

*A mechanism for regulating the magnetic field has been established and a process for magnetizing the contacting surfaces with the opposite direction of the magnetic field lines, concentrating the magnetic field and creating electromagnetic forces and magnetic repulsion pressure, which prevents fretting corrosion, has been developed.*

*Support rolls, which prevent deflection and breakage of cast iron work rolls, operate under conditions of high specific pressures. During the rolling process, the pressures increase sharply due to surface roughness and uneven specific pressures. At the location of the protrusions, the contact area decreases, the specific pressures increase, which leads to plastic deformation, the convergence of atoms to the interatomic distance, welding of the contacting surfaces, and fretting corrosion, the nature of which has not been fully established.*

*Fretting corrosion leads to a decrease in the fatigue strength of the metal, therefore, studying the nature and developing methods for preventing fretting corrosion is an important scientific and technical problem.*

**Keywords:** *fretting corrosion, electromagnetic nature, induction, electromagnetic force, magnetic pressure, support roll.*

*Стаття надійшла 20.10.2024р.*

УДК 544.537:669.715

[doi.org/10.31498/2522-9990282024318351](https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318351)

Лютова О.В., Капустян О.Є.

### ПІДВИЩЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ

*Робота присвячена підвищенню ливарних властивостей вторинних силумінів. Розглянуто вплив вмісту стружки в шихті, кількості заліза в сплаві та модифікатора, що використовується для обробки рідкого розплаву, на рідину, лінійну усадку, тріщиностійкість і бал пористості силуміну АК9М2. Алюміній є ключовим матеріалом сучасної промисловості, який активно використовується в багатьох галузях завдяки своїм унікальним властивостям: легкості, високій корозійній стійкості, питомій міцності, теплопровідності та технологічності. Його застосування охоплює автомобілебудування, авіацію, будівництво, електротехніку та інші сфери. Однак виробництво первинного алюмінію пов'язане зі значними витратами енергії та високим рівнем екологічного забруднення. У зв'язку з цим усе більшої ваги набуває вторинна переробка алюмінію, особливо у виготовленні силумінів — сплавів на основі алюмінію з кремнієм, що відзначаються широкими можливостями застосування.*

*Однак вторинні алюмінієві сплави мають певні недоліки. Через наявність домішок, таких як залізо, кальцій чи інші неметали, їх механічні та технологічні властивості можуть бути значно обмеженими. Для покращення характеристик таких сплавів застосовують рафінування й модифікування. Методи рафінування спрямовані на очищення металу від неметалевих включень і розчинених газів. Серед основних підходів — відстоювання, обробка флюсами, продування інертними газами й фільтрація через спеціальні системи.*

*Модифікування структури сплаву відбувається за допомогою введення легувальних компонентів, зокрема перехідних металів, стронцію, титану, бору, сурми. Такі добавки дозволяють контролювати процес кристалізації, зменшуючи розміри зерен і рівномірно розподіляючи частинки зміцнюючої фази, що позитивно впливає на міцність, пластичність і ливарні властивості.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*Нові методи, зокрема використання сірки або багатокomпонентних лігатур, демонструють перспективу для створення вторинних алюмінієвих сплавів із покращеними властивостями. Ці підходи дозволяють ефективніше вирішувати завдання повторного використання металу, підвищуючи якість продукції та зменшуючи вплив на довкілля.*

**Ключові слова:** вторинні силуміни, ливарні властивості, модифікація.

**Постановка проблеми.** Алюміній, який отримав колись назву «срібло з глини», на сьогоднішній день є одним із найважливіших технічних матеріалів, а також одним із найпоширеніших у земній корі елементів (7,5 %) [1]. Споживання алюмінію та його сплавів у світі, на сьогоднішній день, становить приблизно 20 млн. т на рік і посідає друге місце після заліза. Такий попит обумовлений його фізико-механічними, хімічними та службовими властивостями. Він легкий, маса алюмінієвої деталі втричі легша за сталеву деталь таких же розмірів. За питомою міцністю алюмінієві сплави не поступаються ряду вуглецевих та легованих сталей. Вони корозійностійкі у повітрі, а також у середовищі багатьох рідин і газів, мають високу пружність і не окрихчуються при низьких температурах. Алюміній добре проводить електричний струм та тепло, за цими показниками його перевершує лише мідь. Піддається обробці методами різання та тиску, зварювання.

Виробництво первинного алюмінію є високоенерговитратним та екологічно шкідливим. Єдиний в Україні виробник первинного алюмінію – Дніпровський алюмінієвий завод фактично припинив свою роботу. Виробництво вторинного алюмінію та його сплавів, внаслідок менших енергетичних витрат та викидів у навколишнє середовище, має тенденцію до зростання. До 2030 року, згідно з прогнозами, випуск вторинного алюмінію у світі може сягнути 22...24 млн. т на рік [2]. Головними недоліками вторинних алюмінієвих сплавів є низькі технологічні та механічні властивості, внаслідок забруднення вихідної шихти залізом, мастилами, пластмасами та іншими шкідливими домішками.

