

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Запорізький національний технічний університет

ЛЮТОВА ОЛЬГА ВАЛЕРІЇВНА



УДК : 544.537:669.715

ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА
МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОВТЕКТИЧНИХ
ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ

05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Волчок Іван Петрович, Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри технології металів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Калініна Наталія Євграфівна, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, професор кафедри технології виробництва;

доктор технічних наук, професор Червоний Іван Федорович, Запорізька державна інженерна академія, завідувач кафедри металургії кольорових металів.

Захист відбудеться « 29 » травня 2012 року о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Запорізького національного технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

Автореферат розісланий « 19 » квітня 2012 р.

В.о. ученого секретаря
спеціалізованої вченої ради



Ю.М. Внуков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Алюміній, який отримав колись назву «срібло з глини», на сьогодні є одним з найважливіших технічних матеріалів, а також одним з найбільш поширених в земній корі елементів (7,5 %). Споживання алюмінію і його сплавів у світі на сьогодні складає приблизно 20 млн. т на рік і посідає друге місце після заліза. Такий попит обумовлений його фізико-механічними, хімічними і службовими властивостями. Він легкий, маса алюмінієвої деталі втричі легше сталевій деталі таких же розмірів. За питомою міцністю алюмінієві сплави не поступаються ряду вуглецевих і легированих сталей. Вони мають високу корозійну стійкість на повітрі, а також у середовищі багатьох рідин і газів, високу пружність і не окрихчуються при низьких температурах. Алюміній добре проводить електричний струм і тепло, за цими показниками його перевершує тільки мідь.

Виробництво первинного алюмінію є високоенергозатратним і екологічно шкідливим. Єдиний в Україні виробник первинного алюмінію – Запорізький алюмінієвий комбінат фактично припинив свою роботу. Виробництво вторинного алюмінію і його сплавів, в силу менших енергетичних витрат і викидів у навколишнє середовище, має тенденцію до зростання. До 2030 року, згідно з прогнозами, випуск вторинного алюмінію у світі може досягти 22...24 млн. т на рік. Головними недоліками вторинних алюмінієвих сплавів є низькі технологічні і механічні властивості, внаслідок забруднення вихідної шихти залізом, маслами, пластмасами та іншими шкідливими домішками.

Серед ливарних алюмінієвих сплавів найбільше поширення знайшли силуміни, що характеризуються сприятливим поєднанням механічних і ливарних властивостей. Властивості силумінів, значною мірою, визначаються якістю шихти і процесами металургійного переділу. Згідно з результатами досліджень О.А. Мітяєва, Н.Є. Калініної, В.З. Куцової та інших, ретельна підготовка і сортування шихтових матеріалів у поєднанні з рафінувально-модифікувальною обробкою рідкого металу дозволяють істотно підвищити механічні (міцність, пластичність, твердість, ударну в'язкість) і службові (витривалість, кавітаційну і корозійну стійкість) властивості силумінів практично до рівня первинних сплавів. На жаль, в цих, як і в більшості інших робіт, мало приділяється уваги технологічним властивостям, в першу чергу ливарним (рідинноплинності, тріщиностійкості, усадці тощо), а також зварюваності вторинних алюмінієвих сплавів. Усуненню цієї прогалини, в значній мірі, присвячена ця робота.

В умовах все зростаючого дефіциту первинної сировини підвищення технологічних і механічних властивостей вторинних силумінів в результаті вдосконалення процесів шихтовки, рафінування і модифікування розплаву є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні етапи роботи виконувались у відповідності з планами науково-дослідних робіт Запорізького національного технічного університету за темами: № М/75 – 2008 «Розробка промислових технологій, що забезпечують підвищення механічних,

технологічних та експлуатаційних властивостей вторинних силумінів до рівня первинних», 2008...2010 р., № держреєстрації 0108U003841; ДБ 01310 «Підвищення механічних і службових властивостей алюмінієвих сплавів лазерним обробленням», 2011, № держреєстрації 0110U001140.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – отримання оптимальної дисперсної структури, підвищення технологічних і механічних властивостей вторинних силумінів у результаті вдосконалення процесів шихтовки, рафінування і модифікування розплаву.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- вивчити вплив складу шихти, вмісту заліза в сплаві і рафінувально-модифікувальної обробки на процеси структуроутворення вторинних силумінів (литого металу і металу зварних з'єднань);

- із застосуванням методів математичного планування експериментів отримати регресійні і графічні залежності, що описують вплив вмісту стружки в шихті, заліза в сплаві та кількості модифікатора на макро- і мікроструктуру, рідинноплинність, тріщиностійкість, пористість, лінійну усадку, механічні властивості литого металу, а також на міцність, пластичність і твердість зварного з'єднання вторинних силумінів;

- вивчити вплив вмісту стружки в шихті, заліза в сплаві, рафінувально-модифікувальної обробки на схильність зварного з'єднання до утворення гарячих тріщин, дефектів шва і навколошовної зони;

- дослідити можливість підвищення технологічних і механічних властивостей вторинних силумінів у результаті вдосконалення рафінувально-модифікувальних процесів та керування процесами структуроутворення;

- виконати дослідно-промислове випробування технології рафінування і модифікування і видати рекомендації з виробництва вторинних силумінів з підвищеним рівнем технологічних і механічних властивостей.

Об'єкт дослідження – вторинні силуміни АК8МЗ і АК9М2, отримані зі 100 % вторинної сировини.

Предмет дослідження – процеси структуроутворення, технологічні і механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів.

Методи дослідження: оптична мікроскопія, визначення хімічного складу методом спектрального аналізу, застосування стандартних і спеціальних методів досліджень для визначення механічних і технологічних властивостей (рідинноплинності, лінійної усадки, тріщиностійкості, пористості литого металу, дефектів і тріщиностійкості зварного з'єднання); математична обробка експериментальних даних з використанням персонального комп'ютера, використання методів регресійної і кореляційної обробки експериментальних даних для отримання кореляційних залежностей властивостей вторинних силумінів від вмісту стружки в шихті, кількості заліза в сплаві і величини присадки модифікатора.

Наукова новизна роботи:

- отримані нові концентраційні залежності, що описують спільний вплив кількості стружки в шихті, вмісту заліза в сплаві і присадки модифікатора на ливарні, а також механічні властивості литого і зварного металу вторинного силуміну АК9М2. Ці залежності дозволили в результаті оптимізації процесів

шихтовки, рафінування, модифікування підвищити технологічні і механічні властивості сплаву. Встановлено, що висока швидкість охолодження і рафінувально-захисна функція аргону при аргоно-дуговому зварюванні забезпечили отримання дисперсної структури і більш високих значень границі міцності, відносного подовження і твердості зварного з'єднання в литому і термообробленому стані порівняно з властивостями литого металу;

- вперше встановлено екстремальний характер впливу кількості стружки на міцність і твердість силуміну, що пояснюється подвійною дією стружки: при вмісті стружки в шихті у кількості 6...10 % відбувається створення додаткових центрів кристалізації оксидами алюмінію, що призводить до подрібнення структурних складових, вміст стружки більше 10 % призводить до забруднення металу воднем, оксидними і інтерметалідними включеннями;

- встановлено екстремальний характер впливу заліза на границю міцності силуміну АК9М2. Це пояснюється тим, що при малій кількості залізовмісній інтерметалідній фазі перешкоджають руху дислокацій, а при більшій їх кількості, внаслідок низької міцності і схильності до розшарування, сприяють окрихченню сплаву;

- встановлено ідентичність зміни механічних властивостей литого і зварного металу в залежності від технологічних факторів плавки, що свідчить про високу спадковість алюмінієвих сплавів.

