_2Si , які формуються у вигляді, подібному ієрогліфам [10]. У роботі [26] за допомогою методу енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії спостерігали інтерметалічні фази з хімічними формулами $\text{Al}_{15}(\text{FeMg})_3\text{Si}_2$ та $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$. Було також помічено, що зі збільшенням вмісту заліза фази $\text{Al}_{15}(\text{FeMg})_3\text{Si}_2$ перетворюються на $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ фази, а розмір та кількість таких фаз збільшується.

За літературними даними [27] відомо, що при введенні нікелю в сплави Al–Fe утворюється фаза Al_5FeNi , яка має досить рівновісну форму виділення. При додаванні нікелю до сплаву, що містить залізо, за евтектичною реакцією сумісно з твердим розчином алюмінію виділяється фаза FeNiAl_9 [28]. Вона має сотову ледебуритоподібну будову, що призводить до підвищення пластичності в 1,1–3,7 рази та міцності на 18–45 %. Разом з тим, нікель з міддю додають для підвищення жароміцності. Вони утворюють фази $\text{D-Cu}_4\text{NiAl}_7$, CuNiAl_6 , $\delta\text{-(NiCu)}_2\text{Al}_3$, що знижують пластичність силумінів при кімнатній температурі і підвищують міцність при нагріванні. Інтерметалід

δ -(NiCu)₂Al₃ має розгалужену морфологію, що надає йому переваги у підвищенні механічних властивостей порівняно з фазою CuNiAl₆ пластинчастої огранованої форми. З точки зору морфології фаза D-Cu₄NiAl₇ займає проміжне положення між δ -(NiCu)₂Al₃ і CuNiAl₆ [28].

Згідно з даними [15, 29], кобальт може входити до складу фази Al₉(Fe,Co)₂, що змінює форму виділення фази Al₃Fe. Він надає ефект, подібний до Mn і Cr, на нейтралізацію заліза, але для пригнічення утворення β -Al₅FeSi фази потрібна більш висока концентрація кобальту. Потенційно небажаним наслідком додавання кобальту стала поява первинних частинок кремнію [29].

З аналізу літератури випливає, що модифікатором форми виділень залізовмісних фаз є берилій [13, 15, 30], але сполуки берилію високотоксичні і використання даного елемента в промислових сплавах заборонено. Зокрема, берилій здатний підвищити міцність вторинних силумінів на 73 %, а пластичність – у 4,5 рази [30].

Серед перехідних металів варто відзначити скандій. Навіть малі його добавки призводять до зміцнення сплаву. Sc для модифікування алюмінію не застосовується з економічних міркувань [31].

Цирконій використовують в кількості 0,1–0,3 % мас. для утворення дрібнодисперсних виділень інтерметалічних фаз, які підвищують температуру рекристалізації. У роботі [32] відзначається, що завдяки цирконію у сплаві Al–1%Fe–0,25%Si–0,3%Zr після відпалу при температурі 450 °C фаза α -Al₈Fe₂Si має вигляд «китайського ієрогліфа». З роботи [13] випливає, що фаза Al₃Zr, яка кристалізується первинно, може бути додатковим центром кристалізації і підкладкою для більш рівноважної фази Al₉(Fe,Co,Ni).

В роботі [33] було встановлено можливість зміни пластинчастої форми включень залізовмісних фаз в алюмінієвих сплавах на рівноважну під дією сірки при дотриманні масового відношення Mn:Fe > 0,5. Також у роботі [34] обробка сіркою сплаву AX9 з вмістом 1,2 % заліза при співвідношенні Fe:Mn у плаві, що дорівнює 2:1, забезпечує механічні властивості при литті в кокіл на рівні вимог ГОСТ 1583-89. Залізовмісна β -Al₅FeSi фаза при цьому рівномірно розподілена по перетину шліфа у вигляді дрібних включень округлої форми.

Зменшення кількості β -Al₅FeSi фази дає застосування літію, проте його вплив супроводжується утворенням фази AlLiSi, що негативно впливає на механічні властивості [15].

Також в роботі [15, 35] було встановлено, що стронцій має сильніший ефект модифікування, ніж натрій, який вигорає з розплаву. Залізовмісні фази при модифікуванні стронцієм значно зменшуються в розмірах, отримують округлу форму і рівномірно розподіляються. Але, як і берилій, стронцій є досить токсичним [13].

Результати роботи [36] показують, що додавання 0,15 Ti та до 1 % мас. Ce або La у сплав A356 при низькому вмісті кремнію призвело до утворення інтерметалічних фаз Al₁₁La₃(Cu, Fe)₄Si₂, Al₁₁Ce₃(Cu, Fe)₄Si₂ у вигляді ієрогліфу.

При аналізі літератури [37–41] було припущено, що механічні властивості литих алюмінієвих сплавів можуть бути поліпшені шляхом одночасного додавання двох видів елементів для модифікації залізовмісної фази.

У роботі [37] вивчено взаємодію елементів Sr і Bi та їх вплив на механічні властивості сплаву Al–Si–Cu–Fe–Zn. Було виявлено, що спільне мікролегування Bi і Sr в певній пропорції може помітно змінити форму голчастих фаз Al–Si–Fe в матриці.