Серед ливарних алюмінієвих сплавів найбільшого поширення знайшли силуміни, що характеризуються сприятливим поєднанням механічних та ливарних властивостей. Властивості силумінів, значною мірою, визначаються якістю шихти та процесами металургійного переділу. Відповідно до результатів досліджень А.А. Мітєєва, Н.С. Калініної, В.З. Куцової та ін., ретельна підготовка та сортування шихтових матеріалів у поєднанні з рафінуючо-модифікуючою обробкою рідкого металу дозволяють суттєво підвищити механічні (міцність, пластичність, твердість, ударна в'язкість) та службові (витривалість, кавітаційна та корозійна стійкість) первинних металів. На жаль, у цих, як і в більшості інших робіт, мало приділяється уваги технологічним властивостям, в першу чергу ливарним (рідкотекучості, тріщиностійкості, усадці та ін.), а також зварюваності вторинних алюмінієвих сплавів. Усунення цієї прогалини, у значній частині, присвячена ця робота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах дефіциту первинної сировини, що все зростає, підвищення технологічних і механічних властивостей вторинних силумінів в результаті вдосконалення процесів шихтовки, рафінування та модифікування розплаву є актуальним завданням. Ливарні властивості відносяться до важливих технологічних характеристик, що визначають якість виливків, їх механічні та службові властивості. Силуміни володіють в цілому досить високими ливарними властивостями: хорошими рідкотекучістю та тріщиностійкістю, низькою об'ємною усадкою. Використання вторинної сировини, в першу чергу стружки, при виробництві силумінів негативно позначається на їх ливарних та механічних властивостях, внаслідок забруднення шихти залізом, мастильно-охолоджувальними рідинами, пластмасами та іншими небажаними домішками. Це вимагає проведення додаткових заходів щодо рафінування рідкого розплаву.

Методи рафінування: Плавка та лиття алюмінієво-кремнієвих сплавів супроводжуються окисленням розплаву та розчиненням у ньому газів, внаслідок чого сплави забруднюються

## Машинобудування і зварювальне виробництво

неметалевими включеннями. Неметалічні включення, розташовуючись на межах зерен, сприяють зниженню механічних та технологічних властивостей силумінів [3]. Алюміній має велику спорідненість до кисню, підвищену схильність до газонасичення, що призводить до забруднення розплаву оксидами. Основна неметалічна домішка у алюмінієвих сплавах – оксид алюмінію  $Al_2O_3$ .

Значний вплив на властивості алюмінієвих сплавів надає водень. Волога, що міститься у футеровці печей і ковшів, флюсів і шлаків, мастильні матеріали, що містяться в шихті, є основним джерелом водню в металі (> 80% від загального обсягу газів) [4]. Пористість, спричинена підвищеним вмістом водню, є основним дефектом алюмінієвих сплавів.

Причина утворення газової пористості – зниження розчинності водню у металі зі зниженням його температури. Розчинність за температури плавлення алюмінію становить  $0,69 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ,  $15,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  – розчинність у рідкому алюмінії при 2343 К. При 700 ... 1000 °С мідь і кремній знижують розчинність водню в алюмінії. Утворення нітридів, оксидів, карбідів, сульфідів у розплаві при його взаємодії з атмосферою, оксидами сірки та вуглецю не призводить до збільшення пористості [5].

Для зниження негативного впливу неметалевих включень та газів проводять операцію рафінування. Усі методи рафінування засновані на виконанні двох необхідних умов: виділення домішок у самостійну фазу та максимальне відділення цієї фази від рідкого розплаву.

Найбільш простим та широко використовуваним методом рафінування є відстоювання розплаву. Легкі частинки домішок і бульбашки газів у об'ємі розплаву спливають на його поверхню, важкі осідають на дно печі. Недоліком цього є тривалість процесу відстоювання, що знижує продуктивність роботи цеху, і навіть залежність ступеня рафінування від вологості атмосфери в цеху. На виробництві найчастіше використовують три технологічні прийоми: обробку розплаву флюсами, продування його інертними та активними газами, фільтрацію.

Рафінування флюсами полягає у фізико-хімічній взаємодії флюсів з неметалевими включеннями та газами, що знаходяться в розплаві. Найбільш широке поширення знайшли флюси на основі фтористих та хлористих солей натрію та калію. Застосування при виплавці сплаву АЛ32 (АК8М) флюсів наступних складів:

- 1) 44 % NaCl+44 % KCl+12 % NaF ( $T_{пл} = 610 \text{ °C}$ );
- 2) 42 % NaCl+ 42 % KCl+16 % NaF ( $T_{пл} = 620 \text{ °C}$ ),
- 3) 47,25 % NaCl+47,25 % KCl+5,5 % KF ( $T_{пл} = 640 \text{ °C}$ ),

зменшив газовміст сплаву проти існуючого на 1...2 бали пористості за шкалою ВНДІАМ [5]. У виливках був виявлено шлакових включень, а механічні властивості відповідали вимогам стандарту.

Використання інертних або активних газів для продування розплаву є адсорбційним методом рафінування. Для цілей рафінування можна використовувати аргон, азот, хлор, фтор, фреон та ін. [6-9].

Сполуки хлору, фтору – високотоксичні речовини, що погіршують екологію; з'єднання фреону негативно впливають на озоновий шар Землі, руйнуючи його. Тому використання цих газів обмежене. Нетоксичним газом є азот, його вартість набагато нижче вартості аргону. Також може бути використана суміш чадного газу (CO) з азотом.

Останнім часом все більш широке застосування в комплексах, що рафінують-модифікують, знаходить сірка та її сполуки. Рафінуюча дія сірки полягає в утворенні сірководню, а також великої кількості газоподібної сірки ( $T_{кип} = 445 \text{ °C}$ ), що реалізує механізм адсорбційного хімічного рафінування. У роботі [10] сплав АК5М4, виплавлений із низькосортних шихтових матеріалів, був оброблений порошкоподібною сіркою у струмені азоту. Обробка алюмінієвого розплаву масою 500 кг добавкою 0,05% сірки викликала утворення пари сірки за обсягом в 1,5...2 рази більше порівняно з об'ємом аргону, що продуває протягом 10 хв через розплав тієї ж маси. Вміст водню зменшилося з  $0,28 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  (при

## Машинобудування і зварювальне виробництво

обробці розплаву універсальним флюсом) до  $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Сірка також виступає у ролі модифікатора залізовмісних фаз. Це, за даними [10], призвело до збільшення рідини з 240 (обробка універсальним флюсом) до 300 мм (обробка сіркою).

