

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.74

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.2

© Дан Л.О.¹, Трофімова Л.О.²**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З МАТРИЦЕЮ З ЛЕГКИХ СПЛАВІВ**

В статті розглянуті та проаналізовані основні складові технології виготовлення литих композиційних матеріалів на основі легких сплавів – алюмінію та магнію. Особлива увага приділена вибору: матричного сплаву, типу, розмірів та кількості армуючих часток, а також термочасових і кінетичних параметрів процесу.

Ключові слова: алюміній, магній, сплав, композиційний матеріал, матриця, частки, що армують.

L.O. Dan, L.O. Trofimova. Analysis of technological parameters of cast composite materials with a matrix of light alloys manufacture. The successful functioning and further development of most modern industries, such as aerospace, transport, military, biomedicine, is not possible without the use of lightweight, durable and inexpensive materials to manufacture. Light alloys are widely used in industry and everyday life due to the high complex of physical and mechanical properties, wear and corrosion resistance as well as low cost. In this regard, the use of light alloys as a basis for composite materials is justified and expedient. The properties of the finished composite material exceed the properties of its constituent components. The potential of these materials has not been fully used to this day despite the growing interest in metal matrix composites and extensive investigations aimed at the development of production technology and the introduction of advanced systems based on light matrices. The article presents a brief review of the literature on the analysis of the main components of the technology of cast composite materials (CCM) based on light alloys of aluminum and magnesium reinforced by particles of different types. Particular attention is paid to the choice of the matrix alloy, the type, size and amount of reinforcing particles introduced into it, as well as the thermal-time and kinetic parameters of the process. The matrix alloy must be uniform, strong, light and inexpensive. The particles must have a high hardness and be optimally distributed in the matrix, to be securely fixed in it. An important element of the technology of manufacturing CCM by liquid-phase method is also a method of introducing solid particles of liquid metal. Several ways of introducing reinforcing particles into the melt were analysed too. Only the optimal combination of all these elements can provide composite materials with a high level of physical, mechanical and operational properties. In addition, the article suggests directions for further research in this area.

Key words: aluminium, magnesium, alloy, composite material, matrix, reinforcing particles.

Постановка проблеми. Успішне функціонування та подальший розвиток більшості сучасних галузей промисловості, таких як аерокосмічна, транспортна, військова, біомедицина, неможливе без застосування легких, міцних та недорогих у виробництві матеріалів. Сьогодні всім цим вимогам відповідають композиційні матеріали (КМ) на базі сплавів Al і Mg [1-3].

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-9084-516X, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

Прийнято вважати, що композиційні матеріали – це матеріали, що містять дві або більше фази (матрицю та армуючі частинки), які істотно відрізняються за властивостями і мають чітку межу розділу [4]. Властивості готового композиційного матеріалу перевищують властивості складових його компонентів. У КМ штучно об'єднані високопластичні металеві матриці, наприклад, сплави алюмінію, і високоміцні, високомодульні наповнювачі. При такому поєднанні фаз можна отримувати композити з необхідними значеннями міцності, модуля пружності, мікротвердості та тріщиностійкості, жароміцності, а також створювати матеріали з необхідними діелектричними, магнітними, радіопоглинаючими та іншими спеціальними характеристиками [5].

Як показує досвід, при отриманні композиційних матеріалів слід приділяти велику увагу підбору як матричного сплаву, так і армуючих його частинок. Матричний сплав має бути однорідним, міцним, легким та недорогим. Частинки повинні мати високу твердість і оптимально розподілятися в матриці, надійно бути зафіксованими в ній. Тільки в цьому випадку буде досягнуто позитивного технічного та економічного результату.

Мета статті – проаналізувати різні аспекти технології отримання литих композиційних матеріалів на основі легких (алюмінієвих і магнієвих) сплавів, а також їх вплив на властивості готового продукту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Алюмоматричні та магнійматричні композити.

Алюміній, магній та сплави на їх основі, враховуючи високий комплекс фізико-механічних властивостей, зносостійкість, корозійну стійкість, невисоку вартість, широко застосовуються промисловості, у побуті. Разом з тим стає очевидним, що сьгоднішні вимоги, що пред'являються до деталей машин і механізмів, не можуть бути задоволені навіть усім різноманіттям відомих сплавів. Вихід може бути знайдений у площині створення композиційних матеріалів з використанням металевої матриці на алюмінієвій та магнієвій основі. Аналіз літературних джерел [4, 6] показує, що такі композиційні матеріали становлять основну масу вироблених нині литих КМ.

Затребуваність алюмо- і магнійматричних литих композиційних матеріалів підтверджується широким їх застосуванням у конструкціях відповідальних деталей військових та цивільних літаків. Наприклад, у конструкції підфюзеляжних гребенів винищувача F-16 (США) застосовується КМ 6092/SiC/17,5 (за номенклатурою ANSI). Композити на основі алюмінієвих сплавів виробництва The discontinuously Reinforced Aluminum Company (USA), зміцнені частинками карбиду кремнію 6092/SiC/17,5p DRA, 2009/SiC/15p-T4 DRA 93, 6063/SiC/5p, застосовують для виготовлення кришок люків, конструкційних елементів фюзеляжу, механічних та гідравлічних систем, панелей обшивки кабіни, корпусу електронних приладів. Високі характеристики КМ на основі алюмінію, дисперсно-армованого частинками, дозволяють виготовляти з цього матеріалу такі відповідальні деталі, як, наприклад, муфта лопаті вентилятора гелікоптера [6]. Комерційне застосування алюмоматричних композиційних матеріалів у галузі автомобілебудування (двигун, гальмівні системи, трансмісія тощо) налічує вже більше 30 років [7].

