

І.А. Небожак¹, пров. інженер, e-mail: nebozhak@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0291-8144>

В.Г. Новицький¹, канд. техн. наук, пров. наук. співр., e-mail: v_novytskyi@ukr.net

О.В. Дерев'янюк², канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: alederevyanko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2345-7869>

Д.С. Каніболоцький¹, канд. хім. наук, ст. наук. співр., e-mail: kanibolotsky@univ.kiev.ua

А.М. Верховлюк¹, д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України (Київ, Україна)

Залежність триботехнічних властивостей литого композиційного матеріалу системи [Al — FeCr], отриманого з використанням дисперсно-наповненої газмоделі, від параметрів його мікроструктури

Проведено аналіз вітчизняної та зарубіжної науково-технічної й патентної літератури, а також сформульовано й поставлено мету цієї науково-дослідної роботи (НДР). Шляхом інокулювання ливарного Al-сплаву марки АК12 ДСТУ 2839:1994 дисперсним інтерметалідом FeCr у «порожнині» ливарної форми (ЛФ) при литті за моделями, що газифікуються, одержали зразки нульмірного литого композиційного матеріалу (ЛКМ) системи [Al — FeCr]. За допомогою металографічного аналізу (МГА) вдалося довести, що параметри його мікроструктури (питома кількість включень σ -фази та її дисперсність) не лише змінюються по висоті литих зразків, але й залежать один від одного. Результати випробувань досліджуваного матеріалу на зношування в умовах сухого тертя показали, що триботехнічні властивості {спрацювання матеріалу контртіла (МКТ), зношування ЛКМ системи [Al — FeCr] й коефіцієнт тертя ковзання пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х»} залежать як від висоти композитного виливка, так і параметрів його мікроструктури. Із застосуванням МГА та внаслідок випробувань в умовах сухого тертя було експериментально доведено, що спрацювання МКТ та коефіцієнт тертя ковзання пари «Al-сплав АК12 — сталь 40Х» внаслідок армування (композиційного зміцнення) ливарного Al-сплаву марки АК12 дисперсним інтерметалідом FeCr, у середньому, збільшується від 1,15 мг/(см²·км) та 1,77 до 3,75 мг/(см²·км) та 1,98, відповідно. Натомість його зношування, у середньому, зменшується від 17,85 мг/(см²·км) до 14,15 мг/(см²·км).

Ключові слова: Al-матриця, FeCr, σ -фаза, армування, дисперсний інокулятор, дисперсно-наповнена газмодель, інтерметалідна армуюча фаза, композитний виливок, композиційне зміцнення, ЛГМ-процес, ливарний Al-сплав марки АК12, ЛКМ системи [Al — FeCr], металографічний аналіз, параметри мікроструктури, триботехнічні властивості.

Вступ. Нагальні потреби промислового виробництва та стрімка динаміка науково-технічного прогресу визначають пріоритетні напрями застосування композиційних матеріалів (КМ) на металічній основі. Відомості про використання дисперсно-зміцнених алюмоматричних КМ у вітчизняних й зарубіжних розробках, аналіз науково-технічної та патентної літератури показують, що на сьогоднішній день накопичено чималий досвід використання КМ систем «Al-сплави — тугоплавкі, жароміцні, тверді частки» у триботехніці. Розробка алюмоматричних КМ зіграла ключову роль в авіації й ракетобудуванні (обшивки, лонжерони, панелі тощо). У космічній техніці ці матеріали застосовують для виготовлення вузлів

силових конструкцій, які нагріваються в процесі експлуатації. В автомобілебудуванні їх використовують для полегшення кузовів, рам, бамперів та інших деталей. У цивільному будівництві — це прольоти мостів, елементи збірних конструкцій висотних споруд й таке інше. Наповнювач у вигляді підсилюючих елементів в об'ємі КМ розподілений рівномірно або ж рівномірно із заданим градієнтом в усьому перерізі Me-матриці. В якості армуючої фази (АФ) застосовують найрізноманітніші компоненти: С, Мо, V, Al₂O₃, Me_mB_n, Me_mC_n, Me_mN_n, Me_kC_mN_n, SiO₂ тощо. Широкі перспективи відкриваються перед неметалічними безкисневими тугоплавкими сполуками, такими як B₄C, BN, SiC, Si₃N₄, а також твердими тугоплавкими Al₂O₃, ZrO₂ та інших