Практичне значення отриманих результатів:

- встановлено, що допустимі концентрації стружки в шихті і заліза у кремніймідистих силумінах, що забезпечують отримання задовільних ливарних властивостей, не повинні перевищувати відповідно 15 % і 1,5 % (для сплаву АК9М2 пористість при цьому відповідає 1 балу, рідинноплинність – 330 мм, лінійна усадка – 1,1 %);

- максимальні кількості стружки в шихті і заліза в сплаві, при яких забезпечується отримання механічних властивостей не нижче вимог ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) також складають відповідно 15 % і 1,5 %, за умови обробки рідкого металу рафінувально-модифікувальним комплексом (25...40 % Na_2CO_3 , 12...20 % SiC , 3...8 % Ti , решта – S) у кількості 0,12 %;

- встановлено, що подальше збільшення ливарних і механічних властивостей можливо в результаті двостадійної обробки рідкого металу розробленими флюсом (патент № 31862) в печі і модифікатором (патент № 32929) у розливному ковші;

- двостадійна обробка в печі та у розливному ковші дозволила отримати метал високої якості, використовуючи шихту, що на 100 % складається з вторинних матеріалів.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем проведені основні теоретичні та експериментальні дослідження. Автором сформульовані всі основні положення і висновки. У публікаціях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- наукове обґрунтування і визначення напрямку досліджень [1, 2, 8];
- постановка завдання і проведення досліджень [2, 3, 4];

- дослідження впливу металургійних факторів виробництва на якість вторинних силумінів [3];
- дослідження процесів структуроутворення металу зварного шва та інтерпретація впливу досліджуваних факторів на зварюваність вторинних силумінів [5];
- запропонування ідеї основних технічних рішень щодо підвищення технологічних і механічних властивостей вторинних силумінів [6, 7];
- обробка та узагальнення результатів досліджень [3, 5].

Апробація результатів роботи Основні матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на LXVI і 67-й міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта», Дніпропетровськ, 2006, 2007; VIII міжнародній конференції-виставці «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів», Львів, 2006; IX і X міжнародних молодіжних науково-практичних конференціях «Людина і космос», Дніпропетровськ, 2007, 2008; 8-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків, Львів, 2007; IV міжнародній конференції «Development trends in mechanization of foundry processes», Poland, Cracow – Szyse, 2007; II міжнародному науково-технічному симпозиумі «Наноструктурные функциональные покрытия и материалы для промышленности», Харків, 2007 і VIII міжнародної науково-технічної конференції «Вакуумные технологии и оборудование для получения наноматериалов», Харків, 2007; XI міжнародній науково-практичній конференції «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів», Запоріжжя, 2008; XII міжнародній науково-практичній конференції «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах», Запоріжжя, 2009; міжнародній науково-практичній конференції «Стародубовские чтения», Дніпропетровськ, 2008, 2011.

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано 6 статей у спеціалізованих наукових виданнях, отримано 2 патенти України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Загальний обсяг дисертації складається з 127 сторінок машинописного тексту, у тому числі 12 таблиць, 23 малюнків, 2 додатків на трьох сторінках, списку використаних джерел з 137 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано необхідність підвищення технологічних та механічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів та актуальність роботи, визначено об'єкт, предмет, мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** виконано аналіз методів підвищення технологічних та механічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів, враховуючи сучасний вітчизняний та закордонний досвід. У розглянутих дослідженнях увага приділяється загалом механічним властивостям, технологічні ж властивості відходять на другий план, хоча вони не менш важливі для алюмінієвих сплавів.

Серед ливарних алюмінієвих сплавів найбільше розповсюдження знайшли силуміни, що характеризуються сприятливим поєднанням механічних та технологічних властивостей. Основна маса, приблизно 90 %, виливків з ливарних алюмінієвих сплавів виробляється з силумінів. Вони були обрані в якості предмета вивчення в цій роботі, результати наукових досліджень щодо їх властивостей висвітлені у працях Л.Ф. Мондольфо, А.Г. Пригунової, Б.М. Неменьонка, Н.А. Белова, Н.А. Бочвара, А.В. Курдюмова, В.З. Куцовой, Н.Є. Калініної, О.А. Міт'яєва, Д.Ф. Чернегі та інших.

Згідно літературним даним, властивості силумінів, в значній мірі, визначаються якістю шихти та процесами металургійного переділу. Наявні в літературі дані про вплив якості шихти та процесів рафінування та модифікування на якість вторинних силумінів часто суперечливі та не систематизовані. У зв'язку з цим необхідні дослідження з комплексного вивчення впливу якості шихти та рафінувально-модифікувального оброблення на технологічні та механічні властивості вторинних силумінів.

Розширити галузь використання вторинних силумінів можна використовуючи різні способи зварювання. Наявні літературні дані висвітлюють питання зварюваності, загалом, первинних алюмінієвих сплавів, тому вивчення структури, механічних властивостей, а також зменшення дефектів зварного з'єднання з вторинних алюмінієвих сплавів є актуальною задачею.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір засобів та методів досліджень. У дослідних плавках в якості шихти використовували сплав АК9М2 в чушках, отриманий із 100 % вторинної сировини і стружку сплаву АК9М2 після прокалювання та брикетування на гідравлічному пресі. Плавку здійснювали під покривним флюсом (62 % NaCl, 13 % KCl, 25 % NaF). Після розплавлення і нагріву металу до 710 ± 5 °С в нього вводили порошок заліза і обробляли модифікатором складу, мас. %: 25...40 Na_2CO_3 , 12...20 SiC, 3...8 Ti, решта – S за патентом № 57584А. Подальші дослідження проводилися на зразках в литому стані, а також на термооброблених за режимом Т6 (гартування 515 ± 5 °С, час витримки 6 год.; старіння 200 ± 5 °С, час витримки 2 год.) відповідно до ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93).

Контроль хімічного складу вторинних алюмінієвих сплавів, аналіз макроструктури та мікроструктури, фрактографічний аналіз, визначення механічних властивостей були проведені із застосуванням стандартних методик.

