

О. А. Щерецький, д-р техн. наук., пров.наук. співр., e-mail: 07shch@i.ua

Р. А. Сергієнко, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
e-mail: ruslan@ptima.kiev.ua

А. М. Верховлюк, д-р техн.наук, заст. директора, e-mail: vam@ptima.kiev.ua

О. В. Железняк, пров. інженер, e-mail: Alexeivg@i.ua

О. В. Семашко, гол. технолог, e-mail: alloy@ptima.kiev.ua

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

РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ОДЕРЖАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

Розроблено технологічні режими лиття втулок із композиційних матеріалів лігатурним методом за моделями, які газифікуються. Лиття за моделями, що газифікуються (ЛМГ) в даний час є одним з ефективних і перспективних способів отримання високоякісних виливків, які мають задану розмірну точність, необхідну чистоту поверхні не гірше ніж при литті за моделями, що виплавляються. Дедалі більшого поширення ЛМГ-процес знаходить при виробництві виробів з алюмінієвих сплавів. На відміну від ЛМГ-процесу виробництва виливків з легованих сталей, чавунів і мідних сплавів для лиття виливків з алюмінієвих сплавів застосовують пінополістирол меншої щільності та більший залишковий тиск у вакуумній формі, який підтримується на рівні 40–50 кПа. Базовим сплавом для одержання композиційних матеріалів був ливарний алюмінієвий сплав АК7. В якості армуючих елементів використовували відходи твердого сплаву ВК6 та карбід кремнію дисперсністю 60–600 мкм в кількості 5 %мас, які вводили в алюмінієвий розплав за допомогою лігатур. Завчасно їх було одержано методом примусового просочування дисперсних частинок у вакуумі розплавом АК7. Плавку проводили в індукційній печі в графітовому тиглі. Після розплавлення матричного сплаву АК7, розплав перегрівали на 150–200 °С вище температури лівідус. Аналіз експериментальних результатів показав, що для отримання високоякісних виливків методом ЛМГ необхідно дотримуватися наступних параметрів плавки і лиття: $t_{\text{пер}} = 880\text{--}890\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для АК7-5 %мас. ВК) і $t_{\text{пер}} = 910\text{--}920\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для АК7-5 %мас. SiC), витримка 8–10 хв. і $t_{\text{зал}} = 820\text{--}830\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому щільність пінополістиролових моделей повинна знаходитись в інтервалі від 0,022 г/см³ до 0,024 г/см³. Виготовлено дослідну партію підшипників ковзання і проведено їх промислове випробування на підприєємстві ТзДВ «Гал-Кат». Випробування показали, що розроблені композиційні матеріали можуть бути використані у вузлах тертя, як альтернативний заміник бронзи. При цьому досягається зниження маси деталі в 3 рази, а також зниження вартості за рахунок меншої ціни матеріалу.

Ключові слова: алюмінієві сплави, високомодульні карбіди, композиційні матеріали, відходи твердих сплавів, ЛМГ-процес

Вступ

Причиною виходу з ладу 70 % механізмів і машин є зношування деталей під впливом сил тертя. Процеси, що протікають в трибовузлах, лімітують термін експлуатації виробів. Номенклатура традиційно використовуваних в умовах тертя матеріалів часто виявляється недостатньою для забезпечення комплексу різного роду вимог. Ринок примушує виробників вирішувати завдання поліпшення міцності та експлуатаційних характеристик трибовузлів при мінімальних фінансових вкладеннях, тобто проводити активний пошук нових зносостійких і дешевих матеріалів і економічних методів їх виготовлення.

В даний час у всьому світі активізуються дослідження, які спрямовано на широке практичне застосування композиційних матеріалів (КМ). У композитах з металевою матрицею поєднуються переваги конструкційних металевих матеріалів з перевагами наповнювача. В якості армуючої фази використовуються тугоплавкі частинки оксидів,

карбідів, боридів, нітридів та інші. Тому для металоматричних КМ характерні високі значення міцності, модуля пружності, в'язкості руйнування. Наряду з цим вони зберігають стабільність своїх характеристик в широких температурних межах, мають високу електро- і теплопровідність, а також невелику чутливість до поверхневих дефектів.