$Me_m O_n$; $Me_m^I Me_n^{II}$, ситалами, керамікою тощо [1]. АФ може бути представлена у вигляді листів чи волокон, й у цьому випадку КМ є анізотропним (дво- чи одно-мірним, відповідно), або ж у вигляді дисперсних часток, і в такому випадку він є ізотропним (нульмірним) [2]. Високодисперсні частки іншого компонента рівномірно розподілені в АІ-матриці, внаслідок чого утворюється ізотропна структура, яка ефективно чинить опір пластичній деформації.

Ливарні алюмінієві сплави (АІ-сплави) набули широкого розповсюдження практично в усіх галузях народного господарства, а в авіації та ракетобудуванні ці сплави відіграють виключно важливу роль [3], про що вже згадувалося раніше. Це стало можливим завдяки вдалому поєднанню їх високої питомої міцності із гарними технологічними й ливарними властивостями [4]. Проте, низькі твердість та зносостійкість АІ-сплавів обмежують їх використання у техніці для виготовлення деталей, які працюють у вузлах тертя й умов абразивного зношування [3—5].

Аналіз літературних даних та мета роботи. На сьогоднішній день відомо ряд технологічних методів і прийомів покращення АІ-сплавів [2—26], зокрема ливарних [2—5, 7, 9—22, 24, 26], серед яких центральне місце займає їх армування (композиційне зміцнення) [2, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15—22, 24, 26]. ЛКМ, одержані на базі цих сплавів, мають оптимальну мікроструктуру, а також високі твердість та зносостійкість [3, 5, 7, 9, 11, 13, 15—22, 24]. Проте, вплив основних параметрів мікроструктури ЛКМ, зокрема нульмірних, що були одержані у «порожнині» ливарної форми (ЛФ), на їх триботехнічні характеристики достатньою мірою, наразі, не вивчений. Від цього безпосередньо залежать службові та експлуатаційні властивості нульмірних ЛКМ системи [АІ — АФ] як таких, що ми докладно розглянемо далі.

Разом із тим, традиційні методи лиття не забезпечують композитним виливкам високої розмірної точності та мінімальних припусків на механічну обробку [2, 5, 17]. Найперспективнішим методом виготовлення АІ-матричних нульмірних ЛКМ є ЛГМ-процес [7], оскільки головна особливість його — застосування моделі, що газифікується (ГМ), тобто моделі, яка не виймається перед заповненням ЛФ рідким металом, визначає основні переваги цього технологічного процесу у порівнянні з іншими способами лиття. Крім того, ГМ можна отримувати у порожнині пресформи (ПФ) із попередньо спіненого гранульованого модельного матеріалу. Ці обставини дозволили вводити до складу ГМ дисперсні присадки, і тим самим вирішити двоєдину задачу — здійснювати армуюче інокулювання матричного розплаву [9, 11, 13] у «порожнині» ЛФ та проводити утилізацію пилоподібних відходів феросплавної галузі. Імпантування АФ у «тіло» ГМ на практиці зводиться до холодного плакування поверхні підспінених гранул модельного матеріалу дисперсними феросплавами перед їх задуванням або засипанням у порожнину ПФ [27].

Для виготовлення ГМ автоклавним методом, у більшості випадків, застосовується пінополістирол.

Його отримують шляхом двоетапного спінювання гранул полістиролу. Фізико-хімія й технологія процесу промислового виробництва полістиролу докладно описана автором роботи [28].