Подібні матеріали також перспективні для використання в якості термобар'єрних покриттів лопаток газотурбінних двигунів, криогенних фланців та інших елементів високого тиску рідинних ракетних двигунів, полегшених трубопроводів в авіаційній та космічній техніці, корпусів електронної техніки, статичних та рухомих деталей електронної техніки [7].

Крім того, в даний час металоматричні алюмінієві композити використовуються як радіаційно-захисні матеріали. По-перше – це захист обладнання та техніки, що працюють в умовах радіаційного ураження. По-друге – біологічний захист персоналу, який обслуговує це обладнання та техніку на об'єктах використання атомної енергії, а також персоналу медичних та аварійно-рятувальних служб з підвищеними вимогами до біологічно-інертних та рентгенозахисних властивостей матеріалів. Проводиться розробка нового класу полегшених радіаційно-захисних матеріалів на основі алюмінієвих та магнієвих композитів з різними керамічними наповнювачами, залежно від типу іонізуючого випромінювання. Конструкційні металеві матеріали мають високі механічні властивості, але при експлуатації в режимі підвищеного іонізуючого випромінювання схильні до значного набухання, у тому числі за рахунок структурних змін.

Цим структурним змінам можна запобігти шляхом використання металів, мало схильних до набухання і модифікування різними наноструктурними наповнювачами [8].

Слід зазначити, що крім алюмо- та магній-матричних композитів відомі приклади створення композиційних матеріалів на основі сталі Гатфільда, нержавіючих сталей та чавунів [9].

Виклад основного матеріалу.

Методи одержання композиційних матеріалів.

Усі методи отримання композиційних матеріалів прийнято ділити на твердофазні та рідкофазні [4, 6 та ін.]. На відміну від твердофазних, рідкофазні методи більш технологічні та менш затратні. Це тому, що більшість рідкофазних методів пов'язані з отриманням КМ з урахуванням легкоплавких сплавів.

При реалізації рідкофазних методів матричний метал, що знаходиться в повністю або частково розплавленому стані, змішується з армуючим матеріалом, утворюючи новий за своїми властивостями композиційний матеріал. Крім інших переваг такий підхід до отримання КМ дозволяє ефективно керувати процесами, що протікають на межі твердої та рідкої фаз.

Властивості композиційного матеріалу, що утворюється, залежать від ряду факторів (Рис.). Розглянемо основні з них.

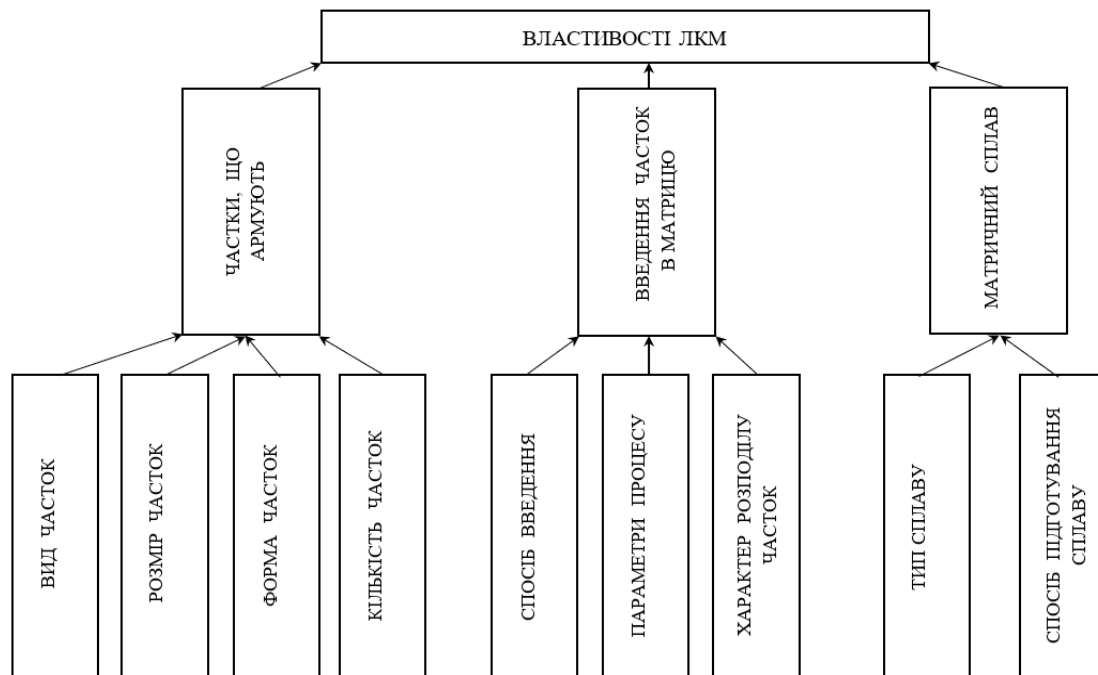


Рисунок – Параметри технології отримання литих композиційних матеріалів (ЛКМ), що визначають їх властивості

Частинки, що армують і взаємодія їх з рідким металом.