У дослідженнях [38] вивчали взаємодію елементів Sr та La на мікроструктуру та механічні властивості сплавів Al–Si–Cu–Fe–Zn та Al–Si–Cu–Fe. Одночасне додавання елементів Sr та La (Sr/La = 1:5) було дуже ефективним у скороченні довжини голкоподібних виділень β -Al₅FeSi фази й може вдосконалити як вторинну фазу, так і зерна α -Al.

У роботі [39] було проведено комбіноване додавання Ti і Ce (Ti:Ce = 1:3) у сплав системи Al–Si–Cu–Fe–Mn. З результатів видно, що таке модифікування призвело до того, що голкоподібна фаза подрібнилась і була рівномірно розподілена в мікроструктурі.

Результати роботи [40] показали, що сплав Al–7Si–0,7Mg був модифікований додаванням (Pr+Ce). Голкоподібна фаза переросла у форму троянди, а зерна алюмінію зменшилися в розмірах і мали високий ступінь сфероїдизації.

Згідно результатів роботи [41], додавання (La+Yb) у сплав AlSi₁₀Cu₃ зменшило розміри первинної фази α -Al та евтектичних Si частинок, а також фази β -Al₅FeSi та покращило морфологію первинної фази α -Al та евтектичного Si.

У роботі [42] показано, що основними технологічними проблемами модифікування структури виливків з силумінів є відсутність універсальних модифікаторів, обмеженість їх дії; насичення розплаву силуміну воднем і оксидом алюмінію. Домішкові модифікатори не вирішують ці проблеми, а сприяють їм, особливо натрій і стронційвмісні модифікатори. Такі технологічні проблеми модифікування силумінів можна вирішити методом спадкового модифікування, використовуючи в якості шихтових матеріалів сілумінові виливки з високодисперсною мікроструктурою, які отримані литтям в кристалізатор з високою інтенсивністю охолодження.

Фізичне модифікування та обробка розплаву

Уданий час термін «модифікування» використовується в більш широкому аспекті. Тому до цього терміну відносять не тільки введення спеціальних добавок, але й фізичні методи впливу на розплав, що призводять до зміни процесу твердіння, формування структури і властивостей литого металу. Вони змінюють енергетичний стан системи (сплаву) без зміни хімічного складу [28].

Виділення Al₃Fe фази від рідкої було досягнуто фільтруванням [43, 44]. Очищення алюмінію від заліза фільтруванням й іншими способами є трудомісткою і дорогою процедурою [12]. При використанні вторинної сировини лише однократне оброблення (рафінування) не дозволяє досягти якості сплавів на рівні первинних [45].

Метою роботи [12] було вивчення дії слабкого постійного магнітного поля на залізовмісні фази сплаву системи Al–Fe–Si. Включення β (AlFeSi)-фази під впливом поля змінили форму з голчастої на компактну і подовжену, їх довжина зменшилася більш ніж в 4 рази. Також виявлено, що відбулося зменшення довжини включень FeAl₃. Магнітна обробка при індукції магнітного поля $B=0,50$ Тл сприяла формуванню дисперсних включень α (AlFeSi)-фази замість FeAl₃- і β (AlFeSi)-фаз.

Оброблення рідкого сплаву АК5М2 імпульсним електричним струмом у діапазоні частот від 500 до 6000 Гц при зміні щільності від 5 до 35 А/см² пригнічує фазові перетворення, внаслідок яких утворюється голкоподібна фаза β (AlFeSi) – концентратор напруги, а термодинамічно стабільною стає розгалужена фаза α -Al₈Fe₂Si [28, 46].

З аналізу [47] випливає позитивний вплив ультразвукової обробки. У результаті після застосування такої обробки залізовмісні фази в сплаві Al–6Si–4Fe мали форму майже кулясту, тоді як ці фази в сплавах Al–12Si–4Fe і Al–18Si–4Fe були у вигляді дрібних коротких циліндрів.

У результаті досліджень [43] застосування технології газодинамічного впливу та модифікування карбонітридом титану (TiCN) на властивості виливків зі сплаву АК5М вдалося подрібнити і сфероїдизувати залізовмісні фази, а також підвищити рівень механічних властивостей, скоротивши при цьому кількість браку виливків по рихлості й газовим раковинам. Також у цій роботі зазначалось, що після виморожування фази Al₃Fe її можна відокремити від сплаву одним з двох способів. Перший спосіб заключається у відстоюванні алюмінієвого сплаву протягом декількох годин. У результаті залізнi складові концентруються в нижній частині ванни і частково по стінках тигля. Але цим методом не можна в достатній мірі знизити вміст заліза. Інший спосіб – спрямована кристалізація, тобто штучне охолодження дна тигля. У цьому випадку залізовмісні фази виділяються тільки знизу. Але продуктивність цього процесу дуже низька.

Безсумнівно, успішними можна назвати результати роботи [48], де за рахунок роторної теплосилової обробки розплаву в інтервалі кристалізації були подрібнені і компактизовані залізовмісні фази в сплаві АК7, що містить 6 % Fe.

Також є позитивним результат, описаний в роботі [21]. При застосуванні рідкофаз-

ної електрогідрипульсної обробки утворені в результаті обробки дрібнодисперсні і компактні залізисті фази не тільки мають менш шкідливий вплив на силуміни, але й набувають властивостей зміцнюючих фаз, що дає можливість отримувати із забрудненої залізом сировини сплави з необхідним і підвищеним комплексом механічних властивостей.