Розподіл дисперсних включень у Ме-матриці навіть при значному збільшенні температури не змінюється, оскільки ці включення, будучи роз'єднаними самою матрицею, завдяки протіканню дифузійних процесів майже не агломерують. У КМ із Ме-матрицею поєднуються переваги конструкційних матеріалів на металічній основі з перевагами наповнювача, найчастіше високомодульного керамічного або ж інтерметалідного. В даний момент у промисловості застосовують дисперсно-зміцнені КМ на основі практично всіх розповсюджених у техніці сплавів чорних та кольорових металів [29]. Оптимальна Ме-матриця дозволяє реалізувати високі характеристики вихідних компонентів й утворити КМ, що відповідає конкретним умовам його експлуатації. При виборі Ме-матриці потрібно враховувати як механічні та експлуатаційні характеристики КМ, так і технологічність процесу виробництва такого матеріалу. Вимоги до КМ на практиці зводяться не лише до забезпечення необхідних механічних та/або спеціальних властивостей, слід також пам'ятати й про його експлуатаційні характеристики та надійність, що пов'язано з високою в'язкістю руйнування.

Нульмірні ЛКМ системи [АІ — АФ], які працюють на зношування в умовах сухого тертя з іншими конструкційними матеріалами контртіла (МКТ), утворюють разом із ними трибосистему. Фізичними величинами, що кількісно характеризують цю систему [30], на практиці є коефіцієнт тертя пари «ЛКМ системи [АІ — АФ] — МКТ», швидкість зношування та/або знос нульмірного ЛКМ системи [АІ — АФ], а також спрацювання МКТ. Фізичний зміст цих величин [30—35], з позиції трибології, описано нижче.

За визначенням [31], коефіцієнт тертя — це величина, що характеризує силу опору від тертя між взаємодіючими тілами. Залежно від виду тертя розрізняють [30]: коефіцієнт тертя при зсуві (тертя спокою, неповного тертя ковзання і тертя ковзання) та коефіцієнт тертя при коченні. Ці коефіцієнти, у загальному вигляді, можуть бути представлені за допомогою математичних виразів [31], відповідно:

$$f = \frac{F_f}{N} \quad (1)$$

$$f = k + \frac{A_0}{N} \quad (2)$$

де F_f — сила тертя ковзання, Н; N — сила нормальної реакції опори, Н; k — коефіцієнт, залежний від властивостей поверхонь дотичних тіл; A_0 — коефіцієнт зчеплення цих поверхонь, Н.

На думку авторів роботи [32], процеси тертя визначають енергетичні потоки в трибосистемах. Щоб керувати цими потоками потрібно знати механізми виникнення тепла й формування сили тертя. Для аналізу ними [32] була прийнята модель трибологічного

контакту у вигляді ансамблю зв'язків, тобто двохатомних систем, що виникають у контакті при накладенні зовнішнього навантаження, в яких пружні сили таких зв'язків компенсують потім це навантаження. Відповідно до створеної моделі, яка детально описана авторами цієї ж роботи, відносна кількість таких зв'язків пропорційна відношенню навантаження до модуля об'ємної пружності, і при реальних навантаженнях вона знаходиться в діапазоні $10^{-6} \dots 10^{-4}$ від загальної кількості атомів на площі контакту.

Оскільки, як вважають автори публікації [32], сила зв'язку еквівалентна $\text{grad } E_{\text{pot}}$, то сила тертя виникає під енергетичним впливом. З їх міркувань, її (силу тертя) можна подати у вигляді залежності:

$$F_f = \frac{n_A P}{K} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} F(r) p(r) dr \quad (3)$$

де E_{pot} — потенційна енергія, Дж; n_A — кількість атомів на одиницю площі контакту, nm^{-2} ; P — навантаження, Н; K — модуль об'ємної пружності, ГПа; r — міжатомна відстань, Å; $F(r)$ — сила зв'язку в стані міжатомної відстані, Н; $p(r)$ — густина ймовірності станів на міжатомній відстані, nm^{-1} .

