

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 30, 2022, № 1 (328), 77-83

<https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.077>

УДК 621.745.55

**М.М. Ямшинський<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, доц., доцент, e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>,  
Web of Science ResearcherID: I-4267-2017

**В.Ю. Селівьорстов<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, проф., професор, e-mail: seliverstovvy@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

**І.В. Лук'яненко<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, ст. викладач, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>,  
Web of Science Researcher ID: J-7294-2017

**Б.В. Кивгило<sup>1</sup>**, аспірант, e-mail: kyvgylo.bogdan@gmail.com

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

<sup>2</sup>Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

## Вплив модифікування високодисперсним карбідом кремнію на ливарні властивості вторинного сплаву системи Al-Si

Одним із основних напрямів застосування алюмінію є авіакосмічна та транспортна промисловість, які постійно підвищують вимоги до властивостей литих виробів. Застосування алюмінію в якості основного матеріалу для виготовлення різноманітних конструкцій транспортних засобів дозволяє значно знизити масу конструкції, що призводить до зниження витрат пального. Щоб відповідати вимогам сучасного світу в роботі розглянуто дослідження в напрямі поліпшення якості та підвищення властивостей виробів із вторинного алюмінієвого сплаву АК12.

Проаналізовано сучасні технології оброблення рідкого алюмінієвого сплаву. За результатами аналітичного огляду встановлено, що найбільший інтерес представляють модифікатори, які впливають на розміри первинного зерна і форму включень евтектичного кремнію. Встановлено, що процеси модифікування не змінюють хімічного складу сплаву, а сприяють зміні величини і форми структурних складових сплаву.

В роботі розглянуто вплив ультрадисперсного модифікатора SiC розміром часток до 200 нм на ливарні властивості вторинних алюмінієвих сплавів: рідкотекучість, лінійну та об'ємну усадку.

Рідкотекучість досліджували в піщано-глинисті (ПГФ) та металеві форми. Встановлено, що додавання 0,1 % SiC покращує рідкотекучість вторинного сплаву з 560 до 630 мм для ПГФ та з 230 до 295 мм для кокілю внаслідок очищення від неметалевих вкраплень. Подальше підвищення вмісту SiC до 0,2 % не призводить до явного підвищення рідкотекучості.

Дослідженням лінійної усадки встановлено, що підвищення вмісту модифікатора до 0,2 % сприяє її зменшенню. В той же час підвищення температури заливання сплаву сприяє збільшенню загальної лінійної усадки, що пов'язано із тривалим часом знаходження металу в рідкому стані. Внаслідок швидкої кристалізації розплаву з додатковими центрами зародкоутворення у вигляді ультрадисперсного модифікатора, коефіцієнт об'ємної усадки зменшується з 28 до 20 %.

Запропоновані технічні рішення модифікування сплавів вторинного сплаву АК12 можна застосовувати в процесах, що дозволить підвищити якість литої металопродукції за економного використання енергоресурсів і матеріалів на її виробництво.

**Ключові слова:** модифікування, карбід кремнію, вторинний сплав, ливарні властивості, рідкотекучість, лінійна усадка.

**Вступ.** На сьогоднішній день алюміній та сплави на його основі є одним з основних конструкційних матеріалів, які знайшли своє широке застосування у різних галузях сучасної промисловості.

За об'ємом виробництва алюміній та сплави на його основі посідають друге місце в світі після сплавів на основі заліза. Одним із основних напрямів застосування алюмінію є авіакосмічна та транспортна про-

мисловість. Це пов'язано з тим, що алюміній має переваги, які вигідно виділяють його серед інших конструкційних матеріалів. Найбільш значними перевагами алюмінію, які обумовлюють його поширеність в авіаційному будівництві, є його висока корозійна стійкість, мала густина, висока міцність та ударна в'язкість. Застосування алюмінію в якості основного матеріалу для виготовлення різноманітних конструкцій транспортних засобів дозволяє значно знизити масу конструкції, що призводить до підвищення маневреності всієї конструкції, а також зниження витрат пального. Крім того, алюміній добре піддається деформуванню та литтю, а також подальшому механічному обробленню, що дозволяє виготовляти з нього різноманітні деталі та конструкції складної конфігурації. Однак у чистому вигляді алюміній має ряд недоліків, таких, як низьку твердість та температуру плавлення. Значно підвищити характеристики алюмінію дозволяє введення в нього різних легувальних елементів та модифікаторів.

У зв'язку з сучасним прогресом та постійним розвитком галузі авіабудування та транспортної промисловості в цілому, до конструкційних матеріалів висуваються все більш високі вимоги. Щоб відповідати вимогам сучасного світу потрібно постійно проводити пошук та дослідження в напрямі поліпшення якості та підвищення властивостей конструкційних матеріалів.