Крім вибору матричного сплаву в технології отримання литих КМ важливим є вибір армуючого матеріалу і способу введення армуючих частинок в розплав.

Залежно від природи і речовинного складу частинок, що вводяться, вони можуть сприяти підвищенню міцнісних, фрикційних або антифрикційних характеристик матричного сплаву. Властивості литих композицій, армованих твердими, нерозчинними, тугоплавкими частинками, значною мірою визначаються природою, розміром, об'ємною часткою і формою цих частинок та їх взаємодією з матрицею. Спільним для більшості методів одержання є армування матричних сплавів дисперсною фазою у вигляді частинок оксидів, нітридів, карбідів, боридів та тугоплавких металів. Як технологічно і економічно прийнятних армуючих елементів для виробів на основі матриць з алюмінієвих сплавів знаходять застосування дрібнодисперсні матеріали, отримані з техногенних відходів [10]. Використовуються, у тому числі, шлаки металургійних виробництв, ваграночної плавки, відходи збагачення, золи теплових агрегатів, шамотний по-

рошок, бій кераміки та ін., які розмелюють в порошок у кульових або вібраційних млинах і прожарюють у сушильних шафах або в камерах. Відомі випадки введення частинок графіту та/або бронзи у вигляді стружки для підвищення антифрикційних властивостей алюмінієвих сплавів [5, 11]. У сплави на основі Al і Mg досить часто вводять частки SiC, Al₂O₃, B₄C, литі волокна базальту та лусочки графіту, слюду [3, 12, 13].

Розмір часток може коливатися у межах: від 1 до 200-400 мкм [3, 4, 14, 15]. В останні роки досить велика кількість досліджень була присвячена армуванню металевих матриць наночастинками [7, 16, 17].

Наповнювачі у вигляді волокон або частинок можуть бути фазою, що зміцнює, тільки при високій міжфазній адгезії. Зазвичай, у комбінаціях, що використовуються, розплав - тверді частинки відзначається погане змочування. Поліпшення змочування рідким металом твердих частинок посилює їх зв'язок з матричним металом, тим самим підвищуються механічні та експлуатаційні характеристики готових виробів. Введення в рідкий метал поверхнево-активних елементів знижує поверхневий натяг на межі твердої та рідкої фаз. Підігрів, а іноді і прожарювання армуючих частинок перед введенням у рідкий матричний сплав, необхідний для видалення з їхньої поверхні вологи та інших адсорбованих поверхнею газів, а іноді створення окисних плівок. У кінцевому результаті позитивний ефект підігріву частинок позначається на поліпшенні їх змочуваності. Аналогічним чином впливає на поліпшення змочування підвищення температури розплаву в останній момент введення у нього дисперсних частинок.

Також, використовуючи замість окислювальної атмосфери інертний газ або вакуум у процесі отримання КМ, вдається отримувати чистий матричний метал, а отже, забезпечувати надійний контакт з армуючими частинками.

Кількість твердої фази, що вводиться в розплав при реалізації рідкофазних методів, зазвичай менше, ніж при реалізації твердофазних [6]. Кількість дисперсної фази, що забезпечує найбільший приріст рівня різних властивостей, залежить від природи матричного сплаву та твердих частинок, їх розміру та характеру розподілу в матриці. Так за введенні навіть 0,3-1,0 % ваг. WS₂ фракцією ~ 2 мкм відзначалося помітне підвищення межі міцності та межі плинності сплаву AZ91 [18]. Позитивний вплив на міцність при стисканні та розтягуванні автори [19] виявили вже при введенні 1% мас. частинок B₄C матрицю зі сплаву AZ91. У роботі [15] було знайдено, що для комбінації AZ91/SiCp при розмірі частинок 20-40 мкм оптимальна, з точки зору підвищення рівня властивостей міцності, кількість твердої фази 10-15 % мас. У роботі [4] значне підвищення зносостійкості металу AZ91 було відзначено при армуванні його 10% мас. частинками SiCp із середнім розміром зерна 10 мкм. За результатами дослідження [9] у високолеговані сталі рекомендовано вводити 5-50% об. твердих частинок у вигляді карбідів, нітридів титану, вольфраму і ніобію з метою підвищення зносостійкості литих деталей.

У роботах [20, 21] показано, що при високій об'ємній частці армуючих частинок композиційні матеріали з алюмінієвою матрицею показують високу контактну міцність, завдяки якій можуть бути створені опорні елементи вантажних рольгангів, підкладки дзеркал систем наведення, деталі гідроапаратів.

У літературі мало обговорюється вплив форми армуючих частинок на властивості литих КМ. Зазвичай частинки кераміки, карбіди, нітриди металів мають гострокутну, осколкову форму, частинки графіту – пластинчасту, а тугоплавких металів – округлу [2, 4, 9]. Вочевидь, що форма дисперсних частинок може бути чинником, що визначає фізико-механічні характеристики готових КМ. Аналогом при розгляді цього питання може бути форма графіту в чавуні [22]. Як відомо, включення пластинчастого графіту в сірому чавуні чинять дію, що надрізує металеву матрицю в протилежність включенням кулястого графіту високоміцного чавуну. Як наслідок, останній має набагато більш високий рівень механічних властивостей. Слід припустити, що включення округлих твердих частинок будуть більш сприятливі для властивостей литих КМ порівняно з гострокутними або осколковими.

