

М.С. Тренъов, аспірант кафедри «Ливарне виробництво», e-mail: djekgor4676@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0009-8899-6044>

О.І. Пономаренко, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри «Ливарне виробництво»,

e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>

С.А. Князєв, канд. техн. наук, майстер виробничого навчання кафедри «Матеріалознавство»,

e-mail: obmeninfo@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6422-3658>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)

Аналіз способів вводу наночасток в сплави на основі алюмінію

У сучасному світі розвиток науково-технічного прогресу відкриває нові можливості для впровадження наноматеріалів у різні галузі промисловості, включаючи металургію. Одним із найбільш перспективних напрямів є застосування наночастинок для поліпшення властивостей металевих сплавів, що дозволяє підвищити їх механічну міцність, корозійну стійкість, теплопровідність та інші характеристики. Використання наноматеріалів у ливарному виробництві також сприяє підвищенню ефективності технологічних процесів, скороченню витрат сировини та енергоресурсів, а також покращенню якості готової продукції.

Метою цієї роботи є розробка ефективного методу введення наночастинок фулеренів у алюмінієвий сплав з метою забезпечення рівномірного розподілу фулеренів у металі та покращення їх засвоюваності. У ході дослідження було запропоновано новий спосіб введення наночастинок фулеренів у сплав. Цей метод передбачає виготовлення спеціальних сумішей із наночастинок, які проходять обробку тиском у циліндричних формах, після чого суміші занурюються в розплавлений алюміній за допомогою так званого «колокольчика».

Результати дослідження підтвердили наявність фулеренових включень у сплаві АК12. Це було підтверджено за допомогою аналізу дифрактограм, які продемонстрували, що наночастинок рівномірно розподілилися по всьому об'єму сплаву. Дослідження мікроструктури зразків із верхньої та нижньої частин лиття показало однорідний розподіл фулеренів, що свідчить про ефективність запропонованого методу.

Цей метод є важливим кроком у розвитку технологій лиття, оскільки він забезпечує поліпшення структури та властивостей алюмінієвих сплавів без значного ускладнення технологічного процесу. Впровадження такого підходу в промислових масштабах може забезпечити підвищення якості продукції, зниження собівартості та економії ресурсів, що робить його перспективним для подальшого розвитку металургії.

Ключові слова: фулерени; наночастки; алюмінієвий сплав; лігатура; «колокольчик»; суміш; алюмінієвий порошок; хімічні властивості; рентгеноструктурний аналіз.

Вступ. На даний час існує нагальна потреба у перезавантаженні ливарного виробництва, у зв'язку з тим, що діючі технології одержання сплавів потребують удосконалення. Регламентовані стандартом марки сплавів в багатьох випадках не задовольняють постійно зростаючі вимоги фізико-механічних властивостей до створюваної новітньої техніки та обладнання. Для виробів з алюмінієвих сплавів ставляться завдан-

ня збільшення в 2...4 рази якості фізико-механічних властивостей, яке забезпечить підвищення циклічної довговічності та зменшення ваги заготовок деталей [1].

В сучасних підходах щодо вирішення завдань, пов'язаних з підвищенням фізичних та механічних властивостей деталей, які виготовляються за допомогою ливарного виробництва, можуть використовуватись різні нанодисперсні матеріали. Основними

галузями застосування наноматеріалів є машинобудування, хімічна промисловість, електротехніка, енергетика, електроніка, інформаційні і комп'ютерні технології, біологія, медицина, охорона навколишнього середовища [1].

В сьогоднішній на світовому ринку нанопродукції вже використовується безліч різних матеріалів, відсоткове співвідношення яких представлено на рис. 1.

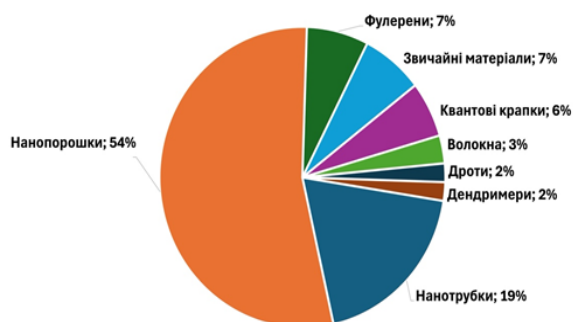


Рис. 1. Діаграма співвідношення наноматеріалів у відсотках на світовому ринку

Аналіз діаграми показує, що основна частка належить нанопорошкам, що може свідчити про їхню важливість або поширеність в промисловій галузі. Нанотрубки також займають значну частку (19 %). Інші категорії представлені меншими частками.