Актуальною проблемою є розроблення методів поліпшення якості вторинних сплавів на основі алюмінію. Виробництво первинного алюмінію є досить коштовним та енерговитратним процесом. Значно знизити витрати на виробництво алюмінієвих сплавів дозволяє перероблення алюмінієвого брухту. Отримання 1 т вторинного алюмінію дозволяє зберегти 4 т бокситів, 700 кг кокса та зменшує шкідливі викиди (включаючи CO) на 35 кг [1]. Використання 1 т високоякісних вторинних сплавів на основі алюмінію під час виготовлення виливків замість первинного алюмінію, у промисловості заощаджує, залежно від марки сплаву та області його застосування, від 230 до 490 кг первинного алюмінію, від 24 до 197 кг кристалічного кремнію, від 1,1 до 4,6 т бокситів, від 0,4 до 1,8 т глинозему, а також від 4 до 16 тисяч кВт·год електроенергії [2]. Але якість вторинної сировини поступається якості первинних сплавів. Основною причиною низької якості вторинних сплавів є їх висока забрудненість різними шкідливими домішками.

Вторинні сплави системи алюміній – кремній (силуміни) слугують основою багатьох алюмінієвих композицій, що широко використовують як конструкційні матеріали для фасонного лиття в авіабудуванні, будівництві, транспорті та інших галузях промисловості. Це пов'язано зокрема з можливістю і економічною доцільністю використання в шихті звороту власного виробництва, а також використання таких сплавів в якості заміни первинних. Однак, механічні властивості вторинних сплавів зазвичай поступаються за своїм рівнем первинним сплавам, що обумовлено насамперед «погіршенням» їхнього хімічного складу та газовмісту [3]. Тому розроблення технологічних заходів щодо поліпшення якості вторинних алюмінієвих

ливарних сплавів для отримання якісних литих заготовок є актуальною задачею.

У зв'язку зі структурними особливостями литих сплавів – грубими крихкими включеннями кремнію та інтерметалевих фаз міцнісні характеристики силумінів невисокі, особливо низька пластичність. Для поліпшення структури і механічних властивостей ливарних промислових сплавів алюмінію регулюють режими плавлення і лиття, умови кристалізації виливків (лиття в піщані і металеві форми, під тиском тощо). Але найбільш дієвим чинником, що визначає сприятливе структуроутворення силумінів, залишається модифікування, тобто подрібнення структури за рахунок введення в розплав перед його заливанням незначної кількості дисперсних добавок модифікувальних елементів.

Для виробництва виливків із силумінів найбільший інтерес становлять модифікатори, що впливають на розміри первинного зерна і форму вкраплень евтектичного кремнію [3].

Існують різні методи поліпшення структури і підвищення службових і механічних властивостей вторинних силумінів. Залежно від механізму впливу їх можна розділити на фізичні і металургійні методи.

Рафінування сплавів на основі алюмінію здебільшого відбувається за допомогою методу оброблення розплаву флюсом та наступним обробленням з використанням інертних газів або азоту. Широкого розповсюдження набули флюси на основі хлористих та фтористих сполук натрію та калію.

Недоліком оброблення алюмінієвих сплавів флюсами є небезпечність та шкідливість даного методу з екологічної точки зору. З'єднання фтору та хлору є токсичними речовинами для людини. Використання цих речовин в процесі виробництва становить потенційну загрозу для здоров'я робітників та негативно впливає на навколишнє середовище.

Вібраційне та ультразвукове оброблення розплавів алюмінію дозволяє отримати дрібнозернисту структуру, яка рівномірно розподілена по всьому перетину виливка. Вібраційний імпульс застосовують відносно кокілю з розплавом алюмінію, в якому відбувається процес кристалізації, або до самої заготовки, яка охолоджується. Вібрація, за своїм впливом, являє собою метод примусового перемішування розплаву частини виливка, що не затверділа. Частота вібрації під час оброблення зазвичай становить 1–30 Гц за змінної амплітуди [4].

Головними недоліками оброблення розплавів вібраційним та ультразвуковим методами є необхідність використання складного обладнання для генерації механічних коливань. Використання цього методу з метою підвищення якості продукції може бути економічно недоцільним, оскільки потребує значних змін технології виробництва.

Одним з ефективних і найбільш універсальних методів підвищення технологічних і механічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів є модифікування. Його основне завдання полягає в зміні величини і форми структурних складових сплаву, після введення в рідкий метал модифікаторів, які практично не

змінюють хімічного складу сплаву. Ці добавки умовно розділені на дві групи: модифікатори I і II роду [3, 4].