Для повного розуміння ролі дисперсних частинок, що вводяться в рідкий матричний сплав, необхідно розглянути їх роль у кристалізаційних процесах.

Введення в алюмінієві розплави дисперсних тугоплавких наповнювачів сприяє зменшенню параметрів дендритної литої структури. Частинки кераміки, на думку авторів [23], не є центрами кристалізації, але вони відтісняються дендритами α – алюмінію в міждендритні прос-

тори, збагачені легкоплавкими фазами. При цьому модифікуюча роль частинок кераміки обумовлена обмеженням обсягів розплаву, в яких проходить ліквідація. Частинки металоподобних карбідів та інтерметалідів також надають модифікуючий вплив на литу структуру КМ, але вже як центри кристалізації. При додаванні до складу КМ частинок графіту останні розташовуються переважно в міждендритних просторах, а також можуть бути підкладкою для кристалів первинного кремнію в силумінах. Встановлено, що зі зростанням вмісту у КМ частинок кераміки та графіту подрібнення фрагментів структури посилюється.

Способи введення армуючих частинок у розплав та параметри процесу введення.

Наступним елементом технології виготовлення КМ рідкофазним методом є спосіб введення твердих частинок рідкого металу. Залежно від обраного способу, можна отримати кілька варіантів розподілу частинок матриці.

Перший варіант – рівномірний розподіл часток. Для забезпечення рівномірного диспергування армуючих частинок найбільш поширений спосіб замішування [2, 4, 16, 18, 24 та ін]. Основний принцип методу у тому, що армуючі частки вводяться у розплавлений матричний метал і рівномірно розподіляються у ньому за допомогою перемішування. Чим більш рівномірно розподілені тверді частинки в м'якій матриці, тим більш високий рівень властивостей у всьому обсязі набуває композит. Тому важливо правильно вибрати технологічні параметри процесу. До них відносяться швидкість перемішування, час перемішування, температура розплаву, температура підігріву частинок, що вводяться, і введення в розплав поверхнево-активних добавок.

Швидкість перемішування є виключно важливим параметром, що визначає ступінь турбулентності потоку рідкого металу, а, отже, і характер розподілу твердих частинок у розплаві. Як показано в роботах [2, 4, 24], рух армуючих частинок у розплавленому металі безпосередньо пов'язаний зі швидкістю його переміщення. При цьому чим вище швидкість перемішування, тим вище ступінь турбулентності потоку, тим менш помітні седиментаційні процеси, тим більш однорідно розподілені частинки в рідкому, а потім і в матричному сплаві, що затвердів. У цих роботах показано, що з підвищенням швидкості перемішування крім всього зменшується величина поверхневого натягу на межі твердої і рідкої фаз, що, як уже зазначалося, дуже важливо для забезпечення надійної фіксації частинок в матриці. На практиці для замішування армуючих частинок у рідкий метал використовують високошвидкісні механічні, з частотою обертання до 4000 і більше об./хв., та ультразвукові мішалки [25]. Вибір швидкості перемішування має базуватися на оцінці в'язкості розплаву. Цей параметр, як відомо, безпосередньо пов'язаний із складом рідкого металу та його температурою.

Час перемішування є критичним параметром процесу [26]. Недостатній час перемішування може призвести до нерівномірного розподілу твердих частинок у рідкому металі, їх концентрації в одних обсягах та відсутності в інших. Результатом надмірно тривалого перемішування може бути деформація та руйнування активного елемента мішалки за рахунок впливу високих температур, що поєднуються з механічними навантаженнями. Вочевидь, що в разі кожного конкретного випадку необхідно емпіричним шляхом знаходити оптимальний час перемішування.

Вибір температури процесу є також важливим елементом технології виготовлення виливків із КМ [27]. Крім забезпечення необхідної в'язкості розплаву в момент введення та замішування в ньому армуючих частинок функцією температури є рідкоплинність. Загально визнана роль рідкоплинності у наповненні ливарних форм і отриманні правильної конфігурації виливків. Підвищення температури розплаву також поліпшує змочуваність розплавом дисперсних частинок.

Дещо інший підхід до забезпечення рівномірного розподілу армуючих частинок реалізований при литті за моделями, що газифікуються. Тверді частинки змішуються з гранулами підспіненого полістиролу і інжектуються до прес-форми [28, 29]. Їх рівномірний розподіл у моделі зберігається і в готовому виливку. Даний метод поки не знайшов широкого застосування на практиці через погану керованість процесом.