Щодо дисперсноармованих КМ на основі алюмінієвих сплавів, то вони мають комплекс властивостей, що відрізняються від традиційних матеріалів і відкривають широкі можливості для їх використання в машинобудуванні. Серед таких властивостей слід відмітити широкі функціональні і технологічні можливості, а саме підвищену зносостійкість, малу щільність, високу міцність і жорсткість, що забезпечує зниження маси виробів з одночасним зростанням їх надійності та ресурсу роботи.

Розробкою нових конструкційних металевих композиційних матеріалів, які армовано високоміцними дисперсними наповнювачами, займаються відомі зарубіжні дослідники: A. R. Kennedy, M. M. Makhlof, A. A. Baker, S. Das, B. K. Prasad, M. K. Surappa, P. K. Rohatgi, Y. Wang та ін. (США, Англія, Німеччина, Японія, Китай, Індія). Активні роботи по розробці литих КМ ведуться в Росії (М. Х. Шоршоров, І. Н. Фридляндер, Т. А. Чернишова, І. В. Гаврилін, В. І. Нікітін та інші), де провідними організаціями є Інститут металургії і матеріалознавства ім. А. А. Байкова РАН та Володимирський державний університет (ВлДУ) імені Столетових О. Г і М. Г. В літературі присутні дані стосовно розробки та випробування нових композиційних матеріалів систем: Al–B; Al–C; Al–SiC; Al–Al₂O₃; Al–B₄C; Mg–B₄C; Mg–B; Mg–C; Mg–SiC, Al–FeCr.

В даний час лідерами щодо розробки та використання КМ є США та Японія. Фізико-технологічний інститут металів та сплавів є єдиною організацією в Україні, яка проводить подібні дослідження [1–5]. Попередні дослідження показали, що в якості армуючої фази в композиційних матеріалах на основі алюмінію можуть використовуватись дисперсні частинки карбіду кремнію, а також частинки, які одержано з відходів твердих сплавів. Останні складаються із тугоплавких високодисперсних (~ 1 мкм) карбідів та з металевого в'язучого кобальту або нікелю. Необхідно відмітити, що твердий сплав краще змочується розплавами на основі алюмінію, тому що частинки карбідів металізовані Co або Ni. Крім того він має питому вагу значно більшу ніж матричний сплав і тому досить легко вводиться та порівняно рівномірно розподіляється в розплав. При витримці введених частинок твердого сплаву в розплав відбувається часткове розчинення в'язучих елементів (Co або Ni) за рахунок чого і протікає процес їх диспергування. КМ з порівняно низьким вмістом дисперсних частинок (1–5 %мас.) мають хороші ливарні властивості і перспективні для використання в якості триботехнічних матеріалів для пар тертя військової техніки, гвинтокрилів, нафтовидобувного устаткування, прокатних станів, текстильних верстатів та інших механізмів у заміні сплавів на основі міді.

Матеріали та методи

Базовим сплавом для одержання композиційних матеріалів був ливарний алюмінієвий сплав АК7. В якості армуючих елементів використовували відходи твердого сплаву ВК6 та карбід кремнію дисперсністю 60–600 мкм в кількостях 5 %, мас. част. Завчасно подрібнені матеріали вводили в розплав на основі алюмінію за допомогою лігатури. Для цього використовували лігатури на основі сплаву АК7, які було одержано методом примусового просочування дисперсних частинок у вакуумі.

Плавку проводили в індукційній печі в графітовому тиглі. Після розплавлення матричного сплаву, його перегрівали на 150–200 °С вище температури ліквідус. Лігатуру поміщали в алюмінієву фольгу та за допомогою кварцової палички погрожували в розплав на дно тигля. Витримували її в розплаві до повного розчинення (10–15 хв.), а потім акуратно перемішували круговими рухами. При цьому старались мінімально порушити оксидну плівку на поверхні розплаву. Таким чином, приготовлений розплав заливали у вакуумну форму з пінополістироловою моделлю, яка під дією теплоти рідкого металу газифікувалася. В даному випадку модель заміщалася рідким

металом з дисперсним наповнювачем, який згодом кристалізувався у вакуумній формі. Вакуумування перед заливкою та в період заливки і кристалізації металу забезпечує міцність форми за рахунок перепаду тиску між атмосферним та в середині форми, а також забезпечує виведення газів, що утворюються в процесі вигорання полістиролової моделі.