У першій групі в якості модифікаторів 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. В якості модифікаторів I роду можуть виступати титан, ванадій, цирконій тощо.

До другої групи належать поверхнево активні елементи, які адсорбуються на межах зародку кристала і тим самим знижують швидкість його росту. Лужні і лужноземельні метали (натрій, калій) відносяться до цієї групи. Останнім часом, в якості модифікаторів до евтектичних і евтектичних силумінів широке поширення знайшли стронцій і сурма. Найбільш ефективним є використання комплексів, що складаються з декількох елементів-модифікаторів. У роботах [5, 6] 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, за рівних пластичних властивостей немодифікованого силуміну. Застосування потрібної лігатури Al + 2,2 % Si + 10 % Sr для модифікування сплаву АК9ч забезпечувало отримання рівномірної структури, що містить розгалужені дендрити твердого розчину і рівномірно розподіленої евтектики. Інтерметалідні вкраплення зі стронцієм розташовувалися по межах зерен, не знижуючи при цьому показників механічних властивостей сплаву.

В даний час для підвищення якості ливарних силумінів використовується технологія обробки порошковими модифікаторами. Як модифікатори виступають частки карбідів, нітридів, боридів, оксидів металів, розміри яких становлять 100 нм і менше. Застосування таких модифікаторів забезпечує полегшення і екологічну безпеку технологічного процесу виплавлення алюмінієвих сплавів. У роботах, проведених Н.Є. Калініною [4] зі співавторами, розроблений спосіб отримання нанокристалічних сполук карбіду кремнію, нітриду алюмінію, карбонітриду титану для модифікування сплавів, в тому числі і алюмінієвих. В якості модифікатора для ливарних алюмінієвих сплавів АЛ2, АЛ4, АЛ4С використовувався дисперсний порошок карбіду кремнію. Комплексні дослідження з вивчення механічних і технологічних властивостей сплавів показали, що обробка розплавів дисперсним порошком карбіду кремнію сприяла: подрібненню макро- і мікроструктури сплавів, підвищенню механічних і технологічних властивостей. Межа міцності підвищилася на 3–8 %, відносне подовження – на 19–26 %, рідкотекучість збільшилася на 0,8–3,3 %, щільність – на 1,5–2,4 %, спостерігалася висока тріщиностійкість, пористість складала 1 бал згідно з ДСТУ 2839-94.

Аналіз літератури показує, що дані про вплив якості шихти і процесів рафінування та модифікування на якість вторинних алюмінієвих сплавів часто є суперечливими. А для досягнення необхідного рівня механічних, технологічних та службових властивостей не-

обхідний комплексний підхід до контролювання якості від сортування брухту та відходів до термічного оброблення готових виробів. У зв'язку з цим необхідні дослідження з комплексного вивчення впливу якості шихти і рафінувально-модифікувального оброблення на механічні і технологічні властивості вторинних силумінів.

Одним із критеріїв поліпшення якості вторинних алюмінієвих сплавів є оброблення розплаву ультрадисперсними модифікаторами.

З урахуванням принципу про кристаліграфічну і розмірну відповідність ізоморфності кристалічних решіток алюмінію і тугоплавких сполук [7, 8] встановлено, що модифікаторами алюмінієвих сплавів можуть бути карбіди кремнію, ніобію і танталу, а також карбіди і нітриди титану, цирконію, гафнію і ванадію. Як ефективний модифікатор ливарних алюмінієвих сплавів запропоновано нанодисперсний порошок карбіду кремнію SiC розміром часток до 200 нм.

**Постановка задачі.** Таким чином, на підставі аналізу літератури в роботі поставлено наступні задачі: визначити ливарні властивості вторинного сплаву системи Al-Si залежно від кількості доданого модифікатора SiC та температури заливання сплаву.

**Результати дослідження.** В роботі досліджено вплив модифікатора SiC у кількості до 0,2 % на рідкотекучість вторинного алюмінієвого сплаву АК12 у піщано-глинисті та металеві форми (рис. 1).