Ефективним методом підвищення якості відливок може бути застосування нових наноматеріалів в ливарному виробництві. Одним з таких матеріалів можуть бути фулерени, які можуть значно збільшити механічні властивості сплавів.

У 1985 році група дослідників — Роберт Керл, Харолд Крото, Річард Смоллі, Хіс і О'Брайєн при дослідженні мас-спектри парів графіту, отриманих при лазерному опроміненні (абляції) твердого зразка, виявили піки з максимальною амплітудою, що відповідали кластерам з 60 і 70 атомів вуглецю. Вони припустили, що ці піки відповідають молекулам C₆₀ і C₇₀, і висунули гіпотезу, що молекула C₆₀ має форму зрізаного ікосаедра симетрії Ih. Для молекули C₇₀ було запропоновано структуру з більш витягнутою еліпсоїдальною формою симетрії D_{5h}. Такі з'єднання отримали назву фулеренів [2].

Фулерени, як один з найбільш перспективних матеріалів у сучасній науці, мають потенціал для поліпшення фізико-хімічних властивостей матеріалів. Розподіл фулеренів у матриці сплаву є ключовим фактором для отримання бажаних характеристик.

На даний час існують різні способи вводу наночасток.

Авторами [3] було запропоновано метод отримання алюмінієво — мідного — графітного сплаву за допомогою мікролегуювання фулереном C₆₀. Автори використовують зразки Al-Ci-фулеренмістку сажу за спеціальною ливарно-деформаційною технологією. Фулеренмістку сажу з вмістом фулерену C₆₀ 1 і 10 % додавали з розрахунку введення фулеренів 0,02—1,1 % з використанням ефекту «фулеренової

гомеопатії» [4].

В роботі [5; 6] автори розглядають відому технологію введення дисперсних частинок у розплав, при якій досягається інтенсивне механічне перемішування розплаву і дисперсних частинок імпульсом, що обертається (вортекс-процес). Цей процес використовується для великого обсягу розплаву в умовах реального виробництва. Недоліками даного процесу є складність обладнання та необхідність вжиття заходів захисту розплаву від окислення та висока швидкість зносу імпульсера. У зв'язку з цим у виробничих умовах технологічно та економічно доцільне використання лише низькошвидкісних електроміксерів, обмежених швидкістю обертання імпульсера до 100—120 об/хв.

В роботі [7] наведено аналіз способів вводу наночасток:

1) введення частинок на поверхню розплаву з наступним перемішуванням;

2) введення частинок на дно тигля з наступним заливанням розплавом і перемішуванням;

3) введення частинок у розплав механічним тримачем (метод введення в «колокольчик») з наступним перемішуванням;

4) введення частинок у розплав при безперервному його перемішуванні зі швидкістю обертання імпульсера 100 об/хв.

Для реалізації останнього способу було сконструйовано та виготовлено дослідно-експериментальну установку (ОЕУ), що включає в себе піч, графітошамотний тигель, електроміксер, сталевий імпульсер, жолоб для подачі частинок у розплав.

В роботі [8] автори розглядають найбільш прийнятні способи введення ультрадисперсних порошків, це:

— одержання суспензії ультрадисперсних порошків безпосередньо в металі в результаті хімічної реакції розплаву з спеціальною речовиною (рафінуючий флюс);

— формування брикетів (таблеток) при спільному пресуванні порошків основи сплаву та ультрадисперсних порошків з подальшим їх зануренням у розплав;

— змішування компонентів спеціального флюсу з частинками, нанесення суміші на поверхню рідкого металу або в капсулі під дзеркало розплаву та витримка його до припинення реакції між флюсом та сплавом;

— метод використання газу-носія полягає в тому, що розплав металу-матриці, що знаходиться в нерухомій ємності, струменем газу порціями вводять частинки зміцнюючої фази;

