
ОДЕРЖАННЯ ТА ОБРОБКА РОЗПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2021.01.003>

УДК 621.7.044.7:669.716

А. В. Нарівський, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, директор;

e-mail: opprs@ptima.liev.ua

А. С. Затуловський, д-р техн. наук; зав. відділу; e-mail: grizly1@rambler.ru

О. М. Фікссен, канд. техн. наук, пров. наук. співроб.; e-mail: vfixsen@i.ua

В. О. Щерецький, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: nmptima@ukr.net

О. А. Каранда, гол. технолог; e-mail: akaranda72@ukr.net

М. С. Горюк, канд. техн. наук, заст. зав. відділу; e-mail: gormak72@gmail.com

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

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ГЕТЕРОГЕННИХ ЕНДОГЕННИХ ТА ЕКЗОГЕННИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

Досліджено вплив комплексних магнітно-динамічних вібраційних дій на розплави ливарних алюмінієвих сплавів АК7, АК12, АК12М2МгН при одержанні литих композиційних матеріалів, що армовані дисперсними частинками. Вивчено чотири способи введення в алюмоматричні сплави зміцнюючих частинок, оцінено їх ефективність та перспективність нових технологій. Визначено переваги та недоліки кожного з методів ведення частинок у розплави, сформульовано рекомендації щодо доцільності їх використання. Виконано оцінку рівномірності розподілу зміцнюючих частинок в металевій матриці, розмір міжфазної поверхні та ступінь змочування частинок алюмінієвим розплавом. Встановлено вплив зміцнюючих часток на процеси формування поверхонь тертя та трибологічні властивості матеріалів. Показано зниження зносу композиційних матеріалів порівняно з алюмінієвим сплавом АК7 в 1,3–1,4 рази при однаковому коефіцієнті тертя. Збільшення тривалості електромагнітної обробки з вібрацією сприяє підвищенню зносостійкості КМ. Технологію, за якою зміцнюючі частинки (розміром 160–200 мкм) вводять у розплав лігатурою, можна впроваджувати для виробництва деталей триботехнічного призначення. Оптимальним режимом комплексної обробки визначено: індукція змінного магнітного поля МГД-обробки 0,07–0,09 Тл; амплітуда вібрації 0,4–0,5 мм, частота 100 Гц; тривалість обробки не менше 6 хвилин. При такій технології розміри зміцнювача не можуть бути меншими 100 мкм, що ефективно підвищує і механічні властивості КМ, за рахунок модифікування литої мікроструктури в алюмінієвій матриці. Для одержання композиційних матеріалів з підвищеними функціональними властивостями доцільно застосовувати високоенергетичні впливи, що можуть ефективно подрібнити зміцнювач безпосередньо в розплаві без його окислення або деградації, наприклад, плазмовою або лазерною обробками.

Ключові слова: литі композиційні матеріали, дискретне зміцнення, МГД-обробка, вібрація, механічне замішування, алюмінієві сплави.

Протягом останніх десятиліть, у зв'язку з ростом вимог до функціональних властивостей виробів, підвищується інтерес до литих композиційних матеріалів (ЛКМ) з металевою матрицею, що армована високомодульними та керамічними фазами. Такі композиційні матеріали (КМ) мають підвищені міцність, зносостійкість, добре працюють при підвищених температурах. Використання ЛКМ в вузлах тертя показало їх надійність та перспективність застосування замість традиційних підшипникових мідних сплавів. Серед ливарних технологій одержання ЛКМ найбільш поширеним є спосіб механічного змішування зміцнюючих частинок в розплав. Однак, при такому способі одержання композитів відбувається газонасичення і окислення розплаву в процесі його перемішування. Для ефективного змішування зміцнюючої фази рідкий метал необхідно перегрівати до високих температур, що призводить до утворення ливарних дефектів у виробах. Тому, досі цей метод є об'єктом досліджень та ведуться активні розробки нового обладнання та вдосконалення режимів змішування частинок в розплав [1]. Накопичений досвід та наукові результати дозволяють створювати ефективні технологічні процеси для одержання нових литих композиційних матеріалів, що відповідають вимогам сучасної техніки.