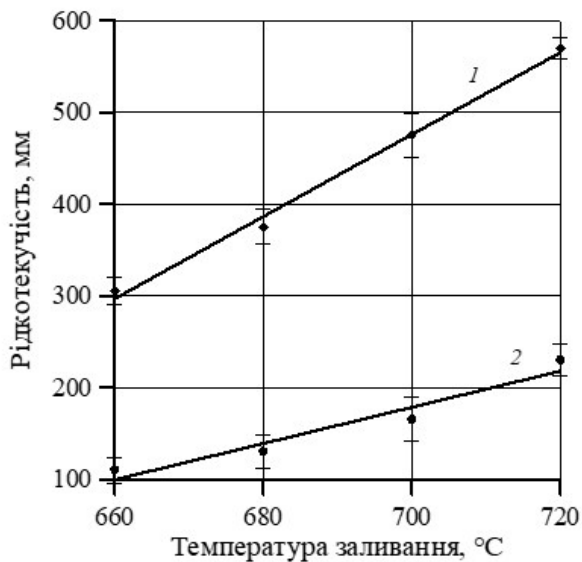
Підвищення температури заливання позитивно впливає на рідкотекучість в ПГФ та кокіль. Насамперед це пов'язано із підвищенням температури заливання над лінією ліквідус, що в свою чергу забезпечує більш тривалий час знаходження розплаву в рідкому стані. Таке явище дещо компенсує те, що АК12 – евтектичний сплав із вузьким інтервалом кристалізації.

Встановлено, що додавання 0,1 % SiC покращує рідкотекучість вторинного сплаву внаслідок очищення від неметалевих вкраплень з 560 до 630 мм для ПГФ та з 230 до 295 мм для кокілю. Подальше підвищення вмісту SiC до 0,2 % не призводить до явного підвищення ливарних властивостей, з 630 до 645 мм для ПГФ та з 295 до 350 мм. Результати досліджень повною мірою підтверджують результати авторів [5, 6, 9].

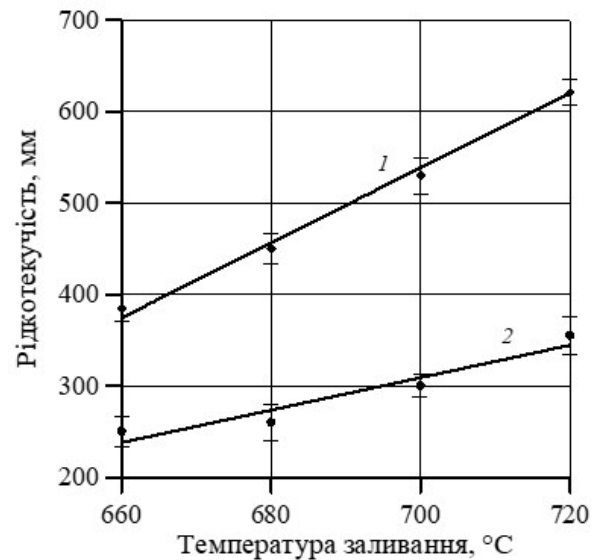
Таке явище можна пояснити тим, що основний механізм впливу нанодисперсних частинок на формування структури алюмінієвого сплаву під час кристалізації полягає в тому, що основна їх маса виштовхується фронтом кристалізації в рідку фазу і бере участь в подрібненні структурних складових [4].

Мікроструктура вихідного сплаву АК12 містить велику кількість дрібних мікропор, розмір яких становить 10–15 мкм. Модифікування сплаву АК12 нанодисперсною сполукою SiC у кількості 0,1 та 0,2 % призводить до подрібнення евтектичної структури сплаву АК12 з одночасним зменшенням об'ємної частки кристалів первинного Si. Розмір кристалів первинного Si при цьому зменшується із збільшенням вмісту модифікатора. Мікроструктура модифікованого сплаву АК12 містить значно меншу кількість дрібних мікропор у порівнянні із вихідним сплавом.

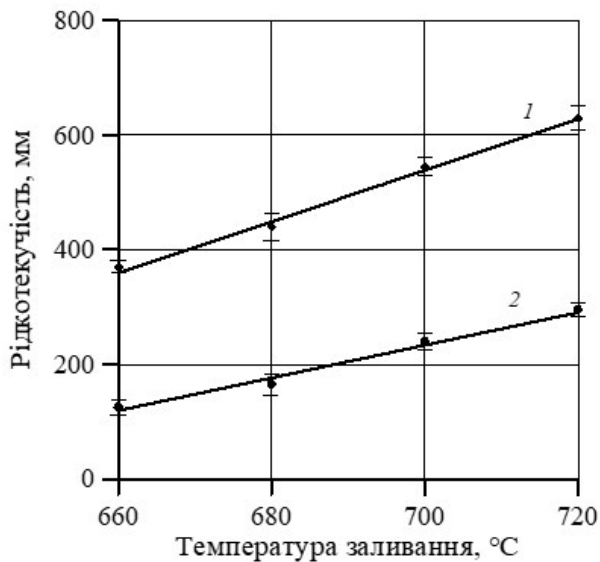
Нанодисперсні частинки карбіду кремнію розмірами до 200 нм є матеріалами з розвиненою вільною



а



б



в

Рис. 1. Вплив температури заливання на рідкотекучість вторинного сплаву АК12: а – вихідний сплав; б – кількість модифікатора 0,1 %; в – кількість модифікатора 0,2 %; 1 – ПГФ; 2 – кокіль

тривалим часом знаходження металу в рідкому стані. Підвищення кількості карбіду кремнію сприяє зростанню кількості додаткових центрів кристалізації, які спричиняють початок усадки за більш високих температур і, як наслідок призводять до її зменшення.