Результати і обговорення

Розробка оптимальних технологічних режимів одержання КМ за моделями, що газифікуються

В останні часи ЛМГ-процес знаходить широке використання при виробництві виробів з алюмінієвих сплавів [6–8]. Встановлено, що залишковий тиск у вакуумній формі необхідно підтримувати на рівні 40–50 кПа і якщо він знижується до 10–20 кПа, тоді чистота поверхні виробів суттєво погіршується (табл. 1). Необхідно відмітити, що відливати зразки зі сплаву АК7, який армовано високомодульними карбідами необхідно при температурі, яка вища на 30–40 °С ніж для чистого алюміній-кремніевого розплаву.

Таблиця 1

Вплив температури перегріву ($t_{\text{пер}}$) і заливання розплаву ($t_{\text{зал}}$) на якісні показники зразків з литих композиційних матеріалів (алюмінієвий сплав (АК7) армований високомодульними карбідами, щільність пінополістиролової моделі 0,022–0,024 г/см³)

Номер експерименту	Матеріал КМ	$t_{\text{пер}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	Залишковий тиск в формі, кПа	Чистота поверхні* / пористість	Пропікання пінополістиролу*
1	АК7-5 %мас. ВК6	880-890	780–790	40–50	– /є	–
2			820–830	40–50	+ /немає	+
3			870–880	40–50	+ /є	+
4			870–880	10–20	– /є	+
5	АК7-5 %мас. SiC	910-920	780–790	40–50	– /є	–
6			820–830	40–50	+ /немає	+
7			870–880	40–50	+ /є	+
8			870–880	10–20	– /є	+
9	АК7-5 %мас. ВК6	940-950	780–790	40–50	– /є	–
10			820–830	40–50	+ /немає	+
11			870–880	40–50	+ /є	+
12			870–880	10–20	– /є	+
13	АК7-5 %мас. SiC	980-990	780–790	40–50	– /є	–
14			820–830	40–50	+ /немає	+
15			870–880	40–50	+ /є	+
16			870–880	10–20	– /є	+

* «+» – задовільна; «-» – незадовільна

Експериментальні результати показали (табл. 1), що з 16 варіантів технології плавки і заливання розплаву ефективними є: 2, 6, 10 і 14. Слід зазначити, що 3, 7, 11 та 15 за показниками розмірної точності і чистоті поверхні виливків задовольняють необхідним вимогам, але не відповідають критеріям щодо пористості. Це пов'язано з режимами плавки (перегріву) $t_{\text{пер}}$ і заливки $t_{\text{зал}}$. Високі температури плавки та розливу з однієї сторони позитивно впливають на однорідність розподілу дисперсних частинок в розплаві, а з іншої не забезпечують необхідного очищення

від неметалічних включень та газів, що і призводить до високої пористості (вище 3-го балу). Таким чином, найбільш раціональним варіантом в даних технологічних умовах є 2 і 6, при яких температура перегріву становить 880–890 °С (для АК7-5 %мас. ВК6) і 910–920 °С (для АК7-5 %мас. SiC), а температура заливки складає 820–830 °С.

Щодо варіантів 10 і 14, то вони подібні до варіантів 2 і 6, при цьому мають більшу температуру перегріву розплаву, що буде економічно більш не вигідно.

Було проведено також дослідження впливу щільності пінополістиролу на якість поверхні, жорсткість, пропікання газифікованих моделей і утворення ливарних дефектів. Якщо в одній серії з трьох зразків один або два зразки мали ливарні дефекти, то вважали, що досліджувана щільність пінополістиролової моделі призводить до дефектного литва. Експериментальні результати показують, що при щільності 0,022–0,024 г/см³ забезпечується задовільна якість поверхні, жорсткість, пропікання моделей розплавом і, як наслідок, отримання виливків без ливарних дефектів. Це пояснюється найбільш повним протіканням процесу деструкції пінополістиролових моделей даної щільності в ливарній формі при раціональній температурі заливки розплаву (820–830 °С), (таблиця 2).

Таблиця 2

Вплив щільності пінополістиролу на характеристики газифікованих моделей і якість зразків

Щільності пінополістиролу, г/см ³	Характеристика моделі			Дефекти в зразках
	якість поверхні	жорсткість	пропікання	
0,017	–	–	+	незадовільна ливарна поверхня
0,019	+	–	+	незадовільна ливарна поверхня
0,022	+	+	+	ливарних дефектів немає
0,024	+	+	+	ливарних дефектів немає
0,026	+	+	–	недолив

* «+» – задовільна; «-» – незадовільна

Крім того, істотний вплив на якість виливків має час витримки розплаву при температурі перегріву. Наприклад, витримка його в печі більше 10 хв. призводить до підвищеного вмісту газів, що сприяє утворенню пористості при кристалізації, а це може привести до деякого зниження міцності. Зниження часу витримки до 8–9 хв. приводить до одержання виливків, які виходять без пористості з рівномірною дрібнозернистою структурою.