Встановлено [11], що при введенні сірки, у складі сумішей або у вигляді сполук, забезпечувався найвищий рівень властивостей сплавів, тоді як порошкоподібна сірка у чистому вигляді інтенсивно випаровувалась, не забезпечуючи стійкого ефекту, що рафінує. Введення сірки у вигляді сполук знизило у 8...10 разів кількість газових викидів, що утворюються при модифікуванні [12]. Дослідженнями, проведеними Б.М. Немененком та ін., встановлено, що під дією сірки пластинчаста форма залізовмісних фаз в алюмінієвих сплавах змінюється на рівноосну щодо  $\text{Mn:Fe} > 0,5$ .

Застосування технології обробки розплаву рафінуючими таблетками (50% сірки +50% кальцинованої соди) при виплавці поршневих сплавів [13], дозволило використовувати в шихті 60...70% власних відходів при економії первинних матеріалів 40...50% і на 5...10% зменшити газоусадочну пористість, на 20...30% підвищити рідинну сплаву. Механічні властивості сплаву відповідали ГОСТ 1583-89.

Ще одним простим та ефективним методом рафінування є фільтрація. Як фільтри використовуються склотканина, гранули вогнетривких матеріалів, рідкий флюс та ін.

У роботі [14] для фільтрування вторинного силуміну АК9М2 було застосовано фільтр складу 50%  $\text{CaF}_2$ +50%  $\text{MgF}_2$ . При використанні даного фільтра з розплаву віддалилися великі частинки сполук заліза, об'ємна частка фаз залізовмісних складала 1,5% по відношенню до 2,7% (без фільтра), відбулося також модифікування кремнію евтектики, очищення розплаву від включень оксидів. Сприятливі структурні зміни призвели до підвищення пластичності металу.

Для рафінування вторинних алюмінієвих сплавів від заліза було запропоновано технологічну схему [15], яка включала такі етапи:

- а) визначення вмісту заліза та кремнію в сплаві;
- б) якщо вміст  $\text{Fe} > 3,0\%$  – переплав на розкислювач;
- в) якщо вміст  $\text{Fe} \leq 3,0\%$  – коригування хімічного складу;
- г) ведення Al-Cr з метою отримання співвідношення  $\text{Cr: Fe} = 1:1$ ;
- д) фільтрація через пінокерамічні фільтри;
- е) отримання товарного металу.

Крім видалення заліза зі сплаву, фільтрація сприяла видаленню розчинених газів, оксидних плівок і шлакових включень, при цьому залишковий хром у товарному сплаві забезпечив підвищення корозійної стійкості. Цей метод екологічно безпечний, що дозволяє підвищити культуру виробництва вторинних алюмінієвих сплавів.

### Методи модифікування

Одним з ефективних та найбільш універсальних методів підвищення технологічних та механічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів є модифікування. Його основне завдання полягає у сприятливій зміні величини та форми структурних складових сплаву, при введенні в рідкий метал добавок-модифікаторів, які практично не змінюють хімічного складу сплаву. Ці добавки умовно поділені на дві групи: модифікатори I та II роду.

У першій групі як модифікатори виступають хімічні елементи, які утворюють тугоплавкі сполуки, що кристалізуються в першу чергу. Виділяючись у вигляді дисперсних частинок, ці сполуки (карбіди, нітриди, оксиди) є зародками кристалів, що виникають під час затвердіння. Як модифікатори I роду можуть виступати титан, ванадій, цирконій та ін.

До другої групи відносяться поверхнево-активні елементи, які адсорбуються на межах кристалу, що зародився, і тим самим знижують швидкість його зростання. Лужні та лужноземельні метали (натрій, калій) відносяться до цієї групи. Останнім часом, як модифікатори доевтектичних і евтектичних силумінів, широкое поширення знайшли стронцій і сурма. Найбільш ефективним є використання комплексів, що складаються з кількох



## Машинобудування і зварювальне виробництво

елементів-модифікаторів. У роботах В.З. Куцової [16-18] показано, що модифікування сплаву АК7ч комплексом, до складу якого входить 0,1% стронцію і 0,5% скандію, призводить до підвищення диференціювання евтектики, а також поліпшення властивостей сплаву - підвищення межі міцності в 1,7...2,0 рази, твердості в 1,5 ... 1,8 рази, при рівні пластичних властивостей немодифікованого силуміну.

Застосування потрійної лігатури Al+2,2 % Si+10 % Sr при модифікуванні сплаву АЛ4 (АК9ч) забезпечувало отримання рівномірної структури, що містить розгалужені дендрити твердого розчину та тонкодиференційовану евтектику [19]. Стронціймісткі інтерметалідні включення розташовувалися по межах зерен, не знижуючи при цьому показників механічних властивостей сплаву. Евтектичні потрійні лігатури системи Al-Si-Sr дозволили підвищити міцність виливків на 5...10%, пластичність на 50...70% порівняно з використанням подвійної лігатури Al+5% Sr.

Як модифікатори алюмінієвих сплавів використовуються лігатури алюмінію з перехідними металами. Добавки перехідних металів впливають на утворення пересичених твердих розчинів, змінюючи за рахунок цього розміри литого зерна. Згідно з результатами досліджень [20] застосування лігатур Al-3% Zr і Al-2,5% Ti для модифікування сплаву АЛ5М призвело до подрібнення евтектичного кремнію, крім того титан і цирконій, що знаходилися в твердому розчині, сприяли зміцненню сплаву. Надлишкові алюмініди були відсутні, хоча сумарний вміст титану та цирконію становив 0,25 %.