— можливе введення ультрадисперсних порошків у складі складних флюсів. Ультрадисперсні порошки змішують з компонентами спеціального флюсу, поміщають у капсулу або пресують у таблетки та вводять у розплав при температурі 723—850 °С, в якому розплавлений метал руйнує оболонку капсули або таблетки, а флюс допомагає рівномірно розподілити тверді частинки всередині металу. Зазначається, що спосіб твердих флюсів дає більш стабільні ре-

зультати, ніж вдування твердої фази інертним газом або її механічне замішування. У роботі [9] наведено дослідження технологічного процесу отримання композитних матеріалів шляхом введення в алюмінієвий розплав механічним замішуванням частинок SiC з додаванням лігатури, до складу якої входить титан і другий варіант введення в алюмінієві розплави пресованих.

Однак кожен з наведених методів має свої недоліки. Тому вдосконалення методу вводу наночастинок в сплав, з метою покращення фізико-механічних

властивостей заготовок деталей є актуальною темою для ливарного виробництва.

Метою даної роботи є розробка ефективного методу введення наночастинок у алюмінієвий сплав, поліпшення засвоюваності фулеренів та їх рівномірного розподілу по всьому сплаву.

Матеріал і методи досліджень. В якості основного матеріалу дослідницької роботи було вирішено взяти фулерен C60, які вводили в алюмінієвий сплав АК 12 ДСТУ 2839-94, хімічний склад якого наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву АК12 ДСТУ 2839-94 [%]

Al	Si	Fe	Mn	Ti	Cu	Zr	Mg	Zn	Домішки, всього
84,3–90	10–13	до 1,5	до 0,5	до 0,1	до 0,6	до 0,1	до 0,1	до 0,3	2,7

Фулерени — одна з кількох алотропних модифікацій вуглецю, яка має ідеальну форму футбольного м'яча, яку наведено на рис. 2.

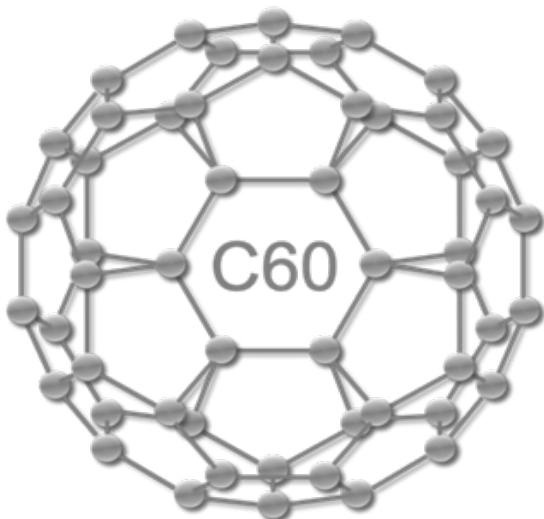


Рис. 2.

Фулерен C60

Фулерен C60 має чорний колір, в інертному середовищі стійкий до 1200 К, густина — 1,69 г/см³ (для порівняння у графіту — 2,3 г/см³, алмазу — 3,5 г/см³), ширина забороненої зони — 1,5 еВ, має низьку теплопровідність та нерозчинність у воді. C60 після обробки високим тиском має високі значення твердості, які в декілька разів більші за твердість алмазу [2].

Експериментальні результати. В роботі було запропоновано виготовити спеціальну суміш частинок фулеренів з алюмінієвим порошком ПА-4, хімічний склад якого наведено в табл. 2.

Для виготовлення суміші використовувався спеціальний змішувальний барабан, який зображений на рис. 3, в котрому виготовляли суміш протягом 24 годин, при швидкості обертання 60 обертів за хвилину.

Всього було виготовлено три види суміші. Використовували ПА-4 у кількості 15 г та додавали фулерени у кількості 0,5 г, 2,5 г, 3,5 г.

Після виготовлення сумішей, їх було засипано в

Таблиця 2

Хімічний склад ПА-4

Марка порошку	Насипна щільність, г/см ³	Активний алюміній, %	Домішки, не більше, %			
			Fe	Si	Cu	Волога, не більше
ПА-4	0,96	98	0,35	0,4	0,02	0,2

циліндричні форми розміром $h = 20$ мм, $d = 20$ та оброблено тиском на лабораторному пресі П-125. Усі зразки були спресовані під тиском 150 МПа. Зразок з 3,5 г фулеренів обробки тиском не піддався, зазнав руйнування та не отримав необхідної міцності.