Для дослідження рідинноплинності L була застосована стандартна пруткова проба Руффа (діаметр прутка – 5 мм). Вільну лінійну усадку визначали на базі 200 мм за формулою: $\epsilon_{\pi} = \frac{l_0 - l_1}{l_1} 100 \%$, де – l_0 довжина відбитка у формі, що дорівнює

200 мм, l_1 – довжина відлитої проби після охолодження, мм. Проба на тріщиностійкість мала форму двутавра, була отримана при заливці рідкого металу в кокіль, що складається з двох половинок, положення яких один щодо одного фіксувалося штифтами і зварною коробкою, в яку вони вставлялися. Тріщини утворювалися у тепловому вузлі проби – в місці з'єднання полки двутавра з його

стілкою. Бал пористості визначали порівнюючи з еталонами, наведеними у ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93).

Для зварювання зразків використаний аргоно-дуговий спосіб, присадка – сплав АК9М2 (той же склад, що й основний метал).

Механічні властивості визначали на стандартних плоских зразках з концентратором напружень.

Випробування на стійкість проти утворення гарячих тріщин проводилися за методикою «точковий шов», що імітує технологічний процес усунення дефектів лиття та зварного шва.

Для обробки експериментальних даних були використані методи математичної статистики.

У **третьому розділі** розглянуто вплив технологічних факторів виробництва на ливарні та механічні властивості вторинних силумінів та методи їх підвищення. Експериментальні плавки проводили відповідно до плану багатфакторного експерименту другого порядку 2^3 (табл. 1). В якості незалежних змінних були прийняті вміст стружки у шихті (С), вміст заліза у сплаві (Fe) і кількість модифікатора (М). Як функції відгуку були прийняті рідинноплинність L , лінійна усадка ϵ_L , довжина тріщини l , пористість Π , границя міцності σ_B , відносне подовження δ , твердість HRB у нетермообробленому стані (без ТО) і термообробленому стані (ТО).

Експериментальні сплави мали типову для доевтектичних сплавів структуру, що складається з α -твердого розчину кремнію в алюмінії (α -Al) і евтектики, що складається з α -Al і частинок різної форми (від близької до глобулярної до пластинчастої) на основі легованого кремнію (β -Si), а також інтерметалідних включень. Основними включеннями інтерметалідів були залізовмісні фази, найбільш часто зустрічалася фаза Al_5SiFe , що мала чітко виражену пластинчасту форму, а також фази $Al_{15}Si_2(FeMn)_3$ та Al_2Cu компактної форми.

Таблиця 1 – Матриця планування експерименту другого порядку 2^3

Інтервали варіювання та рівні факторів		Фактори, що вивчаються		
		X_1 (C, %)	X_2 (Fe, %)	X_3 (M, %)
Нульовий рівень $X_0 = 0$		10	1,5	0,12
Інтервал варіювання	1,0	5,4	0,5	0,06
	1,682	9	0,84	0,10
Нижній рівень	$X = -1,0$	4,6	1,0	0,06
Верхній рівень	$X = +1,0$	15,4	2,0	0,18
Зіркові точки	$X = -1,682$	1	0,66	0,02
	$X = +1,682$	19	2,34	0,22

Встановлено, що збільшення вмісту стружки в шихті і підвищення концентрації заліза у складі вторинного силуміну, в досліджуваних межах, сприяло утворенню невпорядкованої диференційованої структури, збільшенню об'ємної частки інтерметалідних включень несприятливої форми, розмірів і розподілу.

Присадки модифікатора у кількості 0,12...0,15 % дозволили значно поліпшити структуру вторинного сплаву за рахунок зменшення розмірів інтерметалідних фаз, їх глобуляризації та рівномірного розподілу, а також за рахунок зниження балу пористості у середньому з 2,5...2 до 1...0 згідно ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). До складу модифікатора входять елементи, що переходять у газоподібний стан в рідкому металі (сірка) і що дисоціюють з утворенням газоподібних продуктів (Na_2CO_3). Завдяки цьому відбувається перемішування металу і видалення з нього газів (водню) і, як результат, поліпшення технологічних і механічних властивостей (збільшення рідинноплинності, підвищення тріщиностійкості), але одночасно з цим перемішування сприяє збільшенню контакту рідкого металу з повітрям і відбувається його окислення, що сприяє зниженню його властивостей. Можна припустити, що при надмірному вмісті модифікатора, в нашому випадку $>0,15\%$, негативний ефект перемішування переважає над позитивним.

Наведені в табл. 2 експериментальні і розрахункові значення ливарних властивостей свідчать про високу збіжність результатів.

Таблиця 2 – Вплив стружки, заліза і модифікатора на ливарні властивості сплаву АК9М2

№ за матрицею планування	Властивості							
	L, мм		$\epsilon_{л, \%}$		l, мм		Пористість, бал	
	факт.	розрах.	факт.	розрах.	факт.	розрах.	факт.	розрах.
1	370	390	1,25	1,25	35	40,15	1,5	1,30
2	320	310	1,1	1,12	48	54,60	2,5	2,38
3	355	361	1,1	1,08	49	49,51	1,5	1,30
4	280	268	0,95	0,92	63	64,50	2,5	2,38
5	395	415	1,4	1,42	33	35,96	0,5	0,22
6	330	333	1,25	1,26	47	50,91	1,5	1,30
7	360	379	1,3	1,27	48	45,83	0,5	0,22
8	295	283	1,1	1,09	62	61,28	1,5	1,30
9	455	420	1,3	1,31	33	31,30	0	0,38
10	250	273	1,05	1,05	61	56,45	2	2,19
11	405	390	1,45	1,42	50	41,07	1	1,28
12	320	324	1,1	1,14	55	57,68	1	1,28
13	305	307	0,9	0,91	66	59,98	2	2,19
14	355	341	1,2	1,19	54	53,78	0	0,38
15	345	343	1,15	1,15	45	45,17	1	0,98
16	340	343	1,14	1,15	44,5	45,17	1	0,98
17	343	343	1,16	1,15	45,5	45,17	1	0,98
18	342	343	1,15	1,15	45,5	45,17	1	0,98
19	342	343	1,14	1,15	44,5	45,17	1	0,98
20	343	343	1,16	1,15	45,5	45,17	1	0,98