Механізм модифікування силумінів дрібнодисперсними порошками необхідно пояснювати з позиції зародкоутворення. Під час введення у розплав порошку карбіду кремнію в ньому утворюються і зберігаються дисперсні колоїдні або кластерні часточки. Вони потенційно можуть виступати зародками кристалізації, що в свою чергу сприяє зменшенню лінійної усадки. Таке ствердження підтверджується і дослідженням об'ємної усадки (рис. 3). Внаслідок швидкої кристалізації розплаву з додатковими центрами кристалізації коефіцієнт об'ємної усадки зменшується з 28 до 20 %

Реалізація такої технології може повною мірою забезпечити отримання якісних виливків під час використання вторинного матеріалу АК12.

Під час введення модифікатора здійснювали постійне перемішування, що створює так звані сили в'язкого тертя, які зменшують поверхневий натяг на межі твердої і рідкої фази [10–13].

Внаслідок зміни поверхневого натягу і енергії активації зменшується робота утворення зародків кристалізації, і збільшується ймовірність зародження твердої фази, що, в свою чергу, збільшує швидкість кристалізації. Спостерігається позитивний вплив зародження твердої фази, перетворюючи часточки карбіду кремнію на активні центри кристалізації. З літературних джерел відомо, що карбід кремнію погано змочується алюмінієм. Щоб часточки порошку карбіду кремнію стали центрами кристалізації необхідно сформувати на їх поверхні монокристалічний шар з параметрами ґратки, які наближаються до чистого

поверхнею [7, 8]. Високі фізико-механічні характеристики SiC пояснюють міжатомним зв'язком. Атоми в карбіді кремнію пов'язані між собою ковалентним зв'язком, який є найбільш сильним у природі і обумовлює в кристалах високу температуру плавлення, твердість і хімічну стійкість. Механізм впливу дисперсних частинок карбіду кремнію на формування структури доєвтектичних алюмінієвих сплавів під час кристалізації полягає в тому, що основна їх маса виштовхується фронтом кристалізації в рідку фазу і бере участь у подрібненні структурних складових сплаву. Частинки карбіду кремнію сприяють також дисперсному зміцненню сплаву, оскільки дисперсні фази є додатковими бар'єрами для переміщення дислокацій, а отже, підвищують характеристики міцності ливарних алюмінієвих сплавів. Така дія модифікатора підтверджується дослідженнями лінійної усадки. Встановлено, що підвищення вмісту модифікатора до 0,2 % сприяє зменшенню лінійної усадки (рис. 2). В той же час підвищення температури сприяє збільшенню загальної лінійної усадки, що пов'язано із

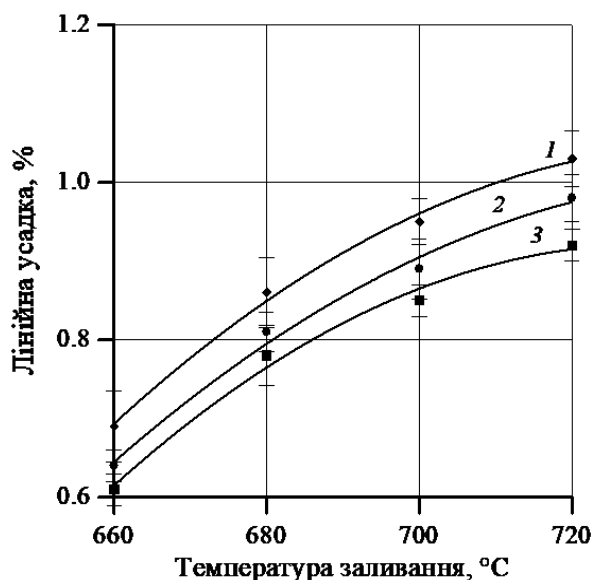


Рис. 2. Вплив температури заливання на лінійну усадку вторинного сплаву системи алюміній – кремній (силумін) при додаванні різної кількості модифікатора (SiC): 1 – вихідний; 2 – 0,1 %; 3 – 0,2 %

алюмінію і забезпечують змочування часточок розплавом.