У свою чергу, модуль об'ємної пружності являє собою величину, що характеризує пружні властивості матеріалу при малих деформаціях. Його можна визначити розрахунковим методом [33]:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (4)$$

де E — модуль Юнга ($E = 70 \dots 74$ ГПа для Al-сплавів, $E = 190 \dots 210$ ГПа для сталей); μ — коефіцієнт Пуассона ($\mu = 0,30 \dots 0,33$ для Al-сплавів, $\mu = 0,27 \dots 0,30$ для сталей).

Величина зносу — це зміни геометричних розмірів і форми твердих тіл, які визначаються участю їх речовини у формуванні трибоструктур. Потік цієї речовини, усередненої за площиною контакту дотичних тіл, еквівалентний швидкості зношування досліджуваного матеріалу [34]:

$$i(t) = \frac{dl(t)}{dt} \quad (5)$$

де t — поточний час, с; $l(t)$ — знос матеріалу, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{km})$.

Процес зношування матеріалу в часі, як вважає М.В. Кіндрачук з колегами [32, 34, 35], складається із 2-х нерівнозначних етапів — припрацювання та стаціонарного стану. На етапі припрацювання формуються трибологічні структури, потім процес флюктує у стаціонарному режимі з постійними середнім значенням і дисперсією. Надмірний ріст трибоструктури обмежений ентропією, а нижній її рівень — вільною енергією.

Рівняння, що аналітично описують функціональну залежність швидкості зношування досліджуваного матеріалу та його зносу, відповідно, від поточного часу, наглядно представлені нижче [35]:

$$i(t) = (i_0 - \langle i \rangle) \exp \left(-\frac{t}{t_R} \right) + \langle i \rangle \quad (6)$$

$$l(t) = t_R (i_0 - \langle i \rangle) \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{t_R} \right) \right] + t \langle i \rangle \quad (7)$$

де i_0 та $\langle i \rangle$ — початкове та середнє стаціонарне значення швидкості зношування матеріалу, відповідно, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{km} \cdot \text{s})$; t_R — час релаксації припрацювання, с.

Експоненти в правій частині рівняння (6) та рівняння (7), на думку авторів роботи, що розглядається, описують еволюційний процес припрацювання матеріалу, при цьому тривалість припрацювання оцінює час релаксації, а внесок припрацювання матеріалу до його зносу — функціонал [35]:

$$l_0 = t_R (i_0 - \langle i \rangle) \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{t_R} \right) \right] \quad (8)$$

На цьому етапі переважає прагнення вільної енергії до мінімуму, в зоні контакту тіл, що утворюють пару тертя, відбувається агрегація часток, які переносяться, внутрішні потоки речовини спрямовані на формування трибологічної структури та збільшення її об'єму, а потік речовини із системи зменшується поки не досягне стаціонарного рівня. У стаціонарному стані трибоструктура флюктує біля середнього значення, протягом однієї флуктуації частина речовини виходить із цієї системи у вигляді продуктів зношування матеріалу, а потім трибологічна структура відновлюється. Так вважають автори наукової праці [35].

Якщо трибоструктура матеріалу відновлюється на часовому інтервалі τ , то його знос $l(t)$ на цьому ж інтервалі можна розглядати як незалежну величину. Тоді, відповідно до центральної граничної теореми, — розвивають свою думку автори статті [35], — при $t \gg \tau$ знос матеріалу $l(t)$ має нормальний розподіл, і його можна представити за допомогою математичних виразів вигляду:

$$l(t) = t \langle i \rangle \pm \eta \sigma \sqrt{\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

$$\langle i \rangle = \frac{l(t)}{t} \pm \eta \sigma \sqrt{\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

де η — гауссівська величина з одиничною дисперсією; σ — середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного; τ — часовий інтервал кореляції, с.

Виходячи із цих міркувань, була сформульована й поставлена мета цієї НДР. Вона зводилася до того, щоб отримати зразки нульмірного ЛКМ системи [Al — АФ], дослідити його мікроструктуру і триботехнічні властивості, а також з'ясувати, яким чином та якою мірою залежать триботехнічні характеристики досліджуваного КМ від параметрів його мікроструктури.