Використовуючи метод регресійного аналізу, вивчено вплив вмісту стружки в шихті, заліза в сплаві і рафінувально-модифікувальної обробки на ливарні властивості вторинного силуміну АК9М2. Була отримана система рівнянь другого порядку:

$$L=453,6-7,08C-78,69Fe+724,61M-1,16CFe-1,94CM-62,67FeM+0,05C^2+19,52Fe^2-838,89M^2; r=0,95; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{л}}=1,69-0,02C-0,73Fe+3,22M-0,002CFe-0,02CM+0,2FeM+0,0003C^2+0,19Fe^2-8,33M^2; r=0,99; \quad (2)$$

$$l=50,46+1,58C-8,88Fe-317,18M+0,05CFe+0,4CM+4,33FeM-0,02C^2+5,92Fe^2+1150M^2; r=0,92; \quad (3)$$

$$П=2,87+0,02C-1,32Fe-16,33M+0,004C^2+0,44Fe^2+30,56M^2; r=0,97; \quad (4)$$

$$\sigma_{B(\text{без } TO)}=61,07-1,27C+67,67Fe+323,16M+0,04CFe+0,62CM-5FeM+0,01C^2-24,8Fe^2-891,67M^2; r=0,98; \quad (5)$$

$$\sigma_{B(TO)}=119,03+0,35C+188,9Fe+963,59M+1,34CFe+6,57CM-0,27C^2-72,72Fe^2-4361,11M^2; r=0,91; \quad (6)$$

$$\delta_{(\text{без } TO)}=2,2-0,07C-0,85Fe+9,29M-0,009CFe+0,46CM+0,83FeM+0,0003C^2+0,16Fe^2-52,78M^2; r=0,87; \quad (7)$$

$$\delta_{(TO)}=1,91-0,08C-0,12Fe+9,37M+0,46CM-2,67FeM-41,67M^2; r=0,8 \quad (8)$$

$$HRB_{(\text{без } TO)}=17,85+1,23C+7,58Fe+179,06M+0,04CFe+0,28CM+1,33FeM-0,06C^2+0,04Fe^2-725M^2; r=0,99; \quad (9)$$

$$HRB_{(TO)}=8,14+1,81C+25,4Fe+169,73M+0,08CM-1,67FeM-0,08C^2-5,64Fe^2-647,22M^2; r=0,99. \quad (10)$$

Аналіз отриманих рівнянь і графічних залежностей показав, що при збільшенні вмісту стружки в шихті з 1 до 19 % монотонно знижувалися показники рідинноплинності на 30...35 %, лінійної усадки та тріщиностійкості на 20...25 %, а пористість збільшувалася в середньому з 0,5 до 2,5 бала внаслідок підвищення газонасиченості металу (рис. 1). Ці неметалеві включення збільшували в'язкість рідкого металу, що призводило до зниження рідинноплинності. Зниження лінійної усадки пояснюється зростанням пористості металу.

Збільшення вмісту заліза в сплаві з 0,66 до 2,34 % не вплинуло на пористість і призвело до зниження рідинноплинності на 20...25 %, тріщиностійкості та лінійної усадки на 18...20 % внаслідок збільшення кількості тугоплавких інтерметалідних фаз. Такий вплив заліза можна пояснити утворенням інтерметалідних фаз, які кристалізуються в рідкому і рідко-твердому стані, збільшуючи в'язкість рідкого металу і, як наслідок, знижують його рідинноплинність.

Присадки модифікатора до 0,15 % сприяли підвищенню рідинноплинності на 10...15 %, лінійної усадки на 30...35 %, а також зниженню пористості в середньому з 2,5 до 0,5 бала, забезпеченню максимальної тріщиностійкості внаслідок рафінування сплаву і зміни розмірів і форми інтерметалідних фаз.

Зі збільшенням вмісту стружки (при постійній присадці $M=0,12\%$) в шихті відбувалося незначне зниження границі міцності в литому стані. Після термічної обробки спостерігалось слабо виражене підвищення границі міцності при збільшенні вмісту стружки до 6...10% (рис 2 а). Більш високий вміст стружки в шихті до 10...19% призводив до зниження границі міцності.

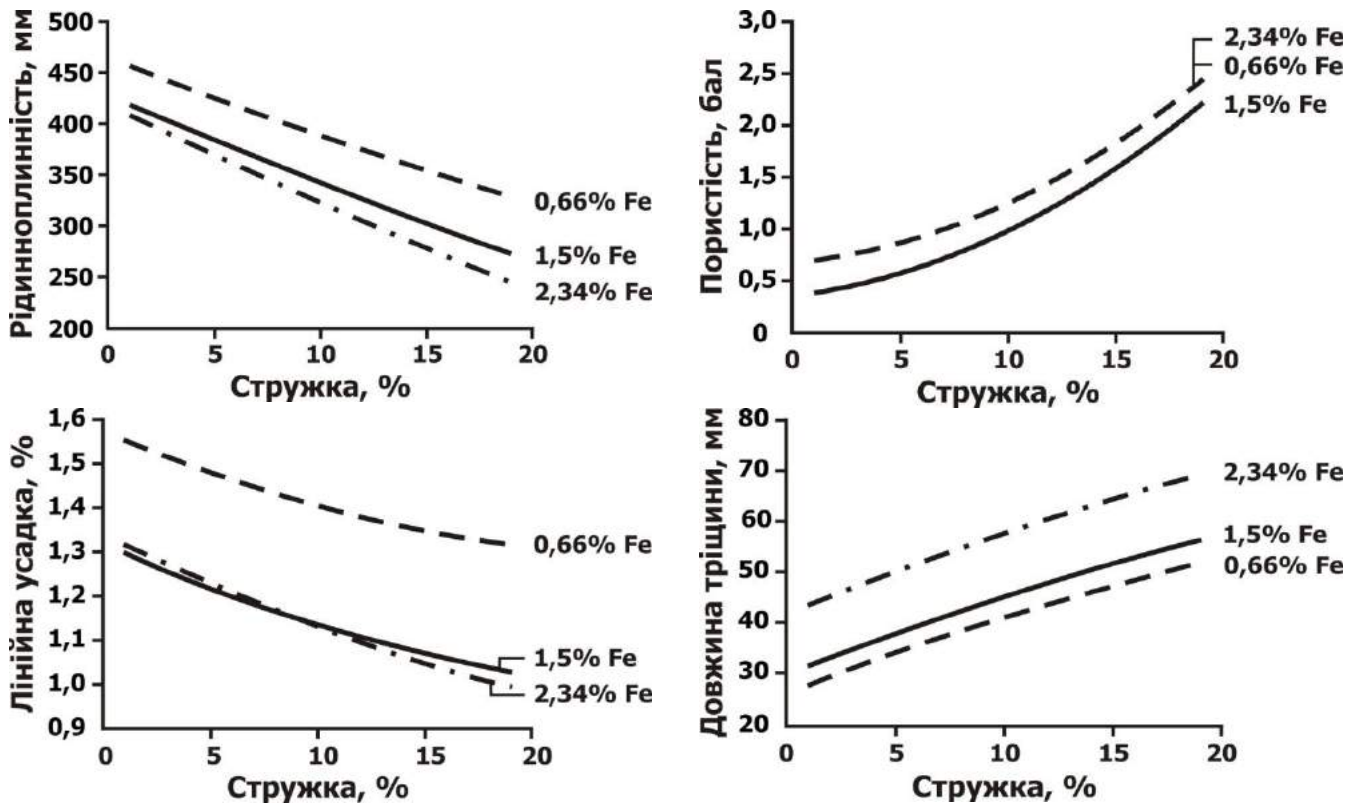
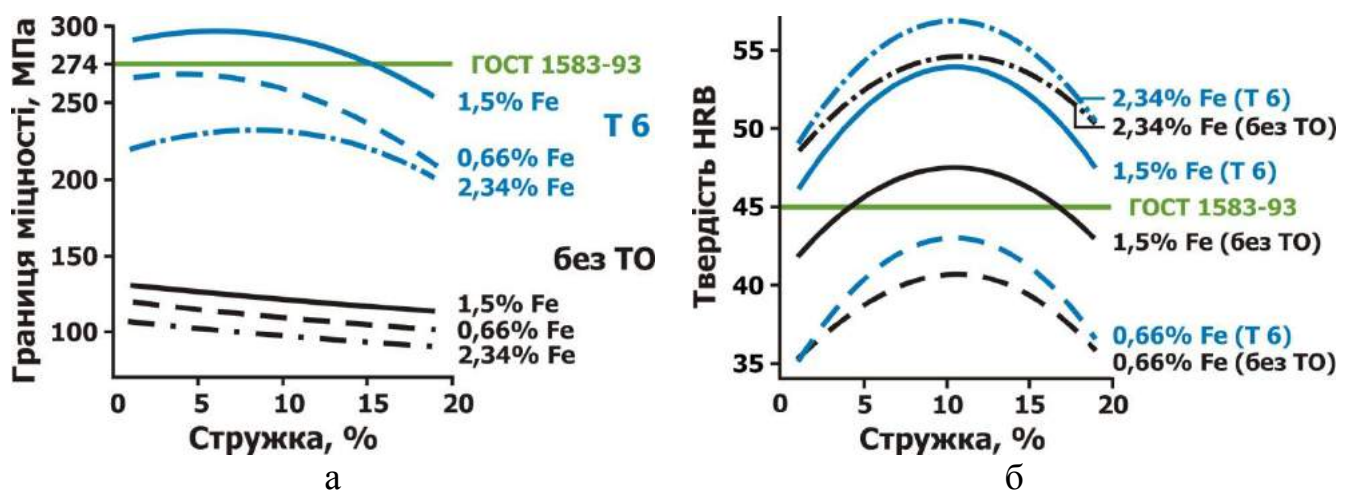