Другий варіант відповідає отриманню функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ). В цьому випадку необхідні параметри фізичних властивостей та експлуатаційних характеристик (коефіцієнтів тертя, термічного розширення, зносостійкості, модуля пружності та ін.) реалізу-

ються в окремих заданих областях виробу. Частинки, що армують, тим чи іншим способом концентрують у найбільш навантаженій ділянці виливка, тим самим підвищуючи її працездатність. Способів такої концентрації кілька. Виготовлення композитів методом відцентрового лиття дає можливість отримувати заготовки з диференційованим розподілом армуючих елементів за перетином виливка [30]. Отримані деталі мають армовану зовнішню або внутрішню поверхню (зону), залежно від співвідношення щільності частинок і матричного сплаву [5, 30-32]. Одним з найважливіших технологічних факторів при відцентровому литті, що впливає на сегрегаційні процеси, є гравітаційний коефіцієнт K , що показує, у скільки разів обтяжуються всі компоненти сплаву в полі дії відцентрових сил.

При литті в стаціонарні форми за рахунок різниці в питомій вазі матричного металу та армуючих частинок, можна сконцентрувати їх або у верхній, або в нижній частині виливка, надавши цим йому необхідні властивості, що відрізняються від властивостей основного металу.

Ще одна група методів введення армуючих частинок у матричний сплав заснована на технології запропонованої Т. Нукамі та М. Флемінгсом [33]. Ця технологія (за кордоном звана технологія *in-situ*), заснована на синтезі другої фази внаслідок хімічної взаємодії введених у розплав компонентів. Вона характеризується цілою низкою переваг: просте та порівняно недороге обладнання, короткий технологічний цикл, висока чистота та якість кінцевих сплавів. Найбільшого поширення знайшов варіант технології, що полягає у підготовці лігатури, яка складається з ультрадисперсних порошків титану, вуглецю та алюмінієвого наповнювача у вигляді пілет і введення цієї лігатури в розплав алюмінію [34, 35 та ін.]. В результаті протікання ланцюжка хімічних реакцій у місці введення лігатури утворюється TiC , що виступає в ролі армуючої фази.

Після введення армуючих частинок розплавлена металева матриця твердне, надійно фіксує армуючі частинки всередині себе. При цьому, залежно від призначення композиційного матеріалу, можливе формування фасонного виливку чи зливку.

Висновки

Литі композиційні матеріали на основі алюмінію, магнію та сплавів на їх основі забезпечують рівень властивостей, що набагато перевищує такий у базових металів та сплавів. Це робить ЛКМ перспективними матеріалами для багатьох галузей техніки.

При отриманні ЛКМ важливими є елементи технології: вибір типу матричного сплаву, способу його підготовки; типу, розмірів, форми та кількості армуючих частинок; принципу та параметрів введення дисперсних частинок у розплав. Тільки оптимальне поєднання всіх цих елементів дозволяє забезпечити високий рівень фізичних, механічних і експлуатаційних властивостей ЛКМ.

Перелік використаних джерел:

1. Rohatgi P. Cast aluminum-matrix composites for automotive applications / P. Rohatgi // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 1991 – № 43(4). – Pp. 10-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/BF03220538>.
2. A study of fabrication methods of aluminium based composites focused on stir casting process / A.K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, C. Pinca-Bretotean // Materials Today: Proceedings. – 2020. – № 27. – Pp. 1608-1612. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.316>.
3. Determination of substrate log-normal distribution in the AZ91/SiCp composite / J. Lelito, P.L. Žak, B. Gracz, M. Szucki, D. Kalisz, P. Malinowski, J.S. Suchy, W.K. Krajewski // Metalurgija. – 2015. – № 54(1). – Pp. 204-206.
4. Study of the microstructure and mechanical characteristics of AZ91–SiCp composites fabricated by stir casting / B. Saleh, J. Jiang, R. Fathi, Q. Xu, L. Wang, A. Ma // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 20, № 3. – Pp. 102-115. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00071-9>.
5. Чернышова Т.А. Дискретно армированные композиционные материалы с матрицами из алюминиевых сплавов и их трибологические свойства / Т.А. Чернышова, Л.И. Кобелева, Л.К. Болотова // Металлы. – 2001. – № 6. – С. 85-98.
6. Мэтьюз Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэтьюз, Р. Ролингс. –