Металографічні дослідження підтверджують результати таких досліджень: з підвищенням температури заливання збільшується кількість частки евтектичного кремнію, що добре погоджується із результатами робіт [13–18]. Розрахунки авторами робіт підтверджують, що введення ультрадисперсного модифікатора карбіду кремнію підвищує кількість центрів кристалізації.

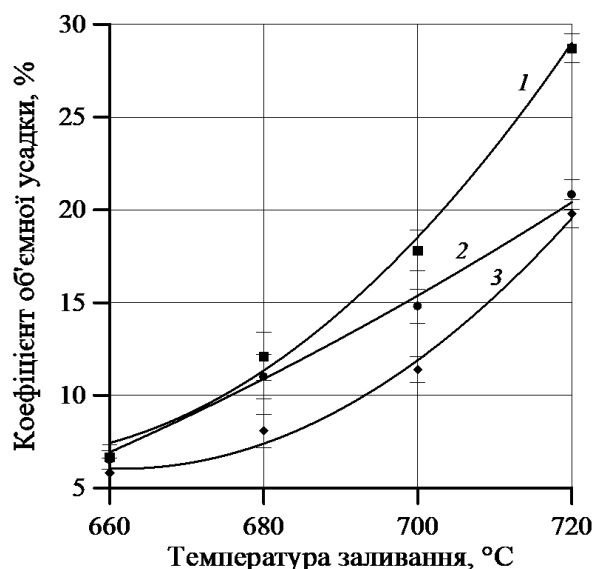
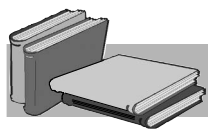


Рис. 3. Вплив температури заливання на коефіцієнт об'ємної усадки вторинного сплаву системи алюміній – кремній (силумін) при додаванні різної кількості модифікатора: 1 – вихідний; 2 – 0,1 %; 3 – 0,2 %

### Висновки та перспективи дослідження

Жоден з модифікаторів, які відомі на даний час, не має повного набору необхідних властивостей. Тому з технологічної точки зору кращими будуть ті, які мають найкращі поєднання фізико-хімічних властивостей.

Запропоновані технічні рішення модифікування сплавів вторинного сплаву АК12 можна застосовувати в технологічних процесах виготовлення виливків, що дозволить підвищити якість литої металопродукції за економного використання енергоресурсів і матеріалів на її виробництво.

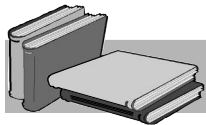


## ЛІТЕРАТУРА

- Гавриленко Б.Б. Економіко-правові важелі раціонального природокористування. Запоріжжя: Поліграф, 2004. 144 с.
- Алексахин А.В., Хмельницкая Н.В., Сиваева Е.К. Эффективность использования вторичных алюминиевых сплавов в литейном производстве. *Экономические проблемы литейного производства России: тез. докл. Всерос. конф.* Пенза, 1991. С. 52–54.
- Доценко Ю.В., Селівьорстов В.Ю., Насонов Д.М., Насонов М.М. Перспективи поліпшення властивостей вторинних ливарних сплавів системи Al-Si з використанням процесу модифікування. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»*. ITMM, 2021. С. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022>
- Калинина Н.Е., Калиновская А.Е., Калинин В.Г. и др. Особенности наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 7 (94). С. 23–26.
- Ершов Г.С., Бычков Ю.Б. Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья. Москва: Металлургия, 1979. 192 с.
- Куцова В.З., Елагин А.С. Структура, фазовый состав и свойства сплава АК7ч с добавками стронция, титана и бора. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*. 2010. Вып. 53. С. 52–57.
- Костин В.А., Григоренко Г.М., Жуков В.В. Модифицирование структуры сварных швов высокопрочных низколегированных сталей наночастицами тугоплавких металлов. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2016. Вып. 89. С. 93–98.