Рисунок 1 – Вплив кількості стружки в шихті на ливарні властивості сплаву АК9М2.



а – границя міцності, МПа; б – твердість HRB;

Рисунок 2 – Залежності механічних властивостей від вмісту стружки у шихті.

Це можна пояснити тим, що стружка має розвинену поверхню і відповідно більш високий вміст оксидів алюмінію і більш високий рівень забруднення

продуктами мастильно-охолоджуючих рідин в порівнянні з кусковою шихтою. При вмісті стружки в шихті до 6...10 % тверді частинки оксидів алюмінію виконують роль зміцнюючих фаз. При більш високих вмістах стружки переважає ефект знеміцнення сплаву домішками, що вносяться зі стружкою, в першу чергу, воднем.

Як видно з рис. 2 б, при збільшенні вмісту стружки в шихті до 10 %, показники твердості зростали, при подальшому збільшенні вмісту стружки до 19 % вони знижувались. Такий характер отриманих залежностей можна пояснити збільшенням кількості та розмірів інтерметалідних фаз, а також підвищенням газовмісту та збільшенням балу пористості. Внаслідок цього, опір матеріалу проникненню індентора спочатку зростав, а потім, внаслідок окрихчення матеріалу, знижувався.

З рис. 2 а видно, що термообробка призвела до підвищення границі міцності приблизно в 2 рази, при цьому сплав з вмістом заліза 1,5 % і вмістом стружки до 16 %, присадки модифікатора в кількості 0,12 % відповідав вимогам ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) за границею міцності.

Для подальшого підвищення технологічних і механічних властивостей, а також збільшення допустимих концентрацій стружки в шихті і заліза в сплаві була запропонована двоетапна обробка металу: 1) у печі, 2) у ковші. Для цього було розроблено нові склади флюсу і модифікатора (патенти № 31862 та 32929). Склад флюсу, мас. %: сірка (S) 3...10; хлорид натрію (NaCl) 25...30; карбонат натрію (Na_2CO_3) 1,5...5; карбонат стронцію (SrCO_3) 1,5...5; тетрафтороборат калію (KBF_4) 2...5; титан (Ti) 0,5...2; карбід кремнію (SiC) 0,5...0,8; фторид алюмінію (AlF_3) – інше. Склад модифікатора, мас. %: карбонат натрію (Na_2CO_3) 10...20; карбонат стронцію (SrCO_3) 15...20; карбід кремнію (SiC) 12...20; титан (Ti) 3...8; сірка (S) – інше. При обробці розплаву розробленими флюсом і модифікатором була отримана більш сприятлива структура у порівнянні з розплавом без обробки (рис. 3а, б).



а



б

а – без обробки флюсом і модифікатором, б – флюс (патент № 31862) + модифікатор (патент № 32929);

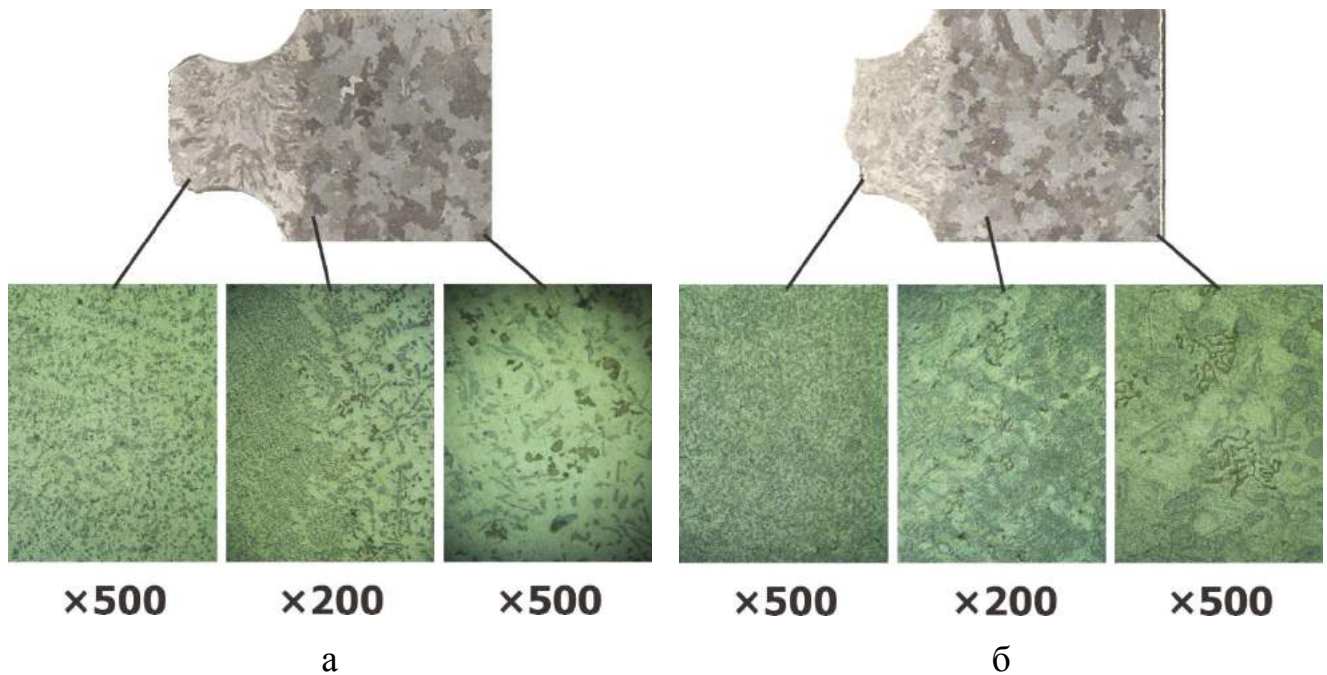
Рисунок 3 – Вплив рафінувально-модифікувальної обробки на структуру сплаву АК9М2 без термообробки ($\times 200$).