- М. : Техносфера, 2004. – 408 с.
7. Кондратенко А.Н. Перспективные технологии получения и области применения наноструктурных металлматричных композитов / А.Н. Кондратенко, Т.А. Голубкова // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – № 1. – С. 24-25.
 8. Гульбин В.Н. Облегченные радиационно-защитные композиты / В.Н. Гульбин, Н.С. Колпаков // Наукоемкие технологии. – 2014. – Т. 15, № 3. – С. 4-16.
 9. Patent CA2934084A1 Canada, C22C38/58. Composite Metal Product / X. Tang, K.F. Dolman. – Filed 30.12.2014; publ. 09/07/2015.
 10. High strain rate compressive characterization of aluminum alloy/fly ash cenosphere composites / D.D. Luong, N. Gupta, A. Daoud, P.K. Rohatgi // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2011. – № 63(2). – Pp. 53-56. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0029-y>.
 11. Effect of graphite particles on improving tribological properties Al-16Si-5Ni-5Graphite self-lubricating composite under fully flooded and starved lubrication conditions for transportation applications / E. Omrani, A.D. Moghadam, M. Algazzar, P.L. Menezes, P.K. Rohatgi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – № 87(1). – Pp. 929-939. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8531-6>.
 12. Печников А.А. Литые композиционные изделия с алюминиевой матрицей / А.А. Печников, А. Толешулы, Е.Г. Мещеряков // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – № 1(19), том 2. – С. 42-44.
 13. Deonath. Damping capacity, resistivity, thermal expansion and machinability of aluminium alloy-mica composites / Deonath, R. Narayan, P.K. Rohatgi // Journal of Materials Science. – 1981. – № 16. – Pp. 3025-3032. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/BF00540308>.
 14. Baradeswaran A. Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites / A. Baradeswaran, A.E. Perumal // Composites Part B: Engineering. – 2013. – № 54. – Pp. 146-152. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.012>.
 15. Bhushan R.K. Fabrication and characterization of 7075 Al alloy reinforced with SiC particulates / R.K. Bhushan, S. Kumar, S. Das // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 65(5-8). – Pp. 611-624. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4200-6>.
 16. Tensile properties of reactive stir-mixed and squeeze cast Al/CuO-based metal matrix nanocomposites / J.B. Ferguson, I. Aguirre, H. Lopez, B.F. Schultz, K. Cho, P.K. Rohatgi // Materials Science and Engineering. – 2014. – № 611. – Pp. 326-332. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.008>.
 17. Tribological Behavior of Aluminum Micro-and Nano-Composites / P.R. Rohatgi, P.L. Menezes, T. Lovell, M.R. Lovell // International Journal of Aerospace Innovations. – 2011. – № 3(3). – Pp. 153-162. – Mode of access: <https://doi.org/10.1260/1757-2258.3.3.153>.
 18. Huang S. Effects of tungsten disulfide on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy manufactured by stir casting / S. Huang, A. Abbas // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – № 817. – Pp. 153-321. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153321>.
 19. Mohammadi H. The statistical analysis of tensile and compression properties of the as-cast AZ91-X%B4C composites / H. Mohammadi, M. Emamy, Z. Hamnabard // International Journal of Metalcasting. – 2019. – № 14(2). – Pp. 505-517. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00377-2>.
 20. Композиционные материалы с матрицей из алюминиевых сплавов, упрочненных частицами, для пар трения скольжения / Т.А. Чернышева, Ю.А. Курганова, Л.И. Кобелева, Л.К. Болотова, И.Е. Калашников, И.В. Катин, А.В. Панфилов, А.А. Панфилов // Покрытия и материалы специального назначения. – 2007. – № 3. – С. 38-49.
 21. Васильев В.В. Композиционные материалы. Справочник / В.В. Васильев. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
 22. Dejack M. Literature Review of CGI and Ductile Iron and Development of Improved Models for HCF / M. Dejack // Conference: International FEMFAT User Meeting. – 2015. – Pp. 1-48.
 23. Печников А.А. Влияние армирования на структуру, механические и технологические свой-

- ства КМ / А.А. Печников, А. Толешулы, Е.Г. Мещеряков // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 2, № 1(19). – С. 44-48.
24. Kumar A. Recent progress in production of metal matrix composites by stir casting process / A. Kumar, C. Singh, R. Chaudhary // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – № 21, part 3. – Pp. 1453-1457. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.079>.
 25. Singh J. A review of microstructure, mechanical properties and wear behavior of hybrid aluminium matrix composites fabricated via stir casting route / J. Singh, A. Chauhan // *Sādhanā*. – 2019. – № 44. – Pp. 1-16. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12046-018-1025-5>.
 26. Miracle D.B. Metal matrix composites – from science to technological significance / D.B. Miracle // *Composites science and technology*. – 2005. – № 65. – Pp. 526-540. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>.
 27. Stir casting process for manufacture of Al-SiC composites / S. Soltani, R.A. Khosroshahi, R.T. Mousavian, Z.Y. Jiang, A.F. Boostani, D. Brabazon // *Rare Metals*. – 2017. – № 36(7). – Pp. 581-590. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0565-7>.
 28. Небожак И.А. Влияние армирования дисперсным интерметаллидом FeCr, имплантированным в газифицируемую модель, на структуру и механические свойства сплава АК12 / И.А. Небожак // *Литье. Металлургия-2016: материалы XII Межд. научн.-практ. конф. (24-26 мая 2016 г.; г. Запорожье)*. – Запорожье. – 2016. – С. 176-178.
 29. Пат. 244 Україна, МКІЗ В22С7/02, В22С3/00. Спосіб виготовлення моделей із пінополістиролу / О.Й. Шинський, Л.П. Вишнякова, В.Н. Плотнікова, Є.Ф. Князев; Інститут проблем лиття НАН України. – № 3493216/22-02; заявл. 15.01.1993; опубл. 30.04.1993, Бюл. № 1; Приоритет 27.09.1982, № 1079340 А1 (СРСР). – 1 с.
 30. Гусев С.С. Использование методов центробежного литья для получения изделий из композиционных материалов с упрочненной поверхностью / С.С. Гусев, Д.Н. Лобков, С.С. Казачков // *Материаловедение*. – 1999. – № 5. – С. 50-53.
 31. Алексеева Ю.С. Применение метода центробежного литья для изготовления втулок из градиентных композиционных материалов / Ю.С. Алексеева // *Вестник ФГОУ МГАУ*. – 2008. – № 4. – С. 96-99.
 32. Kevorkijan V. Functionally graded aluminium matrix composites / V. Kevorkijan // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2003. – Vol. 82. – Pp. 2.
 33. Nukami T. In situ synthesis of TiC particles-reinforced aluminum matrix composite / T. Nukami, M.C. Flemings // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 1995. – № 26A. – Pp. 1877-1884. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/BF02670775>.
 34. Locally reinforcement TiC-Fe type produced in situ in castings / E. Olejnik, T. Tokarski, B. Grabowska, Ł. Szymański, P. Kurtyka, W. Maziarz, P. Czapla // *Archives Of Foundry Engineering*. – 2016. – Vol. 16(3). – Pp. 77-82. – Mode of access: <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0054>.
 35. Maziarz W. Microstructure and Mechanical Properties of In Situ Cast Aluminum Based Composites Reinforced with TiC Nano-Particles / W. Maziarz, P. Bobrowski, A. Wójcik // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 985. – Pp. 211-217. – Mode of access: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.985.211>.