Дослідно-промислова перевірка розроблених КМ проводилась на металургійному підприємстві ТзДВ «Гал-Кат». Були проведені випробування щодо визначення можливості заміни втулок із бронзи на КМ (алюмінієвий сплав – високомодульні частинки карбіду вольфраму) в реальних умовах тертя. Для випробовувань було виготовлено втулки з матеріалу АК7+5 %мас. WC+1 %мас. вуглецю, які використовувались замість втулок БрАЖ 9-4 (ГОСТ 18175-78), що встановлено в дискових ножицях «ДИН – 600». В даному випадку вуглець в кількості 1 %мас. використовували в якості твердого мастила.

Перевірка показала, що вказаний композиційний матеріал може бути використаний в даному вузлі тертя, як альтернативний замітник бронзи. При цьому досягається зниження маси деталі в 3 рази, а також зниження вартості за рахунок меншої ціни матеріалу.

Список літератури

1. Щерецький А. А., Затуловський А. С., Щерецький В. А., Соловйова А. В. Исследование особенностей взаимодействия компонентов алюмоматричных композиционных материалов на границе матрица-армирующая фаза. *Металл и литье Украины*. 2011. №12. С. 24–30.
2. Щерецький В. А., Затуловський А. С., Косинська А. В. Литі композиційні матеріали триботехнічного призначення. *Металознавство та обробка металів*. 2013. № 1. С. 21–27.
3. Щерецький В. А., Затуловський А. С. Изменение комплекса свойств алюмоматричных материалов вследствие упрочнения дискретными частицами. *Металл и литье Украины*. 2013. № 7. С. 22–24.
4. Пат. № 82877 Україна, МПК6B22F 3/26, C22C 1/10. Спосіб одержання алюмоматричних композиційних матеріалів з ультрадисперсними структурними складовими / А. С. Затуловський, О. А. Щерецький, В. О. Щерецький, О. А. Кузьменко, А. В. Соловйова. Опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16.
5. Затуловський А. С., Щерецький В. А., Щерецький А. А. Упрочнение алюмоматричных композиционных материалов триботехнического назначения наноразмерными частицами циркония, молибдена вольфрама. *Процессы литья*. 2015. № 3. С. 57–62.
6. Небожак И. А., Шинский О. И., Гаврилюк В. П., Панасенко Д. Д. Механические свойства изотропных литых композиционных материалов системы [Al – FeCr], полученных методом литья по газифицируемым моделям. *Процессы литья*. 2004. № 2. С. 83–87.
7. Небожак І. А., Новицький В. Г., Шинський О. Й., Гаврилюк В. П. Триботехнічні властивості сплаву АК12, армованого дисперсним інтерметалідом FeCr. *Металознавство та обробка металів*. 2004. № 2. С. 62–70.
8. Небожак И. А. Влияние армирования дисперсным интерметаллидом FeCr, имплантированным в газифицируемую модель, на структуру и механические свойства сплава АК12. Литье. *Металлургия*. 2016: Материалы XII Международной научно-практической конференции (24–26.05.2016, м. Запоріжжя) / Під заг. ред. Пономаренко О. І. Запоріжжя (Україна): АА Тандем. С. 166–168.