8. Сабуров В.П., Еремин Е.Н., Черепанов А.А., Миннеланов Г.Н. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами. Омск: ОмГТУ, 2002. 257 с.
9. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. Москва: Metallurgia, 1975. 248 с.
10. Комаров О.С., Волосатиков В.И., Проворова И.Б., Комарова Т.Д., Барановский К.Э. Наноразмерные и ультрадисперсные частицы в литейных технологиях. *Литье и металлургия*. 2014. № 2. С. 42–46.
11. Хрычиков В.Е., Калинин В.Т., Кривошеев В.А., Доценко Ю.В., Селиверстов В.Ю. Ультрадисперсные модификаторы для повышения качества отливок. *Литейное производство*. 2007. № 7. С. 2–5.
12. Косинцев В.А., Потысьев В.М., Захаров В.А. и др. Прогрессивные способы обработки алюминиевых расплавов перед разливкой. *Технология автомобилестроения*. 1986. № 2. С. 3–6.
13. Богданова Т.А., Довженко Н.Н., Гильманшина Т.Р. и др. Структурообразование литейных алюминиевых сплавов при литье под низким давлением: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 164 с.
14. Никулин, Л.В., Халтурин А.И., Никулин И.Л. О модифицировании алюминиево-кремниевых сплавов при литье под давлением. *Литейное производство*. 2008. № 3. С. 19–22.
15. Крушенко Г.Г., Фильков М.Н. Модифицирование алюминиевых сплавов нанопорошками. *Нанотехника*. 2007. № 12. С. 58–64.
16. Деев В.Б., Селянин И.Ф., Пономарева К.В., Алхимов В.Н., Бинас О.В. Модифицирующий эффект физических воздействий на расплавы в ресурсосберегающих технологиях литья алюминиевых сплавов. URL: [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2012\\_1/pdf/266deev.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2012_1/pdf/266deev.pdf)
17. Слетова Н.В., Чайкин В.А. Технология рафинирования и модифицирования Al-сплавов с применением экологически чистых препаратов, обеспечивающих стабильные показатели качества отливок. Москва: МГОУ, 2013. 144 с.
18. Слетова Н.В., Создание препаратов для рафинирования и модифицирования Al-сплавов, обеспечивающих стабильные показатели качества отливок: дисс. канд. техн. наук. Москва, 2014. 185 с.

Надійшла 24.11.2021



## REFERENCES

1. Gavrilenko, B.B. (2004). Economic and legal importance of rational environmental management. Zaporizhzhia: Poligraf, 144 p. [in Ukrainian].
2. Aleksahin, A.V., Kmel'nitskaya, N.V., Sivaeva, E.K. (1991). Efficiency of using secondary aluminum alloys in foundry. *Ekonomicheskie problemy liteinogo proizvodstva Rossii. Economic problems of foundry production in Russia*, Penza, pp. 52–54 [in Russian].
3. Dotsenko, Yu.V., Seliv'orstov, V.Yu., Nasonov, D.M., Nasonov, M.M. (2021). Prospects for polishing the authorities of secondary livery alloys in the Al-Si system during the modification process. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Informatsiini tekhnologii v metallurgii ta mashinobuduvanni." Materials of the International Scientific and Technological Conference "Information Technology in Metallurgy and Machinery Manufacturing"*, ITMM, pp. 28–32, doi: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022> [in Ukrainian].
4. Kalinina, N.E., Kalinovskaya, A.E., Kalinin, V.G. et al. (2012). Features of nanomodification of multicomponent nickel alloys. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Aviation and space engineering and technology*, no. 7 (94), pp. 23–26 [in Russian].
5. Ershov, G.S., Bychkov, Yu.B. (1979). High-strength aluminum alloys based on secondary raw materials. Moscow: Metallurgiya, 192 p. [in Russian].
6. Kutsova, V.Z., Elagin, A.S. (2010). Structure, phase composition and properties of the AK7ch alloy with additions of strontium, titanium and boron. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Starodubovskie chteniya. Construction. Materials Science. Mechanical engineering. Series: Starodubov Readings*, iss. 53, pp. 52–57 [in Russian].
7. Kostin, V.A., Grigorenko, G.M., Zhukov, V.V. (2016). Modification of the structure of welded joints of high strength low alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Construction, material science, mechanical engineering*, iss. 89, pp. 93–98 [in Russian].
8. Saburov, V.P., Eremin, E.N., Cherepanov, A.A., Minnелanov, G.N. (2002). Modification of steels and alloys with dispersed inoculators. Омск: ОмГТУ, 257 p. [in Russian].
9. Elagin, V.I. (1975). Alloying of wrought aluminum alloys with transition metals. Moscow: Metallurgiya, 248 p. [in Russian].
10. Komarov, O.S., Volosatnikov, V.I., Provorova, I.B., Komarova, T.D., Baranovskiy, K.E. (2014). Nanosized and ultradispersed particles in casting technologies. *Lit'e i metallurgiya. Casting and metallurgy*, no. 2, pp 42–46 [in Russian].
11. Hrychikov, V.E., Kalinin, V.T., Krivosheev, V.A., Dotsenko, Yu.V., Seliverstov, V.Yu. (2007). Ultradispersed modifiers to improve the quality of castings. *Liteinoe proizvodstvo. Foundry*, no. 7, pp. 2–5 [in Russian].
12. Kosintsev, V.A., Potys'ev, V.M., Zaharov, V.A. et al. (1986). Progressive methods of processing aluminum melts before casting. *Tekhnologiya avtomobilestroeniya. Automotive technology*, no. 2, pp. 3–6 [in Russian].