References:

1. Rohatgi P. Cast aluminum-matrix composites for automotive applications. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 1991, № 43(4), pp. 10-15. doi: 10.1007/BF03220538.
2. Sharma A.K., Bhandari R., Aherwar A., Pinca-Bretotean C. A study of fabrication methods of aluminium based composites focused on stir casting process. *Materials Today: Proceedings*, 2020, № 27, pp. 1608-1612. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.316.
3. Lelito J., Żak P.L., Gracz B., Szucki M., Kalisz D., Malinowski P., Suchy J.S., Krajewski W.K. Determination of substrate log-normal distribution in the AZ91/SiCp composite. *Metalurgija*, 2015, № 54(1), pp. 204-206.
4. Saleh B., Jiang J., Fathi R., Xu Q., Wang L., Ma A. Study of the microstructure and mechanical characteristics of AZ91-SiCp composites fabricated by stir casting. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, № 3, pp. 102-115. doi: 10.1007/s43452-020-00071-9.
5. Chernyshova T.A., Kobeleva L.I., Bolotova L.K. Diskretno armirovannye kompozicionnye

- materialy s matricami iz aljuminievyh splavov i ih tribologicheskie svoystva [Discretely reinforced composite materials with aluminum alloy matrices and their tribological properties]. *Metally – Metals*, 2001, № 6, pp. 85-98. (Rus.)
6. Mjet'juz F., Rolings R. *Kompozitnye materialy. Mehanika i tehnologija* [Composite materials. Mechanics and technology]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2004. 408 p. (Rus.)
 7. Kondratenko A.N., Golubkova T.A. Perspektivnye tehnologii poluchenija i oblasti primenenija nanostrukturnyh metallomatrichnyh kompozitov [Promising Technologies for Obtaining and Fields of Application of Nanostructured Metal Matrix Composites]. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov – Composite structures*, 2009, № 1, pp. 24-25. (Rus.)
 8. Gul'bin V.N., Kolpakov N.S. Oblegchennye radiacionno-zashhitnye kompozity [Lightweight radiation-protective composites]. *Naukoemkie tehnologii – High technologies*, 2014, vol. 15, № 3, pp. 4-16. (Rus.)
 9. Tang X., Dolman K.F. Composite Metal Product. Patent Canada, no. CA2934084A1, 2015.
 10. Luong D.D., Gupta N., Daoud A., Rohatgi P.K. High strain rate compressive characterization of aluminum alloy/fly ash cenosphere composites. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2011, № 63(2), pp. 53-56. doi: **10.1007/s11837-011-0029-y**.
 11. Omrani E., Moghadam A.D., Algazzar M., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Effect of graphite particles on improving tribological properties Al-16Si-5Ni-5Graphite self-lubricating composite under fully flooded and starved lubrication conditions for transportation applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, № 87(1), pp. 929-939. doi: **10.1007/s00170-016-8531-6**.
 12. Pechnikov A.A., Toleshuly A., Meshherjakov E.G. Litye kompozicionnye izdelija s aljuminievoj matricej [Cast composite products with aluminum matrix]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, № 1(19), vol. 2, pp. 42-44.
 13. Deonath, Narayan R., Rohatgi P.K. Damping capacity, resistivity, thermal expansion and machinability of aluminium alloy-mica composites. *Journal of Materials Science*, 1981, № 16, pp. 3025-3032. doi: **10.1007/BF00540308**.
 14. Baradeswaran A., Perumal A.E. Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites. *Composites Part B: Engineering*, 2013, № 54, pp. 146-152. doi: **10.1016/j.compositesb.2013.05.012**.
 15. Bhushan R.K., Kumar S., Das S. Fabrication and characterization of 7075 Al alloy reinforced with SiC particulates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, № 65(5-8), pp. 611-624. doi: **10.1007/s00170-012-4200-6**.
 16. Ferguson J.B., Aguirre I., Lopez H., Schultz B.F., Cho K., Rohatgi P.K. Tensile properties of reactive stir-mixed and squeeze cast Al/CuO-based metal matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering*, 2014, № 611, pp. 326-332. doi: **10.1016/j.msea.2014.06.008**.
 17. Rohatgi P.R., Menezes P.L., Lovell T., Lovell M.R. Tribological Behavior of Aluminum Micro- and Nano-Composites. *International Journal of Aerospace Innovations*, 2011, № 3(3), pp. 153-162. doi: **10.1260/1757-2258.3.3.153**.
 18. Huang S., Abbas A. Effects of tungsten disulfide on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy manufactured by stir casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, № 817, pp. 153-321. doi: **10.1016/j.jallcom.2019.153321**.
 19. Mohammadi H., Emamy M., Hamnabard Z. The statistical analysis of tensile and compression properties of the as-cast AZ91-X%B4C composites. *International Journal of Metalcasting*, 2019, № 14(2), pp. 505-517. doi: **10.1007/s40962-019-00377-2**.
 20. Chernysheva T.A., Kurganova Ju.A., Kobeleva L.I., Bolotova L.K., Kalashnikov I.E., Katin I.V., Panfilov A.V., Panfilov A.A. Kompozicionnye materialy s matricej iz aljuminievyh splavov, uprochnennyh chasticami, dlja par trenija skol'zhenija [Composite materials with a matrix of aluminum alloys hardened by particles for sliding friction pairs]. *Pokrytija i materialy special'nogo naznachenija – Coatings and materials for special purposes*, 2007, № 3, pp. 38-49. (Rus.)
 21. Vasil'ev V.V. *Kompozitsionnye materialy. Spravochnik* [Composite materials. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 512 p. (Rus.)
 22. Dejack M. Literature Review of CGI and Ductile Iron and Development of Improved Models for HCF. *Conference: International FEMFAT User Meeting*, 2015, pp. 1-48.