Процес лиття композиційних матеріалів з тугоплавкою зміцнюючою фазою складається з наступних технологічних операцій: підготовки матричного сплаву, введення в розплав частинок зміцнюючої фази, розливання розплаву у форми. Алюмінієвий сплав погано змочує частинки через високий поверхневий натяг на межі поділу фаз і окислення розплаву при розливанні на повітрі. Тверді частинки в рідкому середовищі коагулюють з утворенням конгломератів зміцнюючих частинок, які формують дефекти у виробах з ЛКМ. На поверхні частинок можуть бути сорбовані волога та гази, а також продукти процесів взаємодій зміцнюючих фаз з розплавом. У зв'язку з цим, виробництво ЛКМ з однорідною структурою можливо здійснити лише при додатковій гомогенізації розплаву різними впливами: механічними, ультразвуком та магнітними полями або відцентровими силами [2].

Вибір дисперсних добавок, їх тип та кількість в матриці композиційного матеріалу визначається конструкцією і умовами експлуатації майбутнього виробу, а також технологічними можливостями виробника. Для алюмінієвих ЛКМ в якості зміцнювача металічної матриці використовують багато керамічних та металічних матеріалів у вигляді частинок, вусів та волокон. В роботі [3] визначено вплив зміцнюючих фаз на наступні характеристики ЛКМ: міцність; розмірна стабільність в інтервалі температур; жаро- і термостійкість; трибологічні властивості; питома вага; електропровідність тощо.

В якості зміцнюючих елементів було використано штучно синтезовані частинки (Al_2O_3 , SiC), а також частинки кам'яного лиття, алюмосилікатів, шлаку та ін. (табл. 1).

Таблиця 1
Фізико-механічні характеристики зміцнюючих елементів ЛКМ

Матеріал	Стан	Щільність, кг/м ³	Температура плавлення, °С	ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6} / \text{град}$	Мікротвердість, кг/мм ²
Al_2O_3	кристалічний	3900	2050	8,0	3000
SiC	кристалічний	3200	2700	4,7-6,2	3000
ВК6 (карбід вольфраму-кобальту WC-Co)	кристалічний	14600	2785	5,8	2200
Шлак	склокристалічний	2800	1200	7-9	550-750
Каменелитий матеріал	склокристалічний	3000	1300	7-8	720-800
Шамот	кристалічний	2350	1800	5,5	–
Алюмосилікат	кристалічний	2500	1800	5,5	–

Одержання та обробка розплавів

Зазначені зміцнюючі елементи мають різну морфологію та властивості. Частинки порошку алюмосилікату, пористі з шорсткою поверхнею. Тверді склокристалічні частинки кам'яного лиття мають гострокутні грані, часто подовжену клиноподібну форму відколу. Склоподібні частинки шлаків – ізометричну форму з каверноподібним сколом граней. Форма частинок карбиду кремнію може бути рівноосною або витягнутою гострокутною з гладкою рівною поверхнею.

Із зазначених матеріалів карбід кремнію найбільш стійкий в розплаві алюмінію, карбід вольфраму менш стійкий термодинамічно, але він достатньо стійкий кінетично, так як хімічна реакція його відновлення алюмінієм є дуже повільною при температурах плавлення та лиття алюмінієвих сплавів, властивості цих матеріалів добре вивчені, можна використовувати готові порошки різної зернистості, а покриття металічного кобальту на поверхні порошоків сприяє процесу їх змочування рідким алюмінієм.

Досліджено вплив одночасних вібро- та магнітно-динамічної дій на формування структури в композиційному матеріалі, при механічному замішуванні неметалічних частинок в розплав матричного сплаву. Для проведення експериментів використовували адаптований однополюсний електромагніт установки для розливання чавуну і сталі (рис. 1). Плавку проводили в термостатированому тиглі (рис. 2), температуру якого регулювали терморегулятором по температурі розплаву, що контролювали за показниками термопари типу ХА. Тигель виготовлено з фторфлогопіту з внутрішньої ємністю: висота – 120 мм, діаметр – 77 мм.