Для проведення плавки було обрано індукційну піч ІСТО.16.

Плавка сплаву разом з лігатурою проводилась з наступними показниками роботи індукційної печі: потужність, кВт: споживана — від 50 до 60, Сила струму, А — від 90 до 100, коефіцієнт потужності

$\cos\varphi \approx 0,98$.

Для вирішення питання засвоюваності та рівномірного розподілу фулеренів в алюмінієвому сплаві було вирішено виготовити еталонні зразки без додавання будь-яких лігатур. Для підтвердження рівномірного розподілу наночастинок по всьому сплаву було вирішено досліджувати зразки як з нижньої частини сплаву, так і з верхньої.

Було проведено дві плавки, перша плавка включала в себе додавання зразка з 15 г ПА-4 та 0,5 г фулерена, друга — включала зразок з 15 г ПА-4 та



Рис. 3. Спеціальний змішувальний барабан

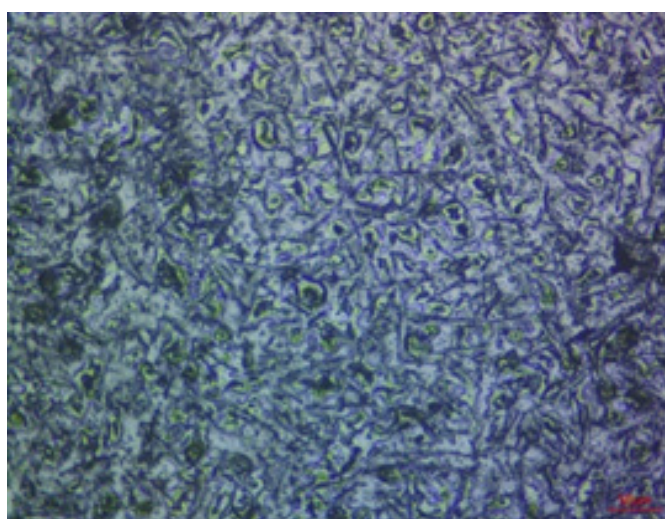
2,5 г фулерена. Зразки вводили в сплав при 650 °С за допомогою «колокольчика». Час розплаву зразків складав 6 хвилин. Виготовлений сплав розливали у спеціальні форми.

Після охолодження зразків, вони були оброблені на токарному верстаті.

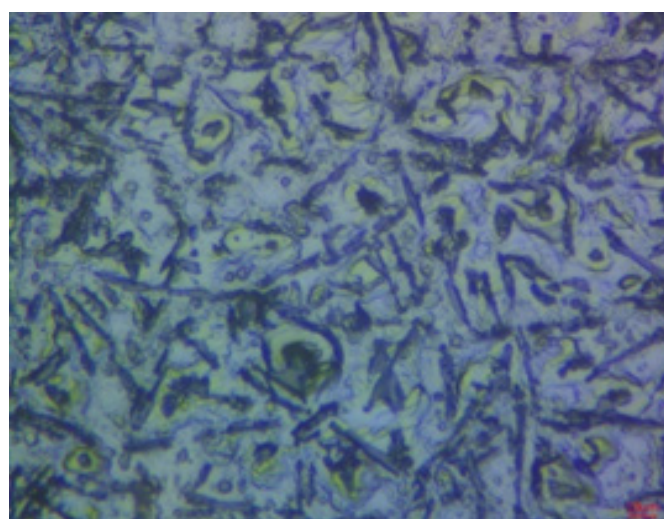
З метою встановлення елементного складу та структурного аналізу порівнювались зразки з чистого алюмінієвого сплаву АК12, а також з добавками 15 г ПА-4 та 0,5 г фулерена та 15 г ПА-4 та 2,5 г фулерена, структуру яких наведено на рис. 4—6.

Первинне травлення для виявлення мікроструктури відбувалося у розчині КОН. Для додаткового виявлення особливостей морфології мікроструктури застосовувався травник на основі розчину HF, який діяв на поверхні в режимі перетравлення.