Використання дрібнокристалічної лігатури АТ3 (алюміній+титан) для модифікування сплаву АК6М2, шихта якого складалася з 40% первинного чушкового сплаву АК6М2 та 60% власного повернення, збільшило вміст титану з 0,14 до 0,16...0,17. Після обробки розплаву лігатурою АТ3 (алюміній+0,16 % титану) модифікуючий ефект зберігався протягом 2...3 год, спостерігалася подрібнення макроструктури сплаву. Такі зміни сприятливо позначилися лише на рівні технологічних і механічних властивостей. Показники межі міцності перебували лише на рівні 250 МПа, твердості 89 НВ, бал пористості знизився до 1 бала згідно з ГОСТ 1583-93. Зниження рідинної плинності на 4,7 % порівняно з діючою технологією можна вважати несуттєвим.

Модифікування висококремнистого алюмінієвого сплаву АК12М2,5Н2,5 ітрієво-кремнієвою лігатурою (40 % Y-Si), за рахунок більшої спорідненості ітрію до водню, в порівнянні з іншими компонентами сплаву, сприяло зв'язуванню його в гідриди, зменшивши газову пористість [21, 22].

Нині для підвищення якості ливарних силумінів використовується технологія обробки порошковими модифікаторами. Як модифікуючі добавки виступають частинки карбідів, нітридів, боридів, оксидів металів, розміри яких становлять 100 нм і менше. Застосування таких модифікаторів забезпечує полегшення та екологічну безпеку технологічного процесу виплавки алюмінієвих сплавів.

У роботах, проведених Н.Є. Калініною із співавторами розроблено схему отримання з відходів феросплавного виробництва нанокристалічних сполук карбиду кремнію, нітриду алюмінію, карбонітриду титану для модифікування сплавів, у тому числі й алюмінієвих [23]. Як модифікатор для ливарних алюмінієвих сплавів АЛ2, АЛ4, АЛ4С використовувався дисперсний порошок карбиду кремнію [24-26]. Комплексні дослідження з вивчення механічних та технологічних властивостей сплавів показали, що обробка розплавів дисперсним порошком карбиду кремнію сприяла: подрібненню макро- та мікроструктури сплавів, підвищенню механічних та технологічних властивостей. Межа міцності підвищилася на 3...8 %, відносне подовження на 19...26 %, рідинна плинність збільшилася на 0,8...3,3 %, щільність - на 1,5...2,4 %, спостерігалася висока тріщиностійкість, пористість склала 1 бал згідно ДСТУ 2839-94.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для підвищення рівня механічних і технологічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів застосовується комплексна обробка, що включає процеси рафінування і модифікування. Відомості про комплексну обробку силуміну АЛ4 наведено у роботі [27]. Введення в розплав 3% шихтових матеріалів, закристалізованих під тиском, призвело до зменшення розмірів дендритів та підвищення межі міцності, обробка розплаву 0,5% флюсового модифікатора призвела до подальшого подрібнення структури евтектики та збільшення її об'ємної частки до 50%. В результаті було досягнуто підвищення пластичності, рідинної плинності, продовжено збереження модифікуючого ефекту до 1,5...2 год.

Комплексна обробка, що полягає в плавлі силуміну АК12М2 під покривним флюсом (суміш хлоридів і фторидів лужноземельних металів) і подальша обробка рафінуючим флюсом і модифікатором (патенти України № 57584А, № 58793А) методом продувки через розплав за допомогою азоту запропоновано О.А. Міт'яєвим та І.П. Вовчком [28, 29]. Ця технологія забезпечила очищення розплаву від водню за рахунок його хімічного зв'язування та видалення за адсорбційно-флотаційним механізмом, а також рафінування від неметалевих та шлакових включень. Структура литого металу мала рівномірний розподіл модифікованого евтектичного кремнію, залізовмісні фази набули сприятливої форми китайських ієрогліфів та великих багатогранників. При цьому рідкотекучість і формозаповнюваність сплаву підвищилися на 20...30 %, пористість знизилася з 3...2 до 2...1 бала ДСТУ 2839-94 проти заводської технологією виробництва.

У роботах І.Ф. Червоного [30, 31] встановлено, що одним із факторів, що визначає рівень механічних властивостей алюмінієвої катанки, є ступінь рафінування (відстоювання) та модифікування розплаву.

Аналіз літератури показує, що дані про вплив якості шихти та процесів рафінування та модифікування на якість вторинних алюмінієвих сплавів часто суперечливі та не систематизовані. У зв'язку з цим необхідні дослідження з комплексного вивчення впливу якості шихти та рафінуючо-модифікуючої обробки на механічні та технологічні властивості вторинних силумінів.

Слід зазначити, що в літературі недостатньо висвітлено вплив якості вихідної шихти на ливарні властивості силумінів. З цього питання є лише окремі, часто суперечливі дані. Так у роботі [32] було досліджено вплив вмісту заліза та молібдену на рідину, щільність, величину повної усадки, об'єм концентрованої раковини та пористість сплаву АК12М2. Автори показали, що зі збільшенням вмісту заліза довжина рідинної плинності (пруткова проба) при температурах  $t = 680, 730, 880$  °С зменшилася приблизно на 20% (рис. 1).