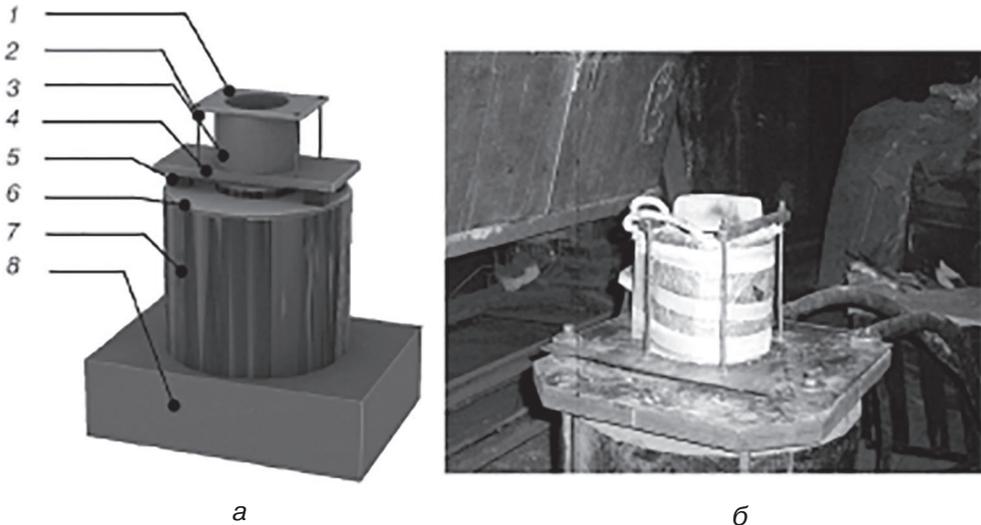


Рис. 1. Схема установки для МГД-обробки розплаву КМ (а): 1 – кріплення тигля; 2 – шпильки кріплення; 3 – тигель з нагрівачем електричного опору; 4 – сталевая пластина; 5 – демпфери; 6 – стіл; 7 – електромагніт; 8 – станина електромагніту; б – тигель, встановлений на електромагнітний пристрій

Накладання змінного магнітного поля викликає перемішування розплаву в усьому об'ємі тигля, при цьому поле швидкостей руху розплаву має тороподібну форму. Зміною напруги електромагніту в процесі проведення експериментів змінювали індукцію магнітного поля від 0,03 до 0,12 Тл. Перемішування розплаву відбувалося ламінарними його потоками з швидкістю руху 0,15–0,35 м/с.

Одночасно з магнітно-динамічним впливом на алюмінієвий розплав, магнітне поле викликало осциляційні коливання сталевий пластина (4), на якій був жорстко закріплений тигель (3), з частотою 100 Гц та амплітудою 0,1–0,5 мм. Для дослідження структури литого композиційного матеріалу, після замішування частинок у розплаві з використанням комплексної магнітно-динамічної дії та вібрації, в сталевий кокіль заливали метал і одержували зразки у вигляді циліндрів довжиною 85 мм та діаметром 16 мм, без прибуткової частини.

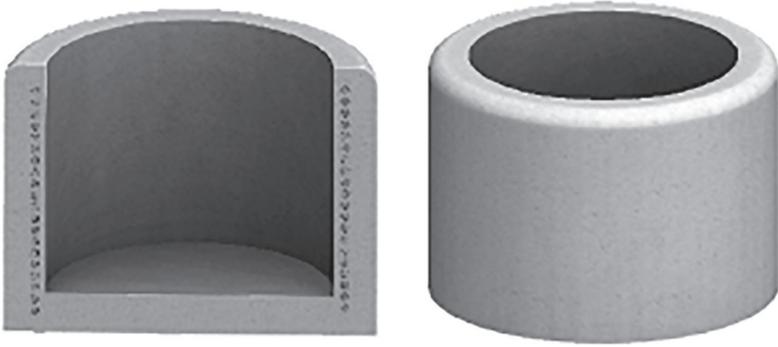


Рис. 2. Фторфлогопітовий термостатований тигель з вбудованою спіраллю нагрівача

В ході експериментів досліджено кілька варіантів введення зміцнюючих частинок карбідів розміром 160–200 мкм в рідкий розплав. У першому варіанті (рис. 3, а) розплавлення металу і замішування частинок проводили в двох плавильних печах. В одній плавили шихту і підігрівали розплав до температури 750–760 °С. Готовий розплав переливали в термостатований тигель, де знаходилися попередньо підігріті до 650–700 °С частинки SiC та BK. Потім вмикали магніт і в закріпленому тиглі на електромагнітному пристрої відбувалося замішування частинок. Після оброблення протягом 6 хв розплав з частинками заливали у форми.