Як правило, термообробка не впливає на морфологію залізистих фаз. Виняток складає фаза $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ [49], що може фрагментуватися при нагріванні до температури понад 500 °С. Мідь і магній, володіючи змінною розчинністю в алюмінії, сприяють зміцненню силумінів при термічній обробці, яка складається з гартування і штучного старіння. У роботі показано [50], що $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ фаза у сплаві системи Al–Si–Fe, підданому вторинній переробці, перетворюється на фазу $\omega\text{-Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ в присутності міді до 6 % мас. при сфероїдизувальному відпалі $T=793$ К.

Іншим способом зміни морфології залізистих фаз є твердіння в умовах швидкісного охолодження [21], коли аморфні добавки при великих швидкостях охолодження мають схильність до утворення аморфних структур. На початковому етапі роботи [14] досліджувалася морфологія залізистих фаз, зокрема фази Al_3Fe , яка одержується при литті з різними швидкостями охолодження з різною кристалізацією: в графітовій і металевій виливницях. При швидкостях порядку $10^3\text{--}10^5$ К/с виділення включень залізистих фаз може повністю пригнічуватися. Також в роботі [13] відмітили позитивний вплив швидкісного охолодження (змінюється форма виділення залізистих фаз з грубої голчастою на більш рівноважну).

Висновок

- Кількість домішок, особливо заліза, є одним з важливих факторів, який впливає на якість силумінів та відповідність їх механічних властивостей поставленим вимогам. Вторинні ливарні сплави зазвичай виготовляють з брухту і вони можуть мати більш низький у порівнянні з первинними сплавами рівень механічних та експлуатаційних властивостей, що пов'язано з вмістом у сплаві домішок. Для силумінів однією з найбільш шкідливих домішок є залізо, яке здатне утворювати шкідливі фази несприятливої морфології.

- У статті виконано огляд сучасних способів, які могли б досить ефективно змінювати морфологію залізистих фаз та уникнути їх шкідливого впливу на властивості силумінів. Розвиток та подальше вивчення описаних методів та напрямків може мати вагомий результат для сучасної промисловості, адже із кожним рециклінгом забруднення сплавів залізом лише зростає.

- Легування і модифікування силумінів може здійснюватися широкою низкою недефіцитних елементів, які окрім зміни морфології шкідливих фаз здатні також утворювати із залізом зміцнюючі фази. Застосування фізичного модифікування та обробки розплаву також може забезпечувати такі ефекти і додатково здійснювати певну рафінуючу функцію.

Список літератури

1. Лютова О. В. Влияние железа на структуру и механические свойства сплава АК9М2 / О. В. Лютова // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. – 2013. – Вып. 67. – С. 355–360.
2. Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
3. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов [Текст] / Пер. с англ. под ред. Ф. И. Квасова и др. – М.: Металлургия, 1979. – 639 с.
4. Гаврилюк К. В., Гаврилюк В. П., Бондаревский В. Н. Прогрессивные методы влияния на структурообразование заэвтектических силуминов // Литье. Металлургия. – 2014. – С. 40–42.
5. Фомин Б. А., Москвитин В. И., Махов С. В. Металлургия вторичного алюминия. – М.: «ЭКО-МЕТ», 2004. – 224 с.
6. Худяков И. Ф., Дорошкевич А. П., Кляйн С. Э. и др. Технология вторичных цветных металлов: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.
7. Волчок И. П. Применение вторичных алюминиевых сплавов в транспортном машиностро-