Аналіз показує, що мікроструктура зразків однорідна, на фоні матричного твердого розчи-

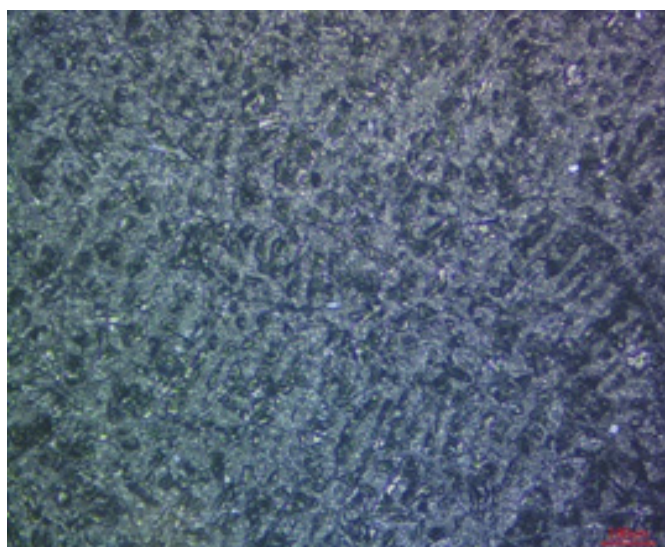


1

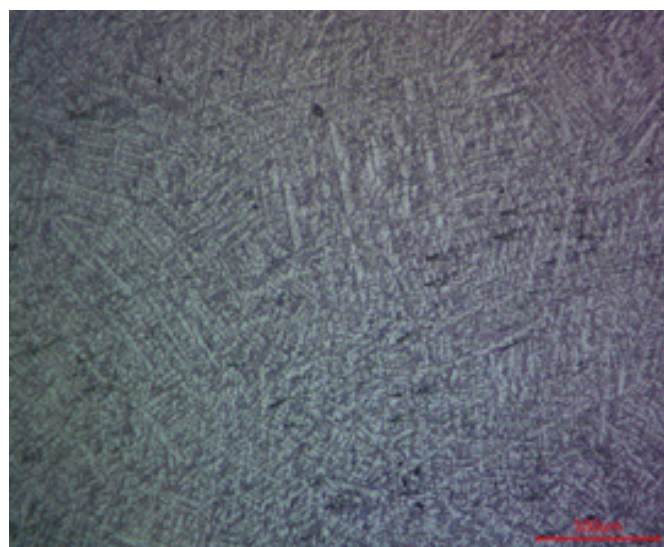


2

Рис. 4. Еталонний зразок АК12 у режимі перетравлення приближення: 1 — x200 та 2 — x500 разів

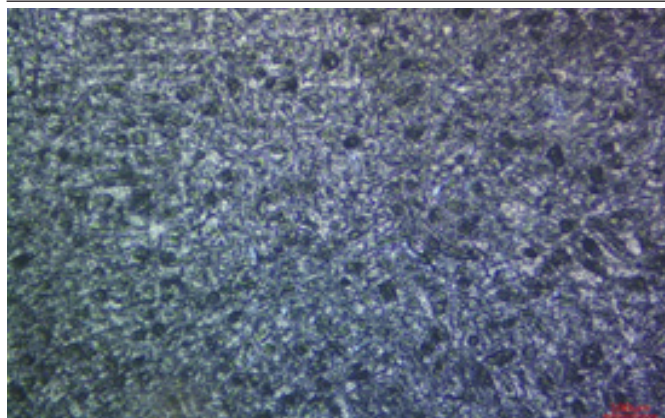


1

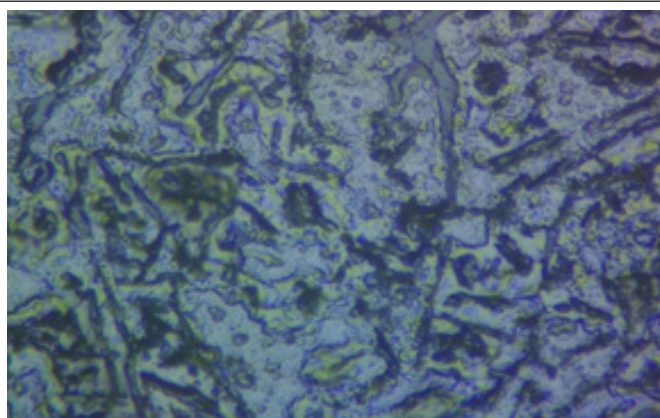


2

Рис. 5. Сплав АК12 з 15 г ПА-4 та 0,5 г фулерена, який відібрано з нижньої частини сплаву у режимі перетравлення приближення: 1 — x200 та 2 — x500 разів