23. Pechnikov A.A., Toleshuly A., Meshcheriakov E.G. Vliianie armirovaniia na strukturu, mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoistva KM [Influence of reinforcement on the structure, mechanical and technological properties of CM]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, vol. 2, № 1(19), pp. 44-48.
24. Kumar A., Singh C., Chaudhary R. Recent progress in production of metal matrix composites by stir casting process. *Materials Today: Proceedings*, 2020, № 21, part 3, pp. 1453-1457. **doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.079.**
25. Singh J., Chauhan A. A review of microstructure, mechanical properties and wear behavior of hybrid aluminium matrix composites fabricated via stir casting route. *Sādhanā*, 2019, № 44, Pp. 1-16. **doi: 10.1007/s12046-018-1025-5.**
26. Miracle D.B. Metal matrix composites – from science to technological significance. *Composites science and technology*, 2005, № 65, pp. 526-540. **doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027.**
27. Soltani S., Khosroshahi R.A., Mousavian R.T., Jiang Z.Y., Boostani A.F., Brabazon D. Rare Metals Stir casting process for manufacture of Al-SiC composites. *Rare Metals*, 2017, № 36(7), pp. 581-590. **doi: 10.1007/s12598-015-0565-7.**
28. Nebozhak I.A. Vliianie armirovaniia dispersnym intermetallidom FeCr, implantirovannym v gazi-fitsiruemuuiu model', na strukturu i mekhanicheskie svoistva splava AK12. *Materialy XII Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Lit'e. Metallurgii-2016»* [Effect of Reinforcement with Dispersed FeCr Intermetallic Implanted in a Gasified Model on the Structure and Mechanical Properties of AK12 Alloy. Proceedings of XII Int. Sci.-Pract. Conf «Casting. Metallurgy-2016»]. Zaporozhye, 2016, pp. 176-178. (Rus.)
29. Shins'kii O.I., Vishniakova L.P., Plotnikova V.N., Kniazev S.F. *Sposib виготовлення моделі із пінопілістиролу* [A method of making models from expanded polystyrene]. Patent UA, no. 24, 1993. (Ukr.)
30. Gusev S.S., Lobkov D.N., Kazachkov S.S. Ispol'zovanie metodov tsentrobezhnogo lit'ia dlia polucheniia izdelii iz kompozitsionnykh materialov s uprochnennoi poverkhnost'iu [The use of centrifugal casting methods for obtaining products from composite materials with a hardened surface]. *Materialovedenie – Materials Science*, 1999, № 5, pp. 50-53. (Rus.)
31. Alekseeva Iu.S. Primenenie metoda tsentrobezhnogo lit'ia dlia izgotovleniia vtulok iz gradientnykh kompozitsionnykh materialov [Application of the centrifugal casting method for the manufacture of bushings from graded composite materials]. *Vestnik FGOU MGAU – Bulletin of FGOU MGAU*, 2008, № 4, pp. 96-99. (Rus.)
32. Kevorkijan V. Functionally graded aluminium matrix composites. *American Ceramic Society Bulletin*, 2003, vol. 82, pp. 2.
33. Nukami T., Flemings M.C. In situ synthesis of TiC particles-reinforced aluminum matrix composite. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1995, № 26A, pp. 1877-1884. **doi: 10.1007/BF02670775.**
34. Olejnik E., Tokarski T., Grabowska B., Szymański Ł., Kurtyka P., Maziarz W., Czapla P. Locally reinforcement TiC-Fe type produced in situ in castings. *Archives Of Foundry Engineering*, 2016, vol. 16(3), pp. 77-82. **doi: 10.1515/afe-2016-0054.**
35. Maziarz W., Bobrowski P., Wójcik A. Microstructure and Mechanical Properties of In Situ Cast Aluminum Based Composites Reinforced with TiC Nano-Particles. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 985, pp. 211-217. **doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.985.211.**

Рецензент: В.Б. Семакова
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 21.04.2022