На другому етапі (рис. 3, б) матричний сплав розплавляли, перегрівали до 750–760 °С і заливали термостатований тигель, а частинки вводили порціями на дзеркало розплаву під час МГД-вібраційної обробки.

В третьому варіанті (рис. 3, в) напівфабрикат композиційного матеріалу, що був виготовлений механічним замішуванням частинок у сплаві АК7 в твердо-рідкому стані при температурі 600–650 °С розчиняли в матричному алюмінієвому розплаві, що нагрівали до 750–760 °С при МГД-вібраційному перемішуванні протягом 5 хв. Після введення лігатури, ковшем відбирали зразок металу, який заливали в кокіль.

В четвертому варіанті (рис. 3, г) нагрів частинок порошку проводили на дні тигля, та заливали на них розплав при температурі 750–760 °С, з наступною МГД-обробкою і додаванням рафінуючого флюсу Arsal2125 в кількості 0,01 ваг. % від маси розплаву.

Встановлено, що збільшення інтенсивності і часу оброблення, застосування флюсу та різних матричних сплавів (АК7, АК12, АК12М2МгН), а також зміна швидкості та характеру руху розплаву в тиглі не впливають на ступінь засвоєння частинок. Визначили, що середня об'ємна кількість частинок в циліндричному зразку в верхній, середній та нижній частинах не перевищує 1 %мас. для частинок карбіду кремнію та 0,2–0,3 %мас. для частинок BK. На рис. 4 представлено мікроструктуру КМ, одержану шляхом засипання порошку на дзеркало розплаву, в тиглі без термостатичного підігріву при індукції магнітного поля 0,07–0,08 Тл тривалості обробки 2 хв. При такому способі температура розплаву швидко знижується з 750 до 610 °С, в результаті чого він через 1 хвилину переходить у рідко-твердий стан. Потім ще одну хвилину перемішували в'язкий розплав і ковшем відбирали проби для дослідження мікроструктури матеріалу. В структурі КМ спостерігаються включення у вигляді скупчень частинок карбіду кремнію, які розташовані нерівномірно у виливку.

Для одержання КМ вводили лігатуру литого напівфабрикату в твердо-рідкому стані в нагрітій до 760–770 °С сплав АК7, витримували в термостатованому тиглі до повного його розчинення, знімали шлак і проводили комплексну електромагнітно-вібраційну обробку з (рис. 3, в) за режимом: індукція змінного магнітного поля 0,07–0,09 Тл, амплітуда вібрації тигля з розплавом 0,1–0,5 мм; частота вібрації – 100 Гц. Проби металу відбирали через 3 і 6 хвилин після комплексної його обробки.