- ени / И. П. Волчок, О. В. Лютова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 14. – С. 225–228
8. Лютова О. Підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів / О. Лютова, О. Мітяєв, І. Волчок // Машинознавство. – 2007. – № 8 (122). – С. 32–35.
 9. Das S. K. Designing Aluminum Alloys for a Recycling Friendly World // Materials Science Forum. – 2006. – Vol. 519–521. – pp. 1239–1244.
 10. Горбачева В. И., Терентьева А. В., Турчанин М. А., Древаль Л. А. Исследование влияния содержания железа на образование железосодержащих фаз в литейных алюминиевых сплавах // Литье и металлургия. – 2013. – № 4 (73). – С. 74–81.
 11. Белов Н. А. Модифицирование железистых фаз в силумине типа АК5М2 добавками переходных металлов / Н. А. Белов, Ю. В. Евсеев, В. С. Золоторевский // Цветные металлы. – 1988. – № 1. – С. 68–70.
 12. Дубоделов В. И., Середенко В. А., Середенко Е. В., Косинская А. В., Набока Е. А. Воздействие слабого постоянного магнитного поля на литую структуру сплава алюминия с железом и кремнием // Процессы литья. – 2013. – № 2 (98). – С. 40–49.
 13. Чевеикин В. В., Хван А. В., Золоторевский В. С. Изменение морфологии железосодержащих фаз в алюминиевых сплавах // Вестник ТГТУ. – 2012. – № 3.
 14. Калиниченко А. С., Немененок Б. М., Калиниченко В. А. Снижение негативного влияния повышенного содержания железа в алюминиевых сплавах // Литейное производство. – 2004. – № 3. – С. 21–22.
 15. Mahta M., Emamy M., Cao X., Campbell J. Overview of β -Al-FeSi phase in Al-Si alloys // Materials Science Research Trends. – 2008. – Ch. 5. – pp. 251–271.
 16. Белов Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2010. – 511 с.
 17. Цветные металлы и сплавы: учебное пособие / Т. В. Мальцева, Н. Н. Озерец, А. В. Левина, Е. А. Ишина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 176 с.
 18. Шевелев А. И., Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Сынков С. Г., Рябичева Л. А., Решетов А. В. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминийсодержащих отходов: монография. – Донецк: Ноулидж, Донец. отд-ние, 2010. – 270 с.
 19. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов [Текст] / Б. М. Немененок. – М.: Технопринт, 1999. – 272 с.
 20. Barbin N. M., Brodova I. G., Yablonskikh T. I., Vatolin N. A. Alloying and modification of molten silumin in salt melt // Journal of Physics Conference Series. – 2008. – pp.1–7.
 21. Синчук А. В., Цуркин В. Н., Федченко Н. А. Снижение негативного влияния Fe-содержащих интерметаллидов на силумины путем электрогидроимпульсной обработки расплава // Процессы литья. – 2011. – № 2. – С. 39–44.
 22. Serák J., Vojtkéč D. Influence of (AlSiFeMnCr) intermetallic phases on the casting properties of AlSi9Cu2FeMnCr alloys // Aluminium. – 2008. – № 78. – pp. 384–387.
 23. Ворон М. М. Застосування молибденовмісних лігатур для підвищення якості вторинних силумінів / М. М. Ворон, Т. В. Лапшук, Є. О. Дрозд, В. В. Холяков // Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства. – 2016. – № 25. – С. 157–162.
 24. Пат. 57584А Україна, МКИ С22С1/06. Модификатор для алюмінієвих сплавів / И. П. Волчок, А. А. Митяев (Украина). – № 2002108343; Заявл. 22.10.2002. Опубл. 16.06.2003. Бюл. № 6.
 25. Voron M. M., Matviets Ye. O., Antonevitch Ya. K., Kushnir K. S. Vanadium edition influence on the structural and phase parameters of Al-Si-Cu Alloys // Процеси лиття. – 2019. – № 6 (138). – С. 53–59.
 26. Denisa Závodská, Tillová Eva, Švecová Ivana, Chalupov Mária, Kuchariková Lenka, Belan Juraj. The Effect of Iron Content on Microstructure and Porosity of Secondary AlSi7Mg0.3 Cast Alloy // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2019. – № 47(4). – pp. 283–289.
 27. Белов Н.А., Алабин А.Н., Санников А.В., Деев В.Б. Первичная кристаллизация интерметаллидов в системе Al-Fe-Mn-Ni-Si применительно к литейным сплавам на основе алюминиево-никелевой эвтектике // Металловедение и термическая обработка. – 2014. – № 3. – С. 45–50.
 28. Дядюра А. С. Структуроутворення і механічні властивості сплаву АК5М2, обробленого у рідкому стані імпульсним електричним струмом: магістерська робота. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 88 с.
 29. Raghavan V. Phase Diagram Evaluations Al-Co-Fe (Aluminum-Cobalt-Iron) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria. – 2002. – Vol. 23.– №. 5. – pp. 434–436.
 30. Samuel A. M., Samuel F. H., Villeneuve C., Doty H. W., Valtierra S. Effect of trace elements on β -Al₅FeSi characteristics, porosity and tensile properties of Al-Si-Cu (319) cast alloys // International Journal of Cast Metals Research. – 2016. – Vol. 14. – issue 2. – pp. 97–120.
 31. Чернега Д. Ф., Сороченко В. Ф., Кудь П. Д. Влияние модифицирования скандийсодержа-