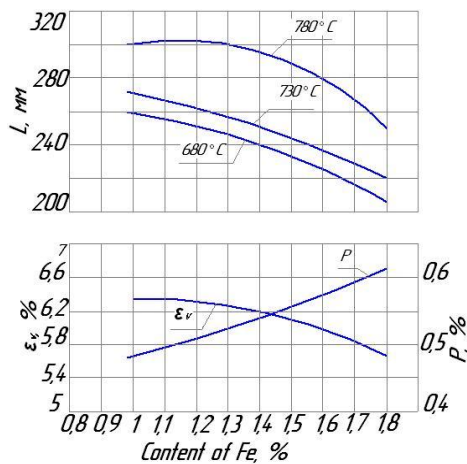


Рисунок 1 – Вплив заліза на рідинну текучість  $L$ , об'ємну усадку  $\epsilon_v$  та пористість  $P$  сплаву АК12М2

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Введення молібдену в кількості 10% вмісту заліза приводило при досліджуваних температурах до підвищення рідини на 5...10%. Було також встановлено, що зі збільшенням вмісту заліза на 1% підвищувалася щільність, зменшувався обсяг повної усадки на 12%, збільшувався об'єм концентрованої усадкової раковини та бал усадкової пористості. При додатковому введенні молібдену щільність збільшилася, а усадкові характеристики помітно зменшувалися. Наведені вище результати свідчать про негативний вплив заліза на ливарні властивості силумінів. Не викликає сумніву, що ці показники певною мірою залежать від якості шихти, наприклад, від вмісту в ній стружки, а також технології рафінуючої обробки рідкого металу.

У нашій роботі [33] проведено дослідження щодо підвищення ливарних властивостей сплаву АК12М2МгН. Сплав був виплавлений в індукційній печі зі стружки з підвищеним вмістом заліза, забрудненої мастильно-охолоджувальними рідинами. Після рафінування універсальним флюсом у печі, сплав оброблявся модифікатором [34] складу: 25-40% карбонату натрію  $\text{NaCO}_3$ , 12-20% карбиду кремнію  $\text{SiC}$ , 3-8% титану, решта - сірка S в 125 кг розливних ковшах. Кількість модифікатора змінювалося не більше 0...0,4% від маси рідкого металу. Як видно з рисунку 2, зі збільшенням присадки модифікатора від 0 до 0,16% бал пористості зменшується від 3...4 до 0...1 згідно з ГОСТ 1583-93, а рідинна плинність збільшувалася з 230 до 420 мм. При подальшому збільшенні модифікатора бал пористості та рідина не змінювалися.

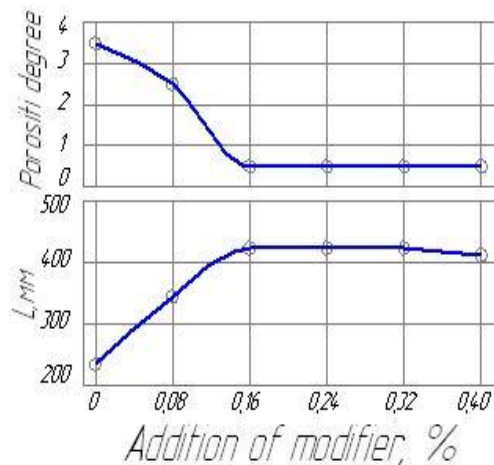


Рисунок 2 – Вплив присадки модифікатора (addition of modifier) на рідинну текучість L та бал пористості (porositi degree) сплаву АК12М2МгН

Позитивний вплив модифікатора пояснюється його здатністю до рафінування розплаву від оксидів і продуктів розпаду мастильно-охолоджуючих рідин, а також його здатністю до зміни структурних складових сплаву, в першу чергу, інтерметалідних фаз:  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ ,  $\text{T}(\text{Al}_6\text{CuNi})$ ,  $\text{W}(\text{Al}_x\text{Mg})$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_5\text{SiFe}$ ,  $\text{Al}_4\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_8\text{SiFe}_2$ .

**Мета дослідження.** Аналіз впливу вмісту стружки у шихті та технології рафінуючої обробки рідкого металу на рідину, пористість, тріщиностійкість вторинних силумінів.

**Основний матеріал дослідження.** Були проведені комплексні дослідження щодо впливу стружки (від 1 до 19%), заліза (від 0,6 до 2,3%) та модифікатора (від 0,02 до 0,22%) на структуру та ливарні властивості: рідинна плинність (пруткова проба  $\varnothing 5$ ), тріщиностійкість (проба типу швелер) та лінійну усадку (циліндрична проба) сплаву АК9М2.

Досліджувані чинники істотно вплинули на форму та розміри інтерметалідних фаз, параметр їх форми (ставлення максимального розміру до мінімального) змінювався в межах від 1,5 до 45...50 (рис. 3).



## Машинобудування і зварювальне виробництво

З даних видно, що збільшення вмісту стружки у складі шихти з 1 до 19% призвело до різкого укрупнення інтерметалідних фаз без істотної зміни параметра їх форми (рис. 3 а, б). Рідкотекучість  $L$  знизилася з 455 мм до 365 мм, лінійна усадка  $\varepsilon_1$  зменшилася з 1,2 до 0,8, ймовірно, внаслідок підвищення газової пористості з 1 до 4 бали ГОСТ 1583-93. Проба на тріщиностійкість сплаву з 1% стружки не мала тріщин, а сплав з 19% довжина тріщини  $l_c$  склала 40 мм (рис. 4).