Застосування флюсу і модифікатора, захищених патентами України № 31862 та № 32929, дозволило підвищити рідинноплинність на 12...15 %, лінійну усадку на 4...6 % внаслідок збільшення щільності металу вторинних алюмінієвих сплавів та

знизити бал пористості до 1 балу згідно ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). Границя міцності при цьому збільшилась на 10 %, відносне подовження – на 20...25 % (без термооброблення), твердість – на 8 % у порівнянні з обробкою стандартним флюсом та модифікатором за патентом № 57584А.

Четвертий розділ присвячено зварюваності вторинних алюмінієвих сплавів.

Збільшення вмісту стружки в шихті та концентрації заліза в сплаві, в досліджуваних межах, призводило до утворення менш впорядкованої структури шва, з великою кількістю інтерметалідних сполук несприятливої форми. Проте, структура металу зварного шва, порівняно з основним металом, відрізнялася підвищеною щільністю і дисперсністю. Це можна пояснити високою швидкістю охолодження металу, внаслідок значної теплопровідної здатності алюмінію і його сплавів, а також позитивною дією аргону високої чистоти, який є ефективним захисним газом для алюмінієвих сплавів. Застосування рафінувально-модифікувальної та термічної обробки мало сприятливий вплив на структуру зварного шва, подібне впливу на основний метал (рис. 4 а, б).



а – 4,6 % С; 1,021 % Fe; 0,06 % М; б – 1 % С; 1,488 % Fe; 0,12 % М;

Рисунок 4 – Вплив термічної обробки на макро- та мікроструктуру зварного шва.

Використовуючи метод регресійного аналізу, вивчено вплив вмісту стружки в шихті, заліза в сплаві і рафінувально-модифікувальної обробки на механічні властивості зварного з'єднання вторинного силуміну АК9М2.

В якості функцій відгуку були прийняті границя міцності зварного з'єднання без термообробки $\sigma_{B(\text{без } T_{\text{O}})}$ і після термообробки $\sigma_{B(T_{\text{O}})}$, відносне подовження $\delta_{(\text{без } T_{\text{O}})}$ і $\delta_{(T_{\text{O}})}$, твердість зварного шва $HRB_{\text{шва } (\text{без } T_{\text{O}})}$ і $HRB_{\text{шва } (T_{\text{O}})}$, твердість зони термічного впливу $HRB_{\text{зТВ}}$ і $HRB_{\text{зТВ } (T_{\text{O}})}$. Після переходу до натуральних змінних була отримана система рівнянь другого порядку:

$$\sigma_{B(\text{без ТО})} = 92,13 - 1,83C + 98,42Fe + 465,81M - 0,0037CFe + 0,8CM - 8FeM + 0,017C^2 - 35,8Fe^2 - 1255,56M^2; \quad r=0,99; \quad (11)$$

$$\sigma_{B(\text{ТО})} = 172,73 - 2,29C + 127,03Fe + 874,3M - 0,015CFe + 1,42CM - 7FeM + 0,014C^2 - 45,28Fe^2 - 2516,67M^2; \quad r=0,98; \quad (12)$$

$$\delta_{(\text{без ТО})} = 9,16 - 0,46C - 1,61Fe + 38,01M + 0,04CFe + 1,88CM - 3FeM + 0,006C^2 + 0,08Fe^2 - 186,11M^2; \quad r=0,96; \quad (13)$$

$$\delta_{(\text{ТО})} = 10,63 - 0,28C - 2,02Fe + 26,43M + 0,04CFe + 1,57CM - 2FeM - 0,005C^2 - 0,016Fe^2 - 191,67M^2; \quad r=0,99; \quad (14)$$

$$HRB_{\text{шва}(\text{без ТО})} = 19,1 + 0,73C + 15,14Fe + 155,64M - 0,02CFe + 0,59CM + 1,63FeM - 0,0058C^2 - 2,44Fe^2 - 533,33M^2; \quad r=0,99; \quad (15)$$

$$HRB_{\text{шва}(\text{ТО})} = 27,23 + 0,25C + 2,35Fe + 111,98M - 0,03CFe + 0,185CM + 5,33FeM - 0,01C^2 - 2,08Fe^2 - 327,78M^2; \quad r=0,98; \quad (16)$$

$$HRB_{\text{ЗТВ}(\text{без ТО})} = 22,04 + 0,79C + 8,81Fe + 148,98M - 0,04CFe + 0,8CM + 13,67FeM - 0,03C^2 - 1,04Fe^2 - 630,56M^2; \quad r=0,99; \quad (17)$$

$$HRB_{\text{ЗТВ}(\text{ТО})} = 19,92 + 1,08C + 10,57Fe + 124,78M - 0,015CFe - 0,28CM + 5,33FeM - 0,037C^2 - 0,8Fe^2 - 419,44M^2; \quad r=0,99. \quad (18)$$

Графічні залежності механічних властивостей зварного металу від досліджуваних факторів аналогічні залежностям, отриманим для литого металу, але при цьому рівень властивостей більш високий (рис. 5). Так, наприклад, при обробці розплаву присадкою модифікатора в кількості 0,15 % (C=10 %, Fe=1,5 %) границя міцності зварного металу склала 310 МПа, а литого металу – 285 МПа (див. рис. 5). Це задовольняє (з певним запасом) вимозі рівномірності зварного шва і основного металу при розрахунках зварних конструкцій.

Між властивостями литого і зварного металу, отриманого за матрицею планування експерименту, спостерігаються досить чіткі кореляційні залежності, що підтверджує літературні дані про високу спадковість алюмінієвих сплавів.