- щими соединениями на свойства и коррозионную стойкость вторичных алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2000. – № 2. – С. 17–21.
32. *Morozova A., Mogucheva A., Bukin D., Lukianova O., Korotkova N., Belov N., Kaibyshev R.* Effect of Si and Zr on the microstructure and properties of Al-Fe-Si- Zr alloys // *Metals*. – 2017. – № 7 (495). – pp. 1–12.
33. *Неменюк Б. М., Галушко А. М., Довнар Г. В., Задрецкий С. П., Баешко И. К.* Влияние серы на структуру и свойства алюминиевых сплавов // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 4(38). – С. 106–108.
34. *Каличенко В. А., Немененко Б. М., Довнар Г. В.* Использование алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа // *Литье и металлургия*. – 2007. – № 2 (42). – С. 159–163.
35. *Saleh A. Alkahtani, Emad M. Elgallad, Mahmoud M. Tash, Agnes M. Samuel, Fawzy H. Samuel.* Effect of Rare Earth Metals on the Microstructure of Al-Si Based Alloys // *Materials*. – 2016. – № 9 (45). – pp. 1–13.
36. *Samuel A. M., Elgallad E. M., Mahmoud M. G., Doty H. W., Valtierra S., Samuel F. H.* Rare earth metal-based intermetallics formation in Al-Cu-Mg and Al-Si-Cu-Mg Alloys // *Metallurgical Study Advances in Materials Science and Engineering*. – 2018. – 15 p.
37. *Farahany S., Idris M. H., Ourdjini A.* Effect of bismuth and strontium interaction on the microstructure development, mechanical properties and fractography of a secondary Al-Si-Scanning 13 Cu-Fe-Zn alloy // *Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 621. – pp. 28–38.
38. *Tang P., Li W., Zhao Y., Wang K., Li W., Zhan F.* Influence of strontium and lanthanum simultaneous addition on microstructure and mechanical properties of the secondary Al-Si-Cu-Fe alloy // *Journal of Rare Earths*. – 2017. – Vol. 35. – no. 5. – pp. 485–493.
39. *Kang Wang, Peng Tang, Yi Huang, Yanjun Zhao, Wenfang Li, Jun Tian.* Characterization of microstructures and tensile properties of recycled Al-Si-Cu-Fe-Mn alloys with individual and combined addition of titanium and cerium // *Scanning*. – Vol. 2018. – 14 p.
40. *Song X., Yan H., Zhang X.* Microstructure and mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloy formed with an addition of (Pr+Ce) // *Journal of Rare Earths*. – 2017. – vol. 35. – no. 4. – pp. 412–418.
41. *Zhenghua Li, Hong Yan.* Modification of primary α -Al, eutectic silicon and β -Al₅FeSi phases in as-cast AlSi10Cu3 alloys with (La+Yb) addition // *Journal of Rare Earths*. – 2015. – Vol. 33. – Issue 9. – pp. 995–1003.
42. *Марукович Е. И.* Технологические проблемы модифицирования структуры отливок из силуминов. Пути решения / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 2. – С. 19–22.
43. *Доценко Ю. В., Селиверстов В. Ю., Доценко В. П.* Снижение влияние железа на свойства алюминиевых сплавов модифицированием и газодинамическим воздействием при затвердевании в кокиле // *Научный Вестник ДГМА*. – 2010. – № 1 (6Е). – С. 68–73.
44. *Худяков И. Ф., Дорошкевич А. П., Кляйн С. Э. и др.* Технология вторичных цветных металлов: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.
45. *Мітяєв О. А.* Підвищення якості алюмінієвих сплавів методами рафінування та модифікування / О. А. Мітяєв, О. Л. Скуйбеда // *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 195–197.
46. *Петров С. С., Пригунов С. В., Пригунова А. Г., Ключник Д. Н.* Структурные и фазовые превращения в силуминах под воздействием жидкофазной обработки электрическим током // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2008. – Т. 30. – № 8. – С. 1129–1137.
47. *Osava Yoshiaki, Takamory Susumu, Kimura Takashi.* Control of solidified structure of Al-Si-Fe alloy intermetallic compounds by ultrasonic vibration // *Journal of Japan Foundry Engineering Society*. – 2006. – Vol. 78. – № 2. – pp. 65–70.
48. *Головаченко В. П., Борисов Г. П., Хвостенко И. В., Вернидуб А. Г.* Влияние температуры и роторной обработки на горячеломкость высокопрочного алюминиевого сплава ВАЛ 10. // *Процессы литья*. – 2014. – № 3 (105). – С. 65–69.
49. *Скуйбеда Е. Л.* Особенности изменения морфологии железистых интерметаллидов в структуре вторичных силуминов под воздействием термической обработки // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 4(73). – С. 42.
50. *Basak C. B., Hari Babu N.* Influence of Cu on modifying the beta phase and enhancing the mechanical properties of recycled Al-Si-Fe cast alloys // *Scientific Reports*. – 2017. – № 7 (5779). – pp. 1–10.