Надійшла 05.05.2020

References

1. Shcheretskyi, A. A., Zatulovskyi, A. S., Shcheretskyi, V. A., Soloviova, A. V. (2011) Study of the interaction characteristics of components of aluminomatrix composite materials at the matrix-reinforcing phase boundary. *Metal and casting of Ukraine*, 12, pp. 24–30 [in Russian].
2. Shcheretskyi, V. O., Zatulovskyi, A. S., Kosynska, A. V. (2013) Cast tribotechnical composite materials. *Metal science and treatment of metals*, 1, 21–27 [in Ukrainian].
3. Shcheretskyi, V. A., Zatulovskyi, A. S. (2013) Change in the set of properties of aluminum based materials due to hardening by superdispersed particles. *Metal and casting of Ukraine*, 7, 22–24 [in Russian].
4. Patent № 82877 Ukraine, IPC 6B22F 3/26, C22C 1/10. Method for producing composite aluminomatrix composite materials with super-dispersed structural components / A. S. Zatulovskyi, O. A. Shcheretskyi, V. O. Shcheretskyi, O. A. Kuzmenko, A. V. Soloviova. Publ. 27.08.2013, Bul. 16 [in Ukrainian].
5. Zatulovskyi, A. S., Shcheretskyi, V. A., Shcheretskyi, A. A. (2015) Reinforcement of aluminomatrix composite materials for tribotechnical purposes with nanopowders of zirconium, molybdenum, tungsten. *Casting processes*, 3, 57–62 [in Russian].
6. Nebozhak, I. A., Shinsky, O. Y., Havryliuk, V. P., Panasenko, D. D. (2004) Mechanical properties of isotropic cast composite materials of the [Al–FeCr] system obtained by lost foam casting. *Casting processes*, 2, 83–87 [in Russian].
7. Nebozhak, I. A., Novytskyi, V. G., Shinsky, O. Y., Havryliuk, V. P. (2004) Tribotechnical properties of AK12 alloy reinforced with FeCr dispersed intermetallic. *Metal science and treatment of metals*, 2, 62–70 [in Ukrainian].
8. Nebozhak, I. A. Effect of reinforcement with dispersed FeCr intermetallic implanted in a gasified model on the structure and mechanical properties of AK12 alloy. *Casting. Metallurgy*. 2016: Materials of the XII International scientific-practical conference (24–26.05.2016, Zaporizhzhya) / Ed by Ponomarenko O. I. Zaporizhzhya. AA Tandem, pp. 166–168 [in Russian].

Received 05.05.2020

O. A. Shcheretskyi, Dr. Sci. (Engin.), Leading Research Scientist,
e-mail: 07shch@i.ua

R. A. Sergiienko, PhD (Engin.), Senior Research Scientist,
e-mail: ruslan@ptima.kiev.ua

A. M. Verkhovliuk, Dr. Sci. (Engin.), Deputy Director,
e-mail: vam@ptima.kiev.ua

O. V. Zhelezniak, Lead Engineer, e-mail: Alexeivg@i.ua

O. V. Semashko, Principal Technologist, e-mail: alloy@ptima.kiev.ua

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

DEVELOPMENT OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL MODES FOR PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS BY LOST FOAM CASTING PROCESS

Technological modes of bushing casting from composite materials by the ligature method have been developed using lost foam casting process. The lost foam casting process is currently one of the most effective and promising methods for producing high-quality castings having a predetermined dimensional accuracy, and the required surface smoothness which is no worse than the lost wax casting. The lost foam casting process is becoming more widespread in the production of foundry products from aluminum alloys. For aluminum alloys casting, polystyrene foam of lower density and a larger residual pressure (at a level of 40–50 kPa) in vacuum form are used in contrast to the steel, cast iron and copper alloys casting. The base alloy for producing of composite materials was cast aluminum alloy AK7. The cemented carbide BK6 wastes and silicon carbides as large as 60–600 microns were used as reinforcing elements; they were introduced into the aluminum melt using ligatures. The ligatures were preliminarily obtained by the method of forced impregnation of dispersed particles in vacuum using aluminium alloy AK7 melt. The melting was carried out in an induction furnace in a graphite crucible. The melt temperature was above 150–200 °C the liquidus temperature. An analysis of the experimental results showed that in order to obtain high-quality castings by the lost foam casting process, it is necessary to follow the melting and casting parameters: the overheat temperature is $t_{\text{over}} = 880\text{--}890\text{ }^{\circ}\text{C}$ (for AK7 – 5 mass % BK6) and the overheat temperature is $t_{\text{over}} = 910\text{--}920\text{ }^{\circ}\text{C}$ (for AK7 – 5 mass % SiC), holding time is 8–10 min and the casting temperature is $t_{\text{cast}} = 820\text{--}830\text{ }^{\circ}\text{C}$, the density of polystyrene foam models should be in the range from 0.022 g/cm³ to 0.024 g/cm³. An experimental batch of plain bearings was manufactured and their industrial testing was carried out at the TzDV «GAL-KAT» industrial enterprise. Tests have shown that the developed composite materials can be used in friction units as an alternative substitute for bronze. A reduction in the plain bearings mass is achieved by a factor of 3, as well as a reduction in cost due to the lower price of the composite materials.

Keywords: aluminum alloys, high-modulus carbides, composite materials, cemented carbide waste, lost foam casting process.