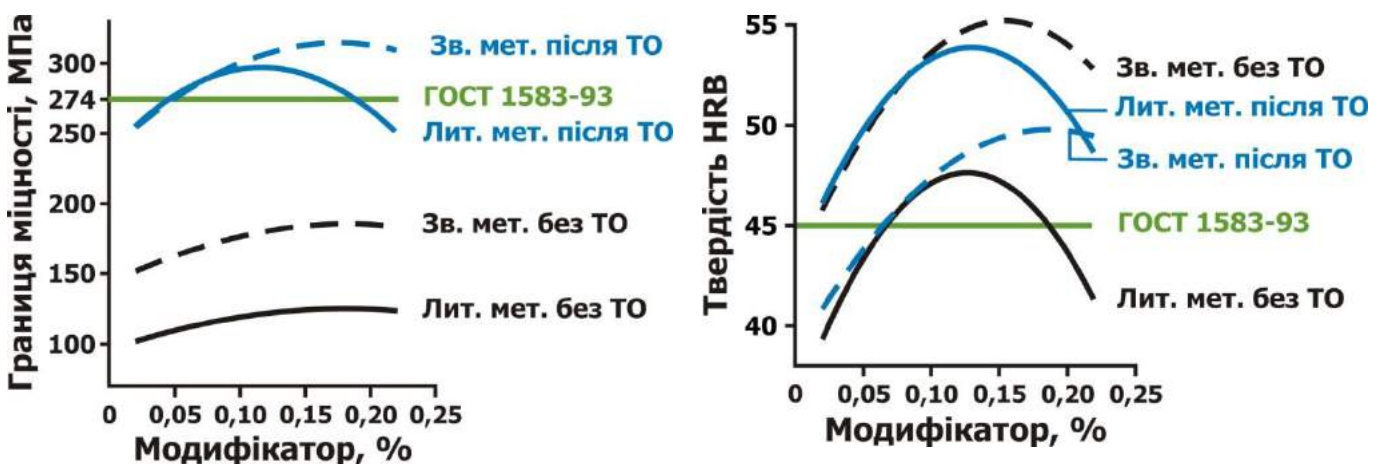


Рисунок 5 – Вплив присадки модифікатора на границю міцності та твердість зварного з'єднання сплаву АК9М2.

Запропонована технологія рафінувально-модифікувальної обробки впроваджена на ВАТ «Мотор Сич» та Запорізькому заводі кольорових сплавів. Результати промислових досліджень підтверджують основні положення та висновки

дисертаційної роботи. Очікуваний економічний ефект на ЗЗКС складає 180 тис. грн. на рік.

ВИСНОВКИ

1. У зв'язку з постійним зростанням виробництва виробів з алюмінієвих сплавів і накопиченням їх брухту і відходів, у світі існує проблема виробництва алюмінієвих сплавів на базі вторинної сировини. Ця проблема є особливо актуальною для України, яка, маючи розвинені галузі, які споживають алюмінієві сплави (ракето- і авіабудування, автомобілебудування, цивільне та промислове будівництво), втратила власне виробництво алюмінію. Оскільки якість алюмінієвих сплавів визначається складом шихти і технологією плавки, ця робота присвячена аналізу впливу кількості стружки в шихті, вмісту заліза у виплавлюваних сплавах і технології рафінувально-модифікувальної обробки на їх технологічні і механічні властивості.

2. Із застосуванням методу активного планування експерименту отримані рівняння регресій і графічні залежності, що описують спільний вплив кількості стружки в шихті, вмісту заліза в сплаві і присадки модифікатора на ливарні та механічні властивості вторинного силуміну АК9М2. Встановлено, що збільшення вмісту стружки в шихті з 1 до 19 %, а також кількості заліза в сплаві з 0,66 до 2,34 % призводило до зниження рідинноплинності на 30...35 %, зменшення лінійної усадки на 18...20 %, зниження тріщиностійкості, до зростання пористості в середньому з 0,5 до 2...2,5 балу, внаслідок збільшення кількості інтерметалідних фаз несприятливої форми, а також до зростання газонасиченості сплаву. Збільшення присадки модифікатора з 0,02 до 0,15 % призводило до підвищення рідинноплинності на 10...15 %, лінійної усадки на 30...35 %, внаслідок зниження пористості в середньому з 2,5 до 0,5 балу, забезпечення максимальної тріщиностійкості, завдяки зміні форми інтерметалідних фаз і більш рівномірному розподілу їх в структурі сплаву.

3. Отримано залежності функцій з екстремумами, що описують вплив кількості стружки на міцність та твердість силуміну. Це пояснюється подвійною дією стружки: при вмісті стружки в шихті у кількості 6...10 % відбувається створення додаткових центрів кристалізації оксидами алюмінію, що призводить до подрібнення структурних складових, вміст стружки більше 10 % призводить до забруднення металу воднем, оксидними і інтерметалідними включеннями.

4. Результати досліджень показали, що рівень механічних властивостей вторинного силуміну АК9М2, що відповідає ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93), було досягнуто при вмісті стружки в шихті 10...15 %, заліза в сплаві 1,0...1,5 %, присадки модифікатора у кількості 0,10...0,15 %.

5. Із застосуванням методу активного планування експерименту отримані рівняння регресій, що описують вплив кількості стружки в шихті, вмісту заліза в сплаві і присадки модифікатора на механічні властивості зварного шва силуміну

AK9M2. Встановлено, що висока швидкість охолодження і рафінувально-захисна функція аргону при аргоно-дуговому зварюванні забезпечили отримання дисперсної структури і більш високих значень границі міцності, відносного подовження і твердості зварного з'єднання в литому і термообробленому стані порівняно з властивостями литого металу.

6. Результати досліджень показали ідентичність зміни механічних властивостей литого і зварного металу в залежності від технологічних факторів плавки, що свідчить про високу спадковість алюмінієвих сплавів.

7. Запропоновані автором технологічні рішення (патенти № 31862 та № 32929) прийняті до впровадження на ВАТ «Мотор Січ» та Запорізькому заводі кольорових сплавів з очікуваним річним економічним ефектом 180 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Волчок И.П. Применение вторичных алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении / И.П. Волчок, О.В. Лютова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Випуск № 14. – Дн-вськ: ДНУЗТ. – С. 225-227

2. Лютова О. Підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів / О. Лютова, О. Мітяєв, І. Волчок // Машинознавство. – 2007. – № 8(122). – С. 32-35.

3. Лютова О.В. Влияние металлургических факторов производства на качество силуминов / О.В. Лютова, И.П. Волчок // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 45, ч.2. – Дн-вск: ПГАСиА, 2008. – С. 34-41.

4. Ljutova O.V. Increase of foundry properties of secondary silumins / O.V. Ljutova, I.P. Volchok // Archives of foundry engineering. – Poland – Issue 1/2008. – volume 8. – P. 89-91.

5. Лютова О.В. Свариваемость вторичных силуминов / О.В. Лютова, И.П. Волчок // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 58. – Дн-вск: ГВУЗ «ПГАСиА», 2011. – С. 440-445.

6. Пат. 31862 Україна, МПК (2006) C22B21/00 C22B9/00. Флюс для оброблення алюмінієвих сплавів / Волчок І.П., Мітяєв О.А., Лютова О.В., Широкобокова Н.В., Повзло В.М.; заявник та патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т – № 200713840; заявл. 10.12.2007; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.