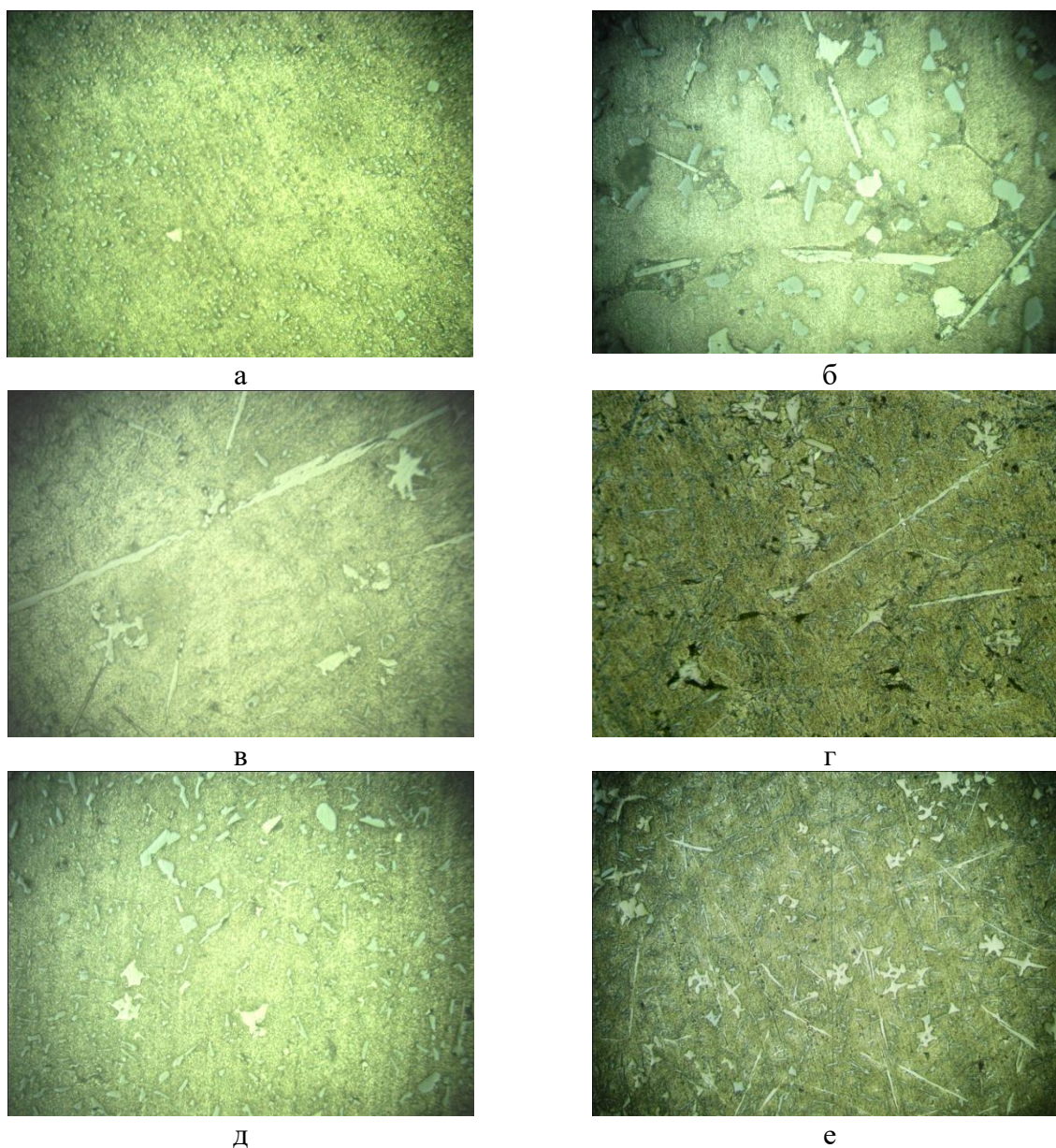


Рисунок 3 – Структури сплаву АК9М2: а) 1% стружки; б) 19% стружки; в) 1% заліза; г) 2% заліза; д) 0,06% модифікатора; е) 0,18% модифікатора

Збільшення вмісту заліза приблизно вдвічі призвело до помітного укрупнення інтерметалідних фаз, а також до зростання параметра їх форми (рис. 3, в, г). Рідина сплаву знизилася з 295 мм до 265 мм, лінійна усадка з 0,9 до 0,6%, газова пористість з 2 до 4 бали. Довжина тріщини в пробі з 1% заліза становила 53 мм, а за 2% заліза відбулося повне руйнування проби по периметру 92 мм.



## Машинобудування і зварювальне виробництво

У сплаві АК9М2, обробленому 0,06% модифікатора інтерметалідні фази (рис. 3,д) були представлені витягнутими включеннями з параметром форми близько 20. Зі збільшенням модифікатора до 0,18% відбулося зменшення розмірів фаз та параметрів їх форми (рис. 3,е) і підвищення рідинної плинності з 260 до 320 мм, лінійна усадка залишилася практично незмінною – 0,8%; тріщин у пробі на тріщиностійкість не спостерігалось.

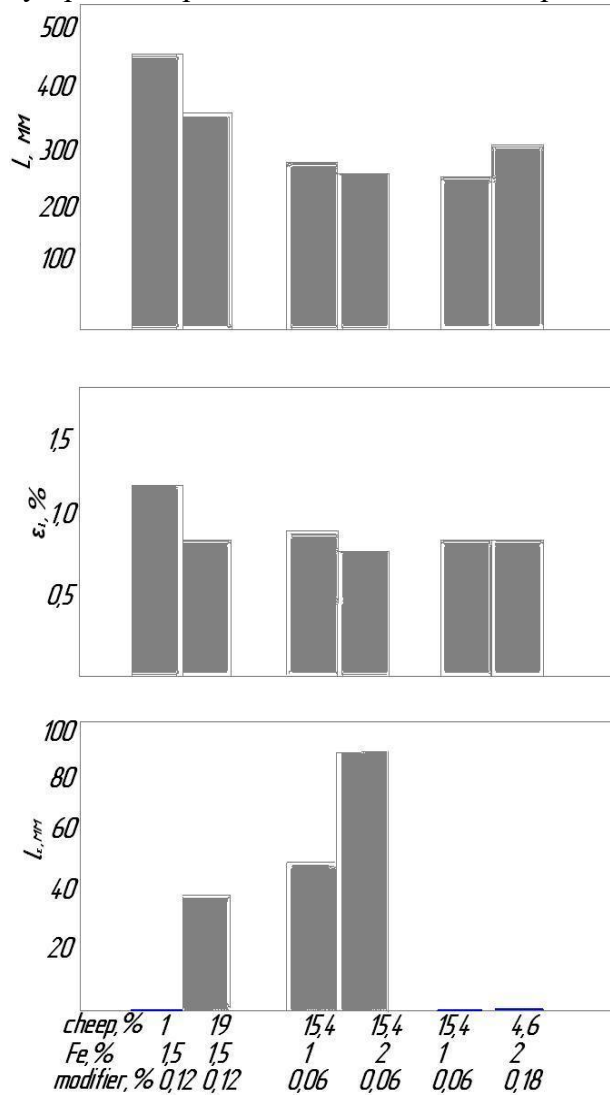


Рисунок 4 – Вплив вмісту стружки (cheep), заліза (Fe) та модифікатора (modifier) на ливарні властивості сплаву АК9М2