1



2

Рис. 6. Сплав АК12 з 15 г ПА-4 та 2,5 г фулерена, який відібрано з верхньої частини сплаву у режимі перетравлення приближення: 1 — x200 та 2 — x500 разів

ну спостерігаються дрібні, рівномірно розміщені конгломерації (імовірно кремній) з розмірами, які не перевищують 10 мкм, що позитивно впливає на комплекс механічних характеристик. На рисунку 6 включення частково мають пластинчасту морфологію, з розміром пластин у перетині не більше ніж 3 мкм. У режимі перетравлення прослідковується загальна структура первинної кристалізації з сильно визначеною дендритною будовою. Розмір комірок міждендритного простору складає у середньому 50 мкм. Сам простір, після перетравлення, рельєфний і за даними виміру мікротвердості більш пластичний. В осях дендритів прослідковується наявність голкоподібних включень, які за морфологією нагадують інтерметалідні з'єднання, що сформувалися за участю заліза. Цей факт додатково підтверджується вимірами мікротвердості, що показали майже подвійний її приріст саме у просторі осей дендритів.

Також на зразку АК12 з 15 г ПА-4 та 0,5 г фулерена, який відібраний з нижньої частини сплаву (рис. 4) присутня модифікована структура з дуже дисперсними включеннями кремнію (товщина пластин 3—10 мкм), яка має рівномірний характер по всій площі шліфа, що в свою чергу підтверджує модифікування сплаву та рівномірний розподіл фулерена по всьому сплаву.

Окрім структурного аналізу ще було проведено рентгеноструктурний аналіз на дифрактометрі ДРОН-4 в мідному випромінюванні з фільтром — монохроматором.

Під час проведення рентгеноструктурного аналізу отримано дифрактограми з модифікуючого порошку, 15 г ПА-4 та 2,5 г фулерена та чистого сплаву АК12. Перша лінія програмою автоматично не ідентифікована. 6, 10, 11, 13 — лінії кремнію. Лінії 7, 9, 12 — лінії алюмінію. Основна відмінність — це зміна текстурованості ліній. Так на зразку з чистого сплаву АК12 спостерігається типова для алюмінію текстурованість, що підтверджується дослідженнями [8], а на зразку № 3 спостерігається зміна текстурованості. Лінії алюмінію у порошок свідчать про його забрудненість, яка вірогідно відбулася в процесі підготовки шихти. Лінії 1—5 та 8 — лінії фулеренів. Розшифровка дифрактограм проводилась у програмі MACH3.

Дифрактограма, яка зображена на рис. 7, показує результати рентгенівської дифракції для трьох різних зразків: зразок чистого фулерену (C60), зразок фулерену у поєднанні з алюмінієм (Al+C60) та отриманий зразок в ході проведення експерименту (АК12 з 15 г ПА-4 та 2,5 г фулерена). Графіки розташовані один під одним для порівняння.

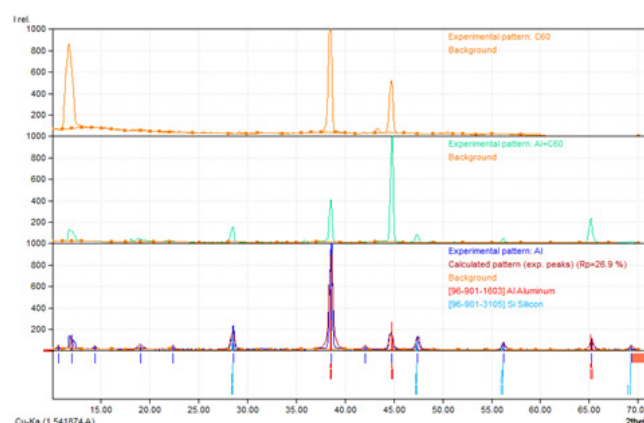


Рис. 7. Дифрактограми з модифікуючого порошку, зразка АК12 з 15 г ПА-4 та 2,5 г фулерена та еталонного АК 12

Верхній графік (помаранчевий) показує зразковий паттерн для чистого фулерена (C60). На графіку видно кілька піків, що відповідають кристалічній структурі C60. Середній графік (зелений) показує зразковий паттерн для суміші алюмінію і фулерена (Al+C60). Піки на графіку різняться від тих, що були у чистого C60, що свідчить про зміну структури при додаванні алюмінію.