Поступила 20.12.2019

References

1. *Lyutova, O. V.* (2013) Influence of iron on the structure and mechanical properties of the AK9M2 alloy. Building. Materials Science. Engineering. Series: Starodubov readings, no. 67, pp. 355-360 [in Russian].
2. *Stroganov, G. B., Rotenberg, V. A., Gershman, G. B.* (1977) Alloys of aluminum with silicon. Moscow: Metallurgy, 272 p. [in Russian].
3. *Mondolfo, L.F.* (1979) The structure and properties of aluminum alloys [Trans. from English under the editorship of F.I. Kvasova]. Moscow: Metallurgy, 639 p. [in Russian].
4. *Gavrilyuk, K. V., Gavrilyuk, V. P., Bondarevsky, V. N.* (2014) Progressive methods of influence on the structure formation of hypereutectic silumins. Casting. Metallurgy, pp. 40-42 [in Russian].
5. *Fomin, B. A., Moskvitin, V. I., Makhov, S. V.* (2004) Metallurgy of secondary aluminum. Moscow: ECOMET, 224 p. [in Russian].
6. *Khudyakov, I. F., Doroshkevich, A. P., Klein, S. E.* (1981) Technology of secondary non-ferrous metals: Textbook for universities. Moscow: Metallurgy, 280 p. [in Russian].
7. *Volchok, I. P.* (2007) Application of secondary aluminum alloys in transport engineering. Visnuk of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, no. 14, pp. 225-228 [in Russian].
8. *Lyutova, O.* (2007) Improving the quality of secondary aluminum alloys. Mechanical Engineering, no. 8 (122), pp. 32-35. [in Ukrainian].
9. *Das, S. K.* (2006) Designing aluminum alloys for a recycling friendly world. Materials Science Forum, Vol. 519-521, pp. 1239-1244 [in English].
10. *Gorbacheva, V. I., Terentyeva, A. V., Turchanin, M. A., Dreval, L. A.* (2013) Investigation of the effect of iron content on the formation of iron-containing phases in cast aluminum alloys. Casting and Metallurgy, no. 4 (73), pp. 74-81 [in Russian].
11. *Belov, N. A.* (1988) Modification of glandular phases in silumin type AK5M2 with the addition of transition metals. Non-ferrous metals, no. 1, pp. 68-70 [in Russian].
12. *Dubodelov, V. I., Seredenko, V. A., Seredenko, E. V., Kosinskaya, A. V., Naboka, E. A.* (2013) The effect of a weak constant magnetic field on the cast structure of an alloy of aluminum with iron and silicon. Casting processes, no. 2 (98), pp. 40-49 [in Russian].
13. *Cheverikin, V. V., Hwan, A. V., Zolotarevsky, V. S.* (2012) Change in the morphology of iron-containing phases in aluminum alloys. Visnuk of TSTU, Vol. 18, no. 3, pp. 742-747 [in Russian].
14. *Kalinichenko, A. S., Nemenenok, B. M., Kalinichenko, V. A.* (2004) Reduction of the negative effect of high iron content in aluminum alloys. Liteinoe proizvodstvo, no. 3, pp. 21-22 [in Russian].
15. *Mahta, M., Emamy, M., Cao, X., Campbell, J.* (2008) Overview of β -Al₅FeSi phase in Al-Si alloys. Materials Science Research Trends, ch. 5, pp. 251-271 [in English].
16. *Belov, N. A.* (2010) Phase composition of industrial and promising aluminum alloys. Moscow: MISiS, 511 p. [in Russian].
17. *Maltseva, T. V., Ozerets, N. N., Levina, A. V., Ishina, E. A.* (2019) Non-ferrous metals and alloys: a training manual. Yekaterinburg: Publishing House Ural. University, 176 p. [in Russian].
18. *Shevelev, A. I., Beigelsimer, Y. E., Varyukhin, V. N., Synkov, S. G., Ryabicheva, L. A., Reshetov, A. V.* (2010) Deformation processing of secondary aluminum and aluminum-containing waste: monograph. Donetsk: Knowledge, Donetsk. Department, 270 p. [in Russian].
19. *Nemenenok, B. M.* (1999) Theory and practice of complex modification of silumins. Moscow: Technoprint, 272 p. [in Russian].
20. *Barbin, N. M., Brodova, I. G., Yablonskikh, T. I., Vatolin, N. A.* (2008) Alloying and modification of molten silumin in salt melt. Journal of Physics Conference Series, pp. 1-7 [in English].
21. *Sinchuk, A. V., Tsurkin, V. N., Fedchenko, N. A.* (2011) Reducing the negative impact of Fe-containing intermetallic compounds on silumins by electrohydropulse treatment of the melt. Casting processes, no. 2, pp. 39-44 [in Russian].
22. *Serák, J., & Vojtkéč, D.* (2002). Influence of (AlSiFeMnCr) intermetallic phases on the casting properties of AlSi9Cu2FeMnCr alloys. Aluminium, no. 78, pp. 384-387 [in English].
23. *Voron, M. M.* (2016) Application of molybdenum-containing ligatures to improve the quality of secondary silumin. Modern problems of physical material science, no. 25, pp. 157-162 [in Ukrainian].
24. Patent 57584A Ukraine, MKI C22C1 / 06. Modifier for aluminum alloys / I.P. Volchok, A.A. Mityaev (Ukraine), no. 2002108343; Claim 10/22/2002. Publ. 06/16/2003. Bull. Number 6. [in Russian].
25. *Voron, M. M., Matviets, Ye. O., Antonevitch, Ya. K., Kushnir, K. S.* (2019) Vanadium edition influence on the structural and phase parameters of Al-Si-Cu Alloys. Casting processes, no. 6 (138), pp. 53-59 [in English].