### ВИСНОВКИ

Підтверджено, що збільшення кількості стружки в шихті та вмісту заліза в сплаві призводить до отримання грубих інтерметалідних включень та зниження ливарних властивостей вторинних силумінів. Обробка рідкого розплаву модифікатором [34] дозволяє покращити структуру та ливарні властивості алюмінієвих сплавів.

### Список використаних джерел

1. Лебедев В.М. Применение литейных алюминиевых сплавов в сельском хозяйстве / В.М. Лебедев // Литейное производство. – 1991. – № 3. – С. 5-6.
2. О повышении эффективности производства вторичных алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ukrbascompany.at.ua/index/o\\_povyshenii\\_ehffektivnosti\\_proizvodstva\\_vtorichnykh\\_aljuminievyykh\\_splavov/0-135](https://ukrbascompany.at.ua/index/o_povyshenii_ehffektivnosti_proizvodstva_vtorichnykh_aljuminievyykh_splavov/0-135)). - Дата звернення 05.10.2024.
3. Хохлев В.М. Производство литейных алюминиево-кремниевых сплавов / В.М. Хохлев – М.: Металлургия. – 1980. – 67 с.
4. О рафинировании и модифицировании алюминиевых сплавов / С.П. Задруцкий, Б.М. Немененок, С.П. Королев [и др.] // Литейное производство. – 2004. – № 3. – С. 17-20.
5. Рафинирование сплава АЛ32 легкоплавкими флюсами / А.С. Кауфман, Л.И. Жутаев, В.В. Хлынов [и др.] // Литейное производство. – 1982. – № 11. – С. 7-9.
6. Повышение эффективности дегазации алюминиевых сплавов продувкой инертными газами / В.А. Палачев, С.В. Инкин, В.Д. Белов [и др.] // Литейное производство. – 1992. – № 3. – С. 10-11.
7. Тимошкин В.И. Комплексная обработка алюминиевых сплавов с продувкой инертным газом / В.И. Тимошкин, В.П. Соловьев, Р.М. Мацнев // Литейное производство. – 1989. – № 5. – С. 8-9.
8. Рафинирование алюминиевых сплавов высокоскоростной продувкой инертным газом / С.В. Инкин, В.Д. Белов, В.А. Палачев [и др.] // Литейное производство. – 1992. – № 2. – С. 13-15.
9. Рафинирование алюминиевых сплавов высокоскоростной продувкой газами / С.В. Инкин, В.Д. Белов, В.А. Палачев [и др.] // Литейное производство. – 2000. – № 9. – С. 24-25.
10. Рафинирование алюминиевых сплавов порошкообразной серой в струе азота / А.М. Глушко, Г.В. Довнар, М.М. Ситниченко [и др.] // Литейное производство. – 2004. – № 3. – С. 23-25.
11. Влияние серы на структуру и свойства алюминиевых сплавов / Б.М. Немененок, А.М. Галушко, Г.В. Довнар [и др.] // Литье и металлургия. – 2005. – № 4(36). – С. 106-108.
12. Немененок Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Немененок Б.М. – Мн.: Технопринт, 1992. – 272 с.
13. Производство вторичного Al-Si-сплава для производства поршней / А.А. Андрушевич, И.Н. Казаневская, М.Н. Чурик [и др.] // Литейное производство. – 1999. – № 3. – С. 25-26.
14. Курдюмов А.В. О возможности повышения пластичности вторичных силуминов фильтрованием расплавов / А.В. Курдюмов, Т.А. Базлова // Литейное производство. – 1991. – № 8. – С. 7-8.
15. Каленик О.Н. Рафинирование вторичных алюминиевых сплавов от примеси железа / О.Н. Каленик, Б.М. Немененок, В.Л. Трибушевский // Литье и металлургия. – 2002. – № 4. – С. 52-55.
16. Куцова В.З. Модифікування алюмінієвих сплавів / В.З. Куцова, О.В. Швець, Т.А. Аюпова // «МОМ». – 2001. – № 1-2. – С. 99-109.
17. Куцова В.З. Міжатомна взаємодія і вибір елементів модифікаторів для сплаву АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 1. – С.55-59.
18. Куцова В.З. Влияние микролегирования Sr и Sc на фазовый состав и свойства АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова, М.Ю. Амбражей // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 41, ч.1. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2007. – С. 55-59.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