Нижній графік (синій, червоний та фіолетовий) показує експериментальний паттерн для алюмінію АК12. Піки високої інтенсивності вказують на характерні міжплощинні відстані в кристалічній структурі алюмінію.

Червоні позначки (Calculated pattern) відповідають розрахунковим пікам для алюмінію, показуючи відхилення від експериментальних даних. Також присутні додаткові піки, які можуть відповідати домішкам або іншій фазі (наприклад, кремнію — Si), що підтверджено додатковою інформацією знизу

графіка.

Графік демонструє зміну кристалічної структури при додаванні фулеренів до еталонного алюмінію АК12, що підтверджується зміною в інтенсивності і положенні піків на дифрактограмі. Та опосередковано підтверджує такий модифікатор як фулерен.

Висновки

1. У сучасному світі, розвиток науково-технічного прогресу привів до впровадження наноматеріалів у різні галузі промисловості, включаючи металургію. Використання наноматеріалів у ливарному виробництві відкриває широкі перспективи для покращення властивостей металевих сплавів та виливків.

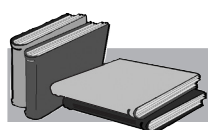
2. В дослідженні розроблено новий спосіб введен-

ня наночастинок фулеренів, який складається з виготовлення сумішей, обробки їх тиском в спеціальних циліндричних формах та з подальшим зануренням у сплав алюмінію за допомогою «колокольчика».

3. Хімічний аналіз виплавлених зразків сплаву АК12 в чистому вигляді, а також з різним вмістом наночастинок фулеренів, показав незмінність хімічного складу сплаву АК12 від кількості фулеренів.

4. Під час проведення аналізів отримано підтвердження фулеренових включень у сплаві АК12, що підтверджується дифрактограмою.

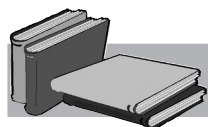
5. Доведено, що даний спосіб вводу фулеренів дозволяє рівномірно розподілити фулерени по всьому об'єму сплаву, що підтверджується модифікуванням структури сплаву АК12 в відібраних зразках з верхньої та нижньої частини сплаву.



ЛІТЕРАТУРА

1. Lakhtakia A., Messier R. Nanotechnology: A New Frontier for Advanced Manufacturing. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2005. № 5(1). P. 1—10.
2. C60: Buckminsterfullerene / Kroto H. W. et al. *Nature*. 1985. № 318(6042). P. 162—163.
3. Manika I., Maniks K. (1997). Hardness and plasticity of fullerene and graphite crystals. *Fullerene Science and Technology*. 1997. № 5(2). P. 149—158.
4. Gleiter H. (1989). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Zeitschrift für Metallkunde*. 1989. № 80(11). P. 795—800.
5. The mystery of molten metal / Sobczak N., Sobczak J., Asthana R., Purgert R. *China foundry*. 2010. Vol. 7. Iss. 4. P. 425—437.
6. Гаврилин И. В., Белоусов Н. Н. Проблемы теории и практики литых композиционных материалов с алюминиевой матрицей. Тез. докл. на 26-й сессии науч. совета: Композиционные материалы и опыт их применения. Киев, 1990.
7. Панфілов А. А. Синтез комбінованих алюмоматричних композиційних матеріалів з використанням матеріалів з використанням IN-SITU процесу. *Наука. Техніка, розробка. УІЦ*. 2014. № 2. С. 67—69.
8. Capuzzi S., Timelli G. Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. *Metals*. 2018. № 8(4), 249. <https://doi.org/10.3390/met8040249>
9. Управління структурою металу алюмінію за допомогою введення в розплав дисперсних частинок карбіду кремнію / Чернишова Т. А., Панфілов А. В., Кобельєва Л. І., Тилкіна М. М. *Фізика та хімія. Обробка матеріалів*. 1993. № 3. С. 129—137.