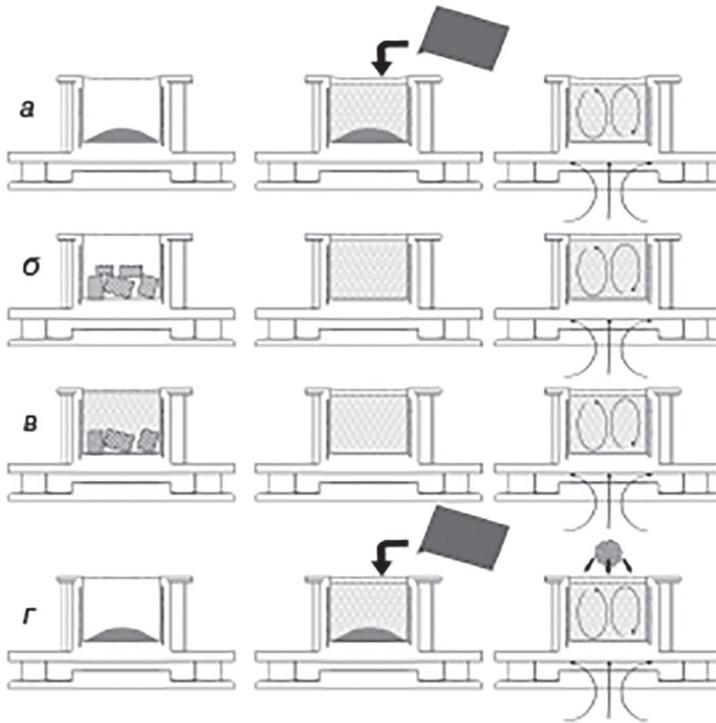


Рис. 3. Способи введення зміцнюючих частинок в алюмінієвий розплав

Під впливом перемішування розплаву і вібрації відбувався рівномірний розподіл зміцнюючих частинок в усьому обсязі матричного сплаву при видаленні з нього оксидних і розчинених газів та диспергуванні їх конгломератів і скупчень. Мікроструктури композиційного матеріалу, оброблені за цим режимом, наведені на рис. 5. Кількість частинок карбіду кремнію в композиційному матеріалі становить 2–5 об %. При збільшенні тривалості МГД-вібраційної обробки до 6 хв у мікроструктурі зразків спостерігали більш рівномірний розподіл частинок при зменшенні кількості конгломератів в усіх частинах виливків (рис. 5, б).

Визначили, що при обробленні частинками карбіду кремнію, які змочуються розплавом, на границі розподілу фаз немає перехідної зони з вторинних сполук, або інших включень (рис. 5). При цьому тривалість обробки розплаву не впливає на форму і розмір частинок. Це свідчить про те, що така технологія дозволяє досить швидко досягти розподілу частинок розміром 160–200 мкм в матричному силуміновому розплаві і не впливає на цілісність частинок карбідів SiC та BK.

Трибологічні властивості одержаних матеріалів вивчали на дослідних зразках зі сплаву АК7 в литому стані без зміцнюючих частинок і з додаванням SiC та BK на установках СМТ-1 і МТ 69. При терті циліндричних зразків діаметром 10 мм по контртілу зі сталі 50Х

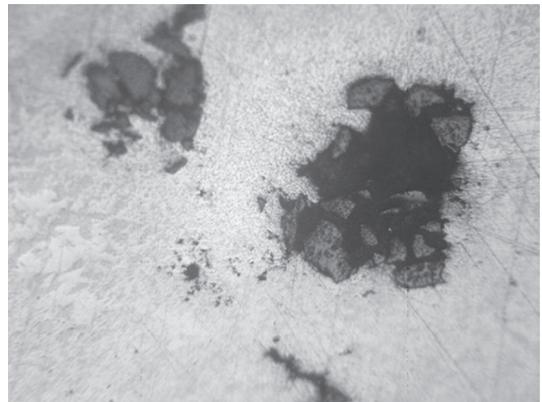


Рис. 4. Мікроструктура литого композиційного матеріалу, одержаного з використанням засипання порошку на дзеркало розплаву і комплексної обробки (індукція магнітного поля 0,07–0,08 Тл; тривалість обробки – 2 хв)

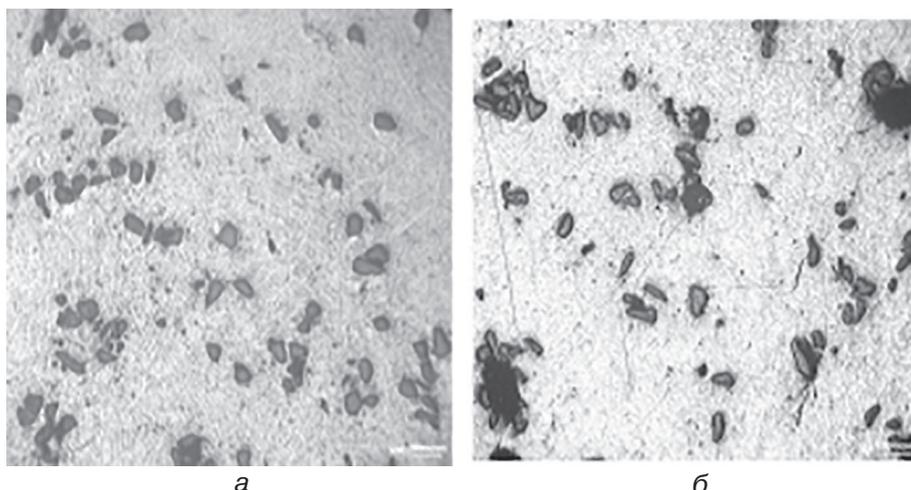


Рис. 5 Мікроструктури (x50) композиційного матеріалу, при обробленні композиційною лігатурою при комплексних діях на розплав: а – тривалість комплексної обробки 3 хв; б – тривалість 6 хв

з твердістю HRC 45–50 в умовах сухого тертя; швидкість ковзання – 0,2 м/с, навантаження – 6,4 кг/см². Втрату маси зразків визначали як її різницю між промитим, знежиреним зразком до і після випробування. Похибка зважування складала 12×10^{-3} г на вагах ВЛТ-1 ТУ25.06.385-72. Час випробування зразків: 30 хв при мінімальному навантаженні та 4 години – на максимальному. Зміни ваги зразків в процесі випробування контролювали через кожну годину (табл. 2).