7. Пат. 32929 Україна, МПК (2006) C22C1/00. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І.П., Мітяєв О.А., Лютова О.В., Широкобокова Н.В., Повзло В.М.; заявник та патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т – № 200800105; заявл. 02.01.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

8. Наномодифікатор вторинних силуминов / И.П. Волчок, А.А. Митяев, О.В. Лютова, Н.В. Широкобокова. – сб. докладов 2-го Международного научно-технического симпозиума «Наноструктурные функциональные покрытия и материалы для промышленности, 8-й Международной научно-технической конференции «Вакуумные технологии и оборудование для получения наноматериалов». Харьков, 23-27 апреля 2007. – Харьков, 2007. – Т.1. – С. 180-183.

АНОТАЦІЯ

Лютова О.В. Підвищення технологічних та механічних властивостей доєвтектичних вторинних силумінів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Запорізький національний технічний університет МОНмолодьспорту України, Запоріжжя, 2012.

Мета дисертаційної роботи полягала в отриманні оптимальної дисперсної структури, підвищенні технологічних і механічних властивостей вторинних силумінів у результаті вдосконалення процесів шихтовки, рафінування і модифікування розплаву.

Із застосуванням методу активного планування експерименту отримано рівняння регресій та графічні залежності, що описують комплексний вплив кількості стружки у шихті, вмісту заліза у сплаві та присадки модифікатора на технологічні (ливарні і зварюваність) та механічні властивості вторинного силуміну АК9М2. Ці залежності дозволили оптимізувати склад шихти, визначити оптимальну присадку модифікатора та допустимий вміст заліза у сплаві.

Результати наведених досліджень та розроблені технологічні рішення (патенти №31862 та №32929) дозволили видати технологічні рекомендації промисловості.

Ключові слова: вторинні силуміни, структура, технологічні властивості, рафінування, модифікування, зварне з'єднання.

АННОТАЦИЯ

Лютова О.В. Повышение технологических и механических свойств доэвтектических вторичных силуминов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Запорожский национальный технический университет МОНмолодьспорту Украины, Запорожье 2012.

Цель работы заключалась в получении оптимальной дисперсной структуры, повышении технологических и механических свойств вторичных силуминов в результате совершенствования процессов шихтовки, рафинирования и модифицирования расплава.

В связи с постоянным ростом производства изделий из алюминиевых сплавов и накоплением их лома и отходов, в мире существует проблема производства алюминиевых сплавов на базе вторичного сырья. Эта проблема особенно актуальна для Украины, которая имея развитые отрасли, потребляющие алюминиевые сплавы (ракето- и авиастроение, автомобилестроение, гражданское и промышленное строительство), утратила собственное производство алюминия. Так как качество алюминиевых сплавов определяется составом шихты и технологией плавки, настоящая работа посвящена анализу влияния количества стружки в шихте, содержания железа в выплавляемых сплавах и технологии рафинирующей модифицирующей обработки на их технологические и механические свойства. С

применением метода активного планирования эксперимента получены уравнения регрессий и графические зависимости, описывающие совместное влияние количества стружки в шихте, содержания железа в сплаве и присадки модификатора на литейные и механические свойства вторичного силумина АК9М2, позволившие оптимизировать состав шихты, определить оптимальную присадку модификатора и допустимое содержание железа в сплаве. Установлено, что увеличение содержания стружки в шихте с 1 до 19 % , а также количества железа в сплаве с 0,66 до 2,34 % приводило к снижению жидкотекучести на 30...35 %, уменьшению линейной усадки на 18...20 %, снижению трещиностойкости и росту пористости в среднем с 0,5 до 2...2,5 балла вследствие увеличения количества интерметаллидных фаз неблагоприятной формы, а также к росту газонасыщенности сплава. Увеличение присадки модификатора с 0,02 до 0,15 % приводило к повышению жидкотекучести на 10...15 %, линейной усадки на 30...35 % вследствие снижения пористости в среднем с 2,5 до 0,5 балла, обеспечению максимальной трещиностойкости, благодаря изменению формы интерметаллидных фаз и более равномерному распределению их в структуре сплава.

Установлен экстремальный характер влияния количества стружки на прочность и твердость силумина, что объясняется двойным действием стружки: при содержании стружки в шихте в количестве 6...10 % происходит создание дополнительных центров кристаллизации оксидами алюминия, приводящее к измельчению структурных составляющих, содержание стружки более 10 % приводит к загрязнению металла водородом, оксидными и интерметаллидными включениями.

Результаты исследований показали, что уровень механических свойств вторичного силумина АК9М2, соответствующий ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93), был достигнут при содержании стружки в шихте 10...15 %, железа в сплаве 1,0... 1,5 %, присадки модификатора в количестве 0,10...0,15 %.

С применением метода активного планирования эксперимента получены уравнения регрессий, описывающие влияния количества стружки в шихте, содержания железа в сплаве и присадки модификатора на механические свойства сварного шва силумина АК9М2. Установлено, что высокая скорость охлаждения и рафинирующе-защитная функция аргона при аргоно-дуговой сварке обеспечили получение дисперсной структуры и более высоких значений предела прочности, относительного удлинения и твердости сварного соединения в литом и термообработанном состоянии по сравнению со свойствами литого металла.

Установлена идентичность изменения механических свойств литого и сварного металла в зависимости от технологических факторов плавки, что свидетельствует о высокой наследственности алюминиевых сплавов.

Предложенные автором технологические решения (патенты №31862 и №32929) приняты к внедрению на ОАО «Мотор Сич» и Запорожском заводе цветных сплавов с ожидаемым экономическим эффектом 180 тыс. грн в год.

Ключевые слова: вторичные силумины, структура, технологические свойства, рафинирование, модифицирование, сварное соединение.

ABSTRACT

Lyutova O.V. Increasing of technological and mechanical properties of hypoeutectic secondary silumins. – On the rights of a manuscript.

Dissertation for receiving of the scientific degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.02.01. – Material Science. – Zaporizhzhya National Technical University of Ministry of Education and Science, Youth and Sport of Ukraine, Zaporizhzhya, 2012.

The purpose of the dissertation was obtaining of optimal disperse structure, increasing of technological and mechanical properties of secondary silumins as a result of improvement of charging, refinement and modification processes of the melt.

With the use of active planning method of the experiment regression equations and graphical dependences have been obtained. They describe the complex influence of the amount of chip in charge, iron content in the alloy and modifier addition on the technological (foundry and weldability) and mechanical properties of the secondary silumin AK9M2. These dependences have allowed optimizing the charge composition, determining the optimal modifier addition and acceptable iron content in the alloy.

The results of the presented research and established technological solutions (patents № 31862 and № 32929) have allowed working out technological recommendations to the industry.

Key words: secondary silumins, structure, technological properties, refinement, modification, weld.