Надійшла 19.10.2024



REFERENCES

1. Lakhtakia, A., & Messier, R. (2005). Nanotechnology: A New Frontier for Advanced Manufacturing. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 5(1), 1-10.
2. Kroto, H., Heath, J., O'Brien, S., Curl, R., & Smalley, R. (1985). C60: Buckminsterfullerene. *Nature*, 318(6042), 162-163.
3. Manika, I., & Maniks, K. (1997). Hardness and plasticity of fullerene and graphite crystals. *Fullerene Science and Technology*, 5(2), 149-158.
4. Gleiter, H. (1989). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Zeitschrift für Metallkunde*, 80(11), 795-800.
5. Sobczak, N., Sobczak, J., Asthana, R., & Purgert, R. (2010). The mystery of molten metal. *China foundry*, 7(4), 425-437.

6. Gavrilin, I. V., & Belousov, N. N. (1990). Problemyi teorii i praktiki lityih kompozitsionnykh materialov s alyuminiyevoy matritsey [Problems of the Theory and Practice of Cast Composite Materials with an Aluminum Matrix]. Abstracts of Papers at the 26th Session of the Scientific Council: Composite Materials and Their Application Experience. Kyiv [in Russian].
7. Panfilov, A. A. (2014). Syntez kombinovanykh aliumomatrichnykh kompozytsiynykh materialiv z vykorystanniam materialiv z vykorystanniam IN-SITU protsesu [Synthesis of Combined Aluminum Matrix Composite Materials Using the IN-SITU Process]. *Science. Technology, Development. UIC*, (2), 67-69 [in Ukrainian].
8. Capuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. *Metals*, 8(4), 249. <https://doi.org/10.3390/met8040249>
9. Chernishova, T. A., Panfilov, A. V., Kobeleva, L. I., & Tylkina, M. M. (1993). Upravlinnia strukturoiu metalu aliuminiu za dopomohoiu vvedennia v rozplav dyspersnykh chastynok karbidu kremniiu [Control of Aluminum Metal Structure by Introducing Dispersed Silicon Carbide Particles into the Melt]. *Physics and Chemistry of Material Processing*, (3), 129-137 [in Ukrainian].

Received 19.10.2024

Summary

M.S. Trenov, Graduate Student of the "Foundry" Department,
e-mail: djekgor4676@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-8899-6044>
O.I. Ponomarenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor of the "Foundry" Department,
e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>
S.A. Kniaziev, PhD (Engin.), Master of Industrial Training of the "Materials Science" Department,
e-mail: obmeninfoserg@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6422-3658>

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

Analysis of Methods for Introducing Nanoparticles into Aluminum-Based Alloys

In the modern world, the development of scientific and technical progress opens up new opportunities for the introduction of nanomaterials in various industries, including metallurgy. One of the most promising directions is the use of nanoparticles to improve the properties of metal alloys, which allows to increase their mechanical strength, corrosion resistance, thermal conductivity and other characteristics. The use of nanomaterials in foundry production also contributes to increasing the efficiency of technological processes, reducing the consumption of raw materials and energy resources, as well as improving the quality of finished products.

The purpose of this work is to develop an effective method of introducing fullerene nanoparticles into an aluminum alloy in order to ensure uniform distribution of fullerenes in the metal and improve their digestibility. In the course of the study, a new method of introducing fullerene nanoparticles into the alloy was proposed. This method involves the production of special mixtures with nanoparticles, which undergo pressure treatment in cylindrical forms, after which the mixtures are immersed in molten aluminum with the help of a so-called "bell".

The results of the study confirmed the presence of fullerene inclusions in the AK12 alloy. This was confirmed by the analysis of diffractograms, which showed that the nanoparticles were uniformly distributed throughout the volume of the alloy. The study of the microstructure of samples from the upper and lower parts of the casting showed a homogeneous distribution of fullerenes, which indicates the effectiveness of the proposed method.

This method is an important step in the development of casting technologies, as it provides an improvement in the structure and properties of aluminum alloys without significantly complicating the technological process. The implementation of such an approach on an industrial scale can ensure an increase in product quality, a reduction in cost and resource savings, which makes it promising for the further development of metallurgy.

Keywords

Fullerenes, nanoparticles, aluminum alloy, ligature, "bell", mixture, aluminum powder, chemical properties, X-ray structural analysis.