Таблиця 2

Результати трибологічних досліджень сплаву АК7 з частинками SiC та BK6

Номер п\п	Матеріал	Втрата ваги за кожну годину, г					Коефіцієнт тертя
		1-а год	2-а год	3-я год	4-а год	загальна	
1	АК7	0,0264	0,0279	0,0253	0,0272	0,1068	0,32
2	АК7+SiC (3 хв. обробки)	0,0227	0,0231	0,0219	0,0214	0,0891	0,34
3	АК7+SiC (6 хв. обробки)	0,0190	0,0175	0,0201	0,0194	0,0760	0,34
4	АК7+BK6 (3 хв. обробки)	0,0231	0,0221	0,0211	0,0201	0,0864	0,32
5	АК7+BK6 (6 хв. обробки)	0,0202	0,0212	0,0202	0,0212	0,0828	0,3

За результатами трибологічних досліджень можна відзначити зниження зносу композиційних матеріалів, порівнюючи з сплавом АК7, який не обробляли за новою технологією, в 1,3–1,4 рази при однаковому коефіцієнті тертя при цьому змінюється.

Вигляд поверхні тертя зразків після трибологічних досліджень показано на рис. 6, а, б, в. Темні області на поверхнях є зонами ковзання, що вкриті розділовим шаром з продуктів зносу; більш світліші зони – це поверхні з подряпинами різної ширини. Чим більша площа розділового шару, тим нижчі показники зносу зразка. Тобто більш тривала електромагнітна обробка з вібрацією сприяє утворенню ширших зон ковзання (а, б) на поверхні контрольних зразків з матричного сплаву.

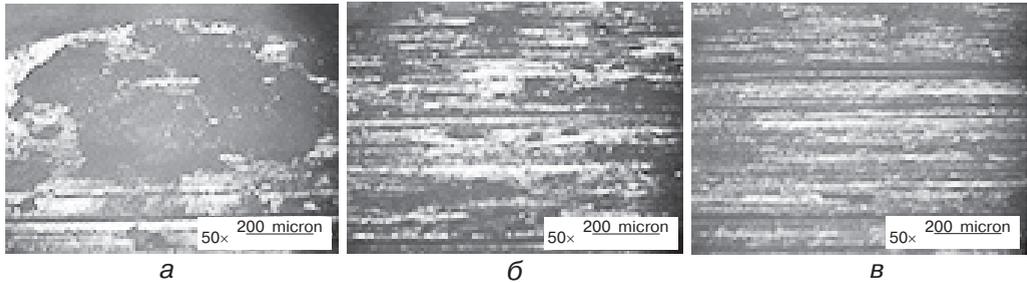


Рис. 6. Робоча поверхня зразків після випробування на установці СМТ-1: а – ЛКМ з SiC, комплексна обробка 6 хв; б – ЛКМ з SiC комплексна 3 хв; в – матричний сплав АК7

Технологію, при якій високомодульні частинки зміцнювачі 160–200 мкм вводяться у розплав лігатурою, можна застосовувати для виробництва деталей триботехнічного призначення. Оптимальний режим такого процесу визначено: індукція змінного магнітного поля при МГД-обробці 0,07–0,09 Тл; амплітуда вібрації тигля 0,4–0,5 мм, частота 100 Гц, тривалість обробки не менше 6 хвилин. При такій технології розміри зміцнювача не можуть бути меншими 100 мкм, що ефективно підвищує властивості КМ за рахунок модифікування литої мікроструктури в алюмінієвої матриці. Для одержання композиційних матеріалів з підвищеними механічними властивостями доцільно застосовувати високоенергетичні впливи, що можуть ефективно подрібнити зміцнювач безпосередньо в розплаві без його окислення або деградації, наприклад, плазмовою або лазерною обробками.