13. Bogdanova, T.A., Dovzhenko, N.N., Gil'manshina, T.R. et al. (2015). Structural formation of casting aluminum alloys at low pressure casting. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 164 p. [in Russian].
14. Nikulin, L.V., Halturin, A.I., Nikulin, I.L. (2008). Modification of aluminum-silicon alloys during casting under pressure. *Liteinoe proizvodstvo. Foundry*, no. 3, pp. 19–22 [in Russian].
15. Krushenko, G.G., Fil'kov, M.N. (2007). Modification of aluminum alloys with nanopowders. *Nanotekhnika. Nanotechnics*, no. 12, pp. 58–64 [in Russian].
16. Deev, V.B., Selyanin, I.F., Ponomareva, K.V., Alkhimov, V.N., Binos, O.V. (2012). Modifying effect of physical influences on melts in resource-saving technologies of casting aluminum alloys. URL: [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2012\\_1/pdf/266deev.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2012_1/pdf/266deev.pdf) [in Russian].
17. Sletova, N.V., Chaykin, V.A. (2013). Technology of refining and modification of Al-alloys with the use of environmentally friendly preparations that provide stable quality indicators of castings. Moscow: MGOU, 144 p. [in Russian].
18. Sletova, N.V. (2014). Creation of preparations for refining and modification of Al-alloys, providing stable quality indicators of castings. Extended abstract of candidate's thesis. Moscow, 185 p. [in Russian].

Received 24.11.2021

**Summary**

**M.M. Yamshynskiy**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Assistant Professor, Associate Professor, e-mail: [yamshinskiy@ukr.net](mailto:yamshinskiy@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>, Web of Science ResearcherID: I-4267-2017

**V.Yu. Selivorstov**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Prof., Professor, e-mail: [seliverstovvy@gmail.com](mailto:seliverstovvy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

**I.V. Lukianenko**<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Senior Lecturer, e-mail: [lukianenkoiv@gmail.com](mailto:lukianenkoiv@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, Web of Science ResearcherID: J-7294-2017

**B.V. Kyvgylo**<sup>1</sup>, postgraduate, e-mail: [kyvgylo.bogdan@gmail.com](mailto:kyvgylo.bogdan@gmail.com)

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

<sup>2</sup>Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)

## Influence of modification with highly dispersed silicon carbide on the casting properties of the secondary alloy of the Al-Si system

*One of the main areas of application of aluminum is the aerospace and transport industries, which are constantly increasing the requirements for the properties of cast products. The use of aluminum as the main material for the manufacture of various parts of vehicles can significantly reduce their weight, which leads to a decrease in fuel consumption. In order to meet the requirements of the modern world, the work considers studies to improve the quality and increase the properties of products from the secondary aluminum alloy AlSi12.*

*Modern technologies for processing liquid aluminum alloy are analyzed. According to the results of an analytical review, it was found that modifiers that affect the size of the primary grain and the shape of inclusions of eutectic silicon are of the greatest interest. It was found that the modification processes do not change the chemical composition of the alloy, but rather contribute to a change in the size and shape of the structural components of the alloy.*

*The paper considers the influence of an ultradispersed SiC modifier with a particle size of up to 200 nm on the casting properties of secondary aluminum alloys: fluidity, linear and volumetric shrinkage.*

*The fluidity was studied in green sand and metal mould. It was found that the addition of 0.1 % SiC improves the fluidity of the secondary alloy from 560 to 630 mm for green sand mould and from 230 to 295 mm for a metal mould due to cleaning from non-metallic inclusions. A further increase in the SiC content to 0.2 % does not lead to an obvious increase in fluidity.*

*The study of linear shrinkage found that increasing the content of the modifier to 0.2 % contributes to its decrease. At the same time, an increase in the pouring temperature of the alloy promotes an increase in the total linear shrinkage, which is associated with the long residence time of the metal in the liquid state. As a result of the rapid crystallization of the melt with additional nucleation centers in the role of which are particles of the ultradispersed modifier, the coefficient of volumetric shrinkage decreases from 28 to 20 %.*

*The proposed technical solutions for the modification of alloys of the secondary alloy AlSi12 can be used in processes that will improve the quality of cast metal products with the economical use of energy resources and materials for its production.*

**Keywords**

*Modification, silicon carbide, secondary alloy, casting properties, fluidity, linear shrinkage.*