19. Исследование структуры, фазового состава и механических свойств сплава АЛ4, модифицированного лигатурой Al-Si-Sr / В.З. Куцова, Н.В. Попова, К.И. Коваленко [и др.] // Литейное производство. – 1991. – № 8. – С. 8-10.
20. Взаимосвязь структуры и модифицирующей способности Al-Ti и Al-Zr лигатур при получении отливок из высокопрочных силуминов / И.Г. Бродова, Д.В. Баилюков, Т.И. Яблонских [и др.] // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 23-25.
21. Модифицирование сплава АК6М2 / В.И. Никитин, А.И. Ивашкевич, А.В. Ивлев [и др.] // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 30-31.
22. Гаврилов А.И. Модифицирование силумина иттриево-кремниевыми лигатурами / А.И. Гаврилов, А.А. Аникин, К.И. Власкина // Литейное производство. – 1989. – № 12. – С. 13-15.
23. Получение нанокристаллических композиций управляемым плазмохимическим синтезом / В.Т. Калинин, А.С. Дубников, А.Я. Качан [и др.] // Вісник двигунобудування. – 2007. – № 1(15). – С. 134-137.
24. Калинина Н.Е. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов порошковыми композициями / Н.Е. Калинина, В.П. Белоярцева, О.А. Квац // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 193-195.
25. Квац О.А. Современный способ модифицирования литейных силуминов / О.А. Квац, Н.Е. Калинина, В.Т. Калинин // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тезисы докладов 67 Международной научно-практической конференции, 24-27 мая 2007 г. – Днепропетровск – С. 251-252.
26. Калинина Н.Е. Влияние модифицирования на фазовый состав высокопрочных алюминиевых сплавов / Н.Е. Калинина, З.В. Вилищук // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 5, – Днепропетровск, ПГАСиА. – 2010. – С. 39-44.
27. Оптимизация свойств сплава АЛ4 при литье в кокиль поэтапным планированием экспериментов / А.М. Парамонов, В.И. Никитин, В.В. Павлов [и др.] // Литейное производство. – 1986. – № 11. – С. 12-14.
28. Митяев А.А. Комплексная рафинирующе-модифицирующая обработка алюминиевых сплавов / А.А. Митяев // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 45, ч.2. – Днепропетровск, ПГАСиА. – 2008. – С. 138-142.
29. Рязанов С.Г. Повышение качества алюминиевых сплавов / С.Г. Рязанов, А.А. Митяев, И.П. Волчок // «Nauka I Technologia»: V konferencja naukovo-techniczna Odlewnictwa Metali Niezależnych. Lucien, 6-8 czerwca 2002 r. – Lucien, Poland. – 2002. – P. 16-20.
30. Шульга А.И. Производство алюминиевой катанки на технологической линии Continous Properzi / А.И. Шульга, И.Ф. Червоний, С.Г. Егоров // Литье и металлургия. – 2008. – № 1(45). – С. 62-65.
31. Шульга А.И. Влияние технологических факторов на свойства алюминиевой катанки / А.И. Шульга, И.Ф. Червоний, С.Г. Егоров // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 4-5. – С. 83-86.
32. Байкина А.И., Лебедев К.П., Степанов Ю.Н., Шеметев Г.Ф. Литейные силумины с повышенным содержанием железа. – Л.: Знание, 1983. – 28 с.
33. Лютова О., Митяев О., Волчок І. Підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів // Машинознавство. – 2007. - № 4 – С.35-40.
34. Патент 57584А Украина, МКИ С22С1/06. Модификатор для алюминиевых сплавов /И.П. Волчок, А.А. Митяев (Украина). № 2002108343; Заявл. 22.10.2002; Оpubл. 16.06.2003. Бюл. № 6.

Liutova O.V., Kapustian O.Ye.

### INCREASING THE FOUNDRY PROPERTIES OF SECONDARY SILUMINS

*The work is devoted to improving the casting properties of secondary silumins. The influence of the content of chips in the charge, the amount of iron in the alloy and the modifier used for processing the liquid melt on the liquid, linear shrinkage, crack resistance and porosity score of AK9M2 silumin is considered. Aluminum is a key material of modern industry, which is actively used in many industries due to its unique properties: lightness, high corrosion resistance, specific strength, thermal conductivity and manufacturability. Its application covers automotive, aviation, construction, electrical engineering and other areas. However, the production of primary aluminum is associated with significant energy consumption and a high level of environmental pollution. In this regard, the secondary processing of aluminum is gaining increasing importance, especially in the manufacture of silumins - alloys based on aluminum with silicon, which are characterized by wide application possibilities. However, secondary aluminum alloys have certain disadvantages. Due to the presence of impurities such as iron, calcium or other non-metals, their mechanical and technological properties can be significantly limited. Refining and modification are used to improve the characteristics of such alloys. Refining methods are aimed at purifying the metal from non-metallic inclusions and dissolved gases. The main approaches include settling, fluxing, inert gas purging and filtration through special systems.*

*The alloy structure is modified by introducing alloying components, in particular transition metals, strontium, titanium, boron, antimony. Such additives allow controlling the crystallization process, reducing grain size and evenly distributing the particles of the strengthening phase, which has a positive effect on strength, ductility and casting properties.*

*New methods, in particular the use of sulfur or multi-component alloys, show promise for creating secondary aluminum alloys with improved properties. These approaches allow more effectively solving the problem of metal reuse, improving product quality and reducing environmental impact.*

**Keywords:** secondary silumins, foundry properties, modification.

*Стаття надійшла 06.10.2024р.*

УДК 669.295.054.85

[doi.org/10.31498/2522-9990282024318359](https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318359)

Білоник Д.І., Грабовський В.Я., Капустян О.Є.,  
Лаврись С.М., Лаптева Г.М., Білоник І.М.

### СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВТОРИННОГО ТИТАНУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ВИПЛАВКИ У ВІДКРИТОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО КУВАННЯ

*В роботі наведені результати дослідження структури та стандартних механічних властивостей вторинного титану в литому стані (електрошлаковий зливок) та після його гарячого кування з коефіцієнтами деформації  $\varepsilon = 40\%$  і  $\varepsilon = 90\%$ . Зливки отримали на електрошлаковій установці А-550 конструкцію якої удосконалили для переплаву витратних електродів виготовлених зі 100% листової обрізі титану ВТ1-0. На верхньому фланці відкритого кристалізатора встановили ковзний струмопідвід і пристрій, який захищав аргоном поверхню шлакової ванни і розігріту частину витратного електроду. Для виконання*