Список літератури

1. Разработка и получение литых износостойких металлических материалов с неметаллическим наполнителем на основе сырья и отходов предприятий Украины. Тема 5.42.08/302-93.333. ИПЛ. 1993.
2. Курганова Ю. А. Разработка и применение дисперсно упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в машиностроении. Автореферат диссертации. Москва. 2008. 48 с.
3. Панфилов А. В., Панфилов А. А. Технологии получения, свойства и применение литых алюмоматричных композиционных материалов антифрикционного назначения. Композиционные материалы в промышленности. Материалы международной конференции. Славполиком. Ялта. 2003. С. 85–88.

Надійшла 03.01.2021

References

1. Development and production of cast wear-resistant metal materials with a non-metallic filler based on raw materials and waste from Ukrainian enterprises. Topic 5.42.08 / 302-93.333. IPL. 1993. [in Russian].
2. Kurganova Yu. A. (2008) Development and application of dispersion hardened aluminum-matrix composite materials in mechanical engineering. Abstract of the thesis. Moscow. 48 p. [in Russian].
3. Panfilov A. V., Panfilov A. A. (2003) Production technologies, properties and application of cast aluminum-matrix composite materials for antifriction purposes. Composite materials in industry. Materials of the international conference. Slavpolik. Yalta. Pp. 85–88. [in Russian].

Received 03.01.2021

A. V. Narivskiy, Dr. Sci. (Engin.); e-mail: opprs@ptima.liev.ua

A. S. Zatulovskiy, Dr. Sci. (Engin.); e-mail: grizly1@rambler.ru

O. M. Fixssen, PhD (Engin.); Senior Research Scientist; e-mail: vfixsen@i.ua

V. O. Shcheretskiy, PhD (Engin.); Senior Research Scientist,
e-mail: rnmpptima@ukr.net

O. A. Karanda, Chief technologist; e-mail: akaranda72@ukr.net

M. S. Horiuk, PhD (Engin.); Senior Research Scientist; e-mail: gormak72@gmail.com

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

THE EFFICIENCY OF ELECTROMAGNETIC TREATMENT FOR THE PRODUCTION OF HETEROGENEOUS ENDOGENOUS AND EXOGENOUS ALUMINUM COMPOSITES

The paper considers variants of realization of the complex magnetic-dynamic-vibration in-fluence on metallic melts and hardening of cast aluminum alloys Al7Si, Al7Si, Al12Si2Cu1Mg1Ni for production of cast composite materials strengthened with different types of particles. Their efficiency of four technologies was tested for particles introduction into the melt, and assessment of the technologies has been made prospects for usage depending on the mode of processing, the type of reinforcing particles, and the aluminum matrix alloy. The ad-vantages and disadvantages of each method of particle introduction are highlighted and recom-mendations for their usage are formulated. By the methods of metallography and tribological studies were evaluated the uniformity of distribution of reinforcing particles in the metal matrix, the presence of interfacial zone and defects of wetting particles by aluminum melt, the reinforc-ing effect on tribological properties of samples and their contribution to friction surfaces and third body formation. There were shown the reduction of wear of composite materials in comparison with Al7Si alloy in 1,3–1,4 times at approximately identical coefficient of friction. Increasing the duration of electromagnetic treatment with vibration increases the wear resistance of the composite mate-rials. There shown advantages of the technology, where high-modulus amplifier particles (160–200) μm are introduced in the form of a composite ligature, the technology can be used for the production of parts for tribological purposes. The optimal mode of complex processing is deter-mined by induction of alternating magnetic field of MHD processing 0.07–0.09 T; vibration am-plitude 0.4–0.5 mm, frequency 100 Hz; processing time not less than 6 minutes was stated. How-ever, with this technology, the size of the hardener can not be less than 100 μm , which can in-crease the mechanical properties due to the effect of modifying the cast microstructure of the aluminum matrix of composite castings. In order to obtain composite materials with high struc-tural properties, it is additionally necessary to apply high-energy influence that can effectively grind the hardener directly in the melt without its oxidation or degradation, for example by the action of plasma on the melt.

Keywords: Cast composite materials, discrete hardening, MHD processing, vibration, mechanical stirring, cast aluminum.