26. *Závodská Denisa, Tillová Eva, Švecová Ivana, Chalupová Mária, Kuchariková Lenka, Belan Juraj* (2019) The effect of iron content on microstructure and porosity of secondary AlSi7Mg0.3 Cast Alloy. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, no. 47(4), pp. 283-289 [in English].
27. *Belov, N. A., Alabin, A. N., Sannikov, A. V., Deev, V. B.* (2014) Primary crystallization of intermetallic compounds in the Al-Fe-Mn-Ni-Si system as applied to casting alloys based on aluminumnickel eutectic. *Metallurgy and heat treatment*, no. 3, pp. 45-50 [in Russian].
28. *Dyadura, A.S.* (2017) Structural formation and mechanical properties of AK5M2 alloy treated in liquid state by pulse electric current [Master's thesis]. Kyiv: KPI them. Igor Sikorsky, 88 p. [in Ukrainian].
29. *Raghavan, V.* (2002) Phase Diagram Evaluations Al-Co-Fe (Aluminum-Cobalt-Iron). *Journal of Phase Equilibria*, Vol. 23, No. 5, pp. 434-436 [in English].
30. *Samuel, A. M., Samuel, F. H., Villeneuve, C., Doty, H. W., Valtierra, S.* (2016) Effect of trace elements of β -Al₅FeSi characteristics, porosity and tensile properties of Al-Si-Cu (319) cast alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 14, Issue 2, pp. 97-120 [in English].
31. *Cherneg, D. F., Sorochenko, V. F., Kud, P. D.* (2000) The effect of modification of scandium containing compounds on the properties and corrosion resistance of secondary aluminum alloys. *Casting processes*, no. 2, pp.17-21 [in Russian].
32. *Morozova, A., Mogucheva, A., Bukin, D., Lukianova, O., Korotkova, N, Belov, N., Kaibyshev, R.* (2017) Effect of Si and Zr on the microstructure and properties of Al-Fe-Si-Zr alloys. *Metals*, no. 7 (495), pp.1-12 [in English].
33. *Nemenyuk, B. M., Galushko, A. M., Dovnar, G. V., Zadrutsky, S. P., Baeshko, I. K.* (2005) Effect of sulfur on the structure and properties of aluminum alloys. *Casting and metallurgy*, no. 4 (38), pp. 106-108 [in Russian].
34. *Kalichenko, B. A., Nemenenok, B. M., Dovnar, G.V.* (2007) Use of aluminum alloys with high iron content. *Casting and Metallurgy*, no. 2 (42), pp.159-163 [in Russian].
35. *Saleh A. Alkahtani, Emad M. Elgallad, Mahmoud M. Tash, Agnes M. Samuel, Fawzy H. Samuel.* (2016) Effect of Rare Earth Metals on the Microstructure of Al-Si Based Alloys. *Materials*, no. 9 (45), pp. 1-13 [in English].
36. *Samuel, A. M., Elgallad, E. M., Mahmoud, M. G., Doty, H. W., Valtierra, S., Samue, F. H.* (2018) Rare earth metal-based intermetallics formation in Al-Cu-Mg and Al-Si-Cu-Mg alloys. *Metallographic study advances in materials science and engineering*, 15 p. [in English].
37. *Farahany, S., Idris, M. H., Ourdjini, A.* (2015) Effect of bismuth and strontium interaction on the microstructure development, mechanical properties and fractography of a secondary Al-Si-Scanning 13 Cu-Fe-Zn alloy. *Materials Science and Engineering*, vol. 621, pp. 28-38 [in English].
38. *Tang, P., Li, W., Zhao, Y., Wang, K., Li, W., Zhan, F.* (2017) Influence of strontium and lanthanum simultaneous addition on microstructure and mechanical properties of the secondary Al-Si-Cu-Fe alloy. *Journal of Rare Earths*, vol. 35, no. 5, pp. 485-493. [in English].
39. *Kang Wang, Peng Tang, Yi Huang, Yanjun Zhao, Wenfang Li, Jun Tian.* (2018) Characterization of microstructures and tensile properties of recycled Al-Si-Cu-Fe-Mn alloys with individual and combined addition of titanium and cerium. *Scanning*, Vol. 2018, 14 p. [in English].
40. *Song, X., Yan, H., Zhang, X.* (2017) Microstructure and mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloy formed with an addition of (Pr+Ce). *Journal of Rare Earths*, vol. 35, no. 4, pp. 412-418 [in English].
41. *Zhenghua li, HongYan* (2015) Modification of primary α -Al, eutectic silicon and β -Al₅FeSi phases in as-cast AlSi₁₀Cu₃ alloys with (La+Yb) addition. *Journal of Rare Earths*, vol. 33, issue 9, pp. 995-1003 [in English].
42. *Marukovich, E. I.* (2019) Technological problems of modifying the structure of castings from silumins. *Ways of solution*. *Casting and metallurgy*, no. 2, pp. 19-22 [in Russian].
43. *Dotsenko, Yu. V., Seliverstov, V. Yu., Dotsenko, V. P.* (2010) Reducing the effect of iron on the properties of aluminum alloys by modification and gas-dynamic effects during solidification in a chill mold. *Scientific Vesnik DGMA*, no. 1(6E), pp. 68-73 [in Russian].
44. *Khudyakov, I. F., Doroshkevich, A. P., Klein, S. E.* (1981) *Technology of secondary non-ferrous metals: Textbook for universities*. Moscow: Metallurgy, 280 p. [in Russian].
45. *Mityaev, O. A.* (2009) Improving the quality of aluminum alloys by refining and modification methods. *Vesnik of Dnipropetrovsk. nat. un-that of iron. trans. them. Acad. V. Lazaryan*, no. 29, pp. 195-197 [in Ukrainian].
46. *Petrov, S. S., Prigunov, S. V., Prigunova, A. G., Klyuchnik, D. N.* (2008) Structural and phase transformations in silumin under the influence of liquid-phase electric current treatment. *Metallophysics and latest technologies*, no. 8, pp. 1129-1137 [in Russian].
47. *Osava Yoshiaki, Takamory Susumu, Kimura Takashi* (2006) Control of solidified structure of

- Al-Si-Fe alloy intermetallic compounds by ultrasonic vibration. Journal of Japan Foundry Engineering Society, vol. 78, no. 2, pp. 65-70 [in English].
48. Golovachenko, V. P., Borisov, G. P., Khvostenko, I. V., Vernidub, A. G. (2014) Effect of temperature and rotary machining on the heat resistance of high-strength aluminum alloy VAL 10. Casting processes, no. 3 (105), pp. 65-69 [in Russian].
49. Skuybeda, E. L. (2013) Features of changes in the morphology of glandular intermetallic compounds in the structure of secondary silumins under the influence of heat treatment. Casting and metallurgy, no. 4 (73), pp. 42 [in Russian].
50. Basak, C. B., Hari Babu, N. (2017) Influence of Cu on modifying the beta phase and enhancing the mechanical properties of recycled Al-Si-Fe cast alloys. Scientific Reports, no. 7(5779), pp. 1-10 [in English].

Received 20.12.2019

М. А. Фон Прусс, аспірант, e-mail: m.fonpruss@gmail.com

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

СПОСОБЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ФАЗ В СИЛУМИНАХ

Алюминиевые сплавы остаются одними из самых применяемых материалов современности. Важным технологическим преимуществом этого вида материалов является простота и целесообразность их рециклинга и повторного использования. Однако, именно во время переработки алюминиевых сплавов они насыщаются примесями, которые вредно влияют на структурно-фазовые характеристики и механические свойства литых изделий. Особенно вредной примесью можно считать железо, содержание которого увеличивается с каждым циклом переработки. В определенной концентрации (~ 1 %мас.) железо можно считать полезным из-за уменьшения пригара в стальных пресс-формах во время литья под давлением. В других случаях роль железа отрицательна. Из-за своей нулевой растворимости почти все железо в алюминии образует интерметаллидные фазы различного состава (Al_3Fe , Al_5Fe_2 , Al_8Fe_2Si , Al_5FeSi , Al_4FeSi_2 , Al_3FeSi и др.), которые невозможно удалить из расплава. Железосодержащие фазы имеют в основном неблагоприятную морфологию, особенно в сплавах, содержащих кремний, и являются причиной понижения механических и технологических свойств. Снижение содержания железа в силуминах возможно лишь благодаря разбавлению расплава чистыми компонентами, но наиболее целесообразным решением уменьшения его негативного воздействия является модифицирование. В работе рассмотрен ряд модификаторов и технологий обработки алюминиевых расплавов. Были проанализированы особенности влияния добавления Mn, Ni, Cr, Co, V, La и других элементов в силумины различного состава, а также влияние некоторых технологий физического модифицирования и обработки алюминиевых расплавов. В статье проводится анализ проблемных вопросов, связанных с эффективностью действия различных модификаторов и способов модифицирования для нейтрализации негативного влияния железа на свойства силуминов посредством изменения морфологии железосодержащих фаз и повышение свойств сплавов.

Ключевые слова: Al-Si-Fe, Al-Si-Cu-Fe, железо в алюминиевых сплавах, модифицирование, физическое модифицирование расплава.

М. А. Fon Pruss, Postgraduate Student, e-mail: m.fonpruss@gmail.com

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

TECHNIQUES AND METHODS OF CHANGING MORPHOLOGY OF IRON-CONTAINING PHASES IN SILUMINES

Aluminum alloys remain one of the most used materials at present. An important technological advantage of this materials is the simplicity and feasibility of their recycling and reuse. However, during the processing of aluminum alloys they are saturated with impurities that adversely affect the

Кристалізація та структуроутворення сплавів

structural-phase characteristics and mechanical properties of cast products. Iron is a particularly harmful impurity. Iron content increases with each processing cycle. At a certain concentration (~ 1% wt.), iron can be useful due to the reduction of burnout in steel molds during die casting injection molding. In other cases, the role of iron is negative. Due to its zero solubility, almost all the iron in aluminum forms intermetallic phases of various compositions (Al_3Fe , Al_5Fe_2 , Al_8Fe_2Si , Al_5FeSi , Al_4FeSi_2 , Al_3FeSi etc.), which cannot be removed from the melt. The iron-containing phases have a generally unfavorable morphology, especially in alloys containing silicon. They are the cause of mechanical and technological properties decrease. Lowering iron content in Al-alloys is possible only due to dilution of the melt with pure components, but modification is the most appropriate solution to reduce its negative impact. This paper considers and overviews a number of modifiers and processing technologies for aluminum melts. The features of Mn, Ni, Cr, Co, V, La, and other elements addition effects in Al-Si alloys of various compositions were analyzed, as well as the influence of some technologies for the physical modification and processing of aluminum melts. The article analyzes the problematic issues associated with the effectiveness of various modifiers and modifying methods to neutralize the negative effect of iron on the properties of Al-Si alloys by changing the morphology of iron-containing phases and improving the properties of alloys.

Keywords: Al-Si-Fe, Al-Si-Cu-Fe, iron in aluminum alloys, modification, physical modification of the melt.

До уваги авторів!

Статті, що надходять до редакції, повинні мати анотації і ключові слова на українській, російській і англійській мовах. Об'єм статті - не більше 12 стор., малюнків - не більше 5.

Статті подаються як на паперовому, так і електронному носіях. Для текстових матеріалів бажано використати формат doc. Для графічних матеріалів - формат jpeg. Графічні матеріали необхідно зберігати в окремих файлах. Фотографії, малюнки, графіки і креслення мають бути чорно-білими, чіткими і контрастними.