Оскільки, силумін евтектичного складу марки АК12 відрізняється високими ливарними й технологічними властивостями [4], то на основі цього комерційно-доступного сплаву були отримані зразки нульмірного ЛКМ системи [Al — АФ]. Як АФ досліджуваного композиту, у даній НДР був використаний дисперсний інтерметалід FeCr, більш відомий у сплавах бінарної системи «Залізо — Хром» як σ -фаза, у кількості 10 % від маси контрольного виливка. Таким чином, у цій НДР, згідно з класифікацією [2], мова іде про нульмірний ЛКМ системи [Al — FeCr], надалі за текстом — ЛКМ системи [Al — FeCr].

Методика досліджень. Щоб одержати зразки ЛКМ системи [Al — FeCr] приготували ливарний Al-сплав марки АК12. Досліджуваний матеріал, хімічний склад якого (табл. 1) наведено нижче, було виплавлено у тигельній печі опору моделі «САТ-025-І2». Температура матричного розплаву становить, К: на випуску із плавильного агрегату — 1053; під час формозаповнення — 1023. Підведення рідкого металу у «порожнину» ЛФ здійснювали зверху у бічну стінку ЛФ по товщині майбутнього виливка.

Дисперсний інтерметалід FeCr отримали із литих зразків високохромистого сплаву на основі Fe. Для цього кусковий матеріал було попередньо відпалено у лабораторній муфельній печі моделі «СНО-2,5.5.2,5/13,6 І1» на предмет утворення й виділення σ -фази із твердого розчину Cr в Fe, подрібнено у лабораторній шоківій дробарці моделі «Вібротехнік ЩД-10 6411-00013» та просіяно через сита. Характеристика АФ: температура відпалювання — 1073 К, час ізотермічної витримки — 3600 с; дисперсність — 20 ... 100 мкм, форма частинок — скалкова, фактор нерівності — 2 ... 5. Хімічний склад АФ (табл. 2) композитного виливка представлено нижче.

Порошок заданої дисперсності вдалося отримати завдяки ситовому аналізу. Для цього було використано набір лабораторних сит з плетеної дрітної тканини, що регламентовано ДСТУ EN 233-2:201_ (EN 233-2:1995, IDT). Середню дисперсність частинок σ -фази, при цьому, визначали за формулою [36]:

$$\langle d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i d_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (11)$$

де m_i — маса i -тої фракції порошкоподібної σ -фази, кг; d_i — середнє арифметичне дисперсності частинок σ -фази в i -тій фракції, $\times 10^{-6}$ м.

Залежно від розмірів частинок (дисперсності) порошок інтерметаліду FeCr, у нашому випадку, являє собою, умовно, суміш порошків 2-х неповних груп [36]. Такими групами є тонкий порошок (10 ... 40 мкм) і порошок середньої крупності (40 ... 250 мкм).

В якості МКТ у цій НДР було використано конструкційну низьколеговану сталь марки 40Х ДСТУ 4738:2007. Твердість даного матеріалу за шкалою Роквелла, після його гартування на масло та подальшого відпускання [37], знаходиться у діапазоні 52 ... 54 HRC.

Дослідження впливу висоти композитних виливків на їх триботехнічні характеристики проводили за оригінальною методикою, розробленою спеціалістами ФТІМС НАН України [3, 9, 13, 15, 20]. Для цього, литі заготовки (рис. 1) були попередньо розмічені й порізані на темплети (табл. 3), із яких потім виготовили шліфи для МГА та зразки для випробувань досліджуваних матеріалів на зносостійкість. МГА зразків ЛКМ системи [Al — FeCr] та їх випробування на зношування в умовах сухого тертя здійснювали за нестандартними методиками, аналогічними тим, що описані у роботах [3, 9, 13, 15, 20, 38—41]. Методика визначення параметрів мікроструктури композитних виливків також регламентована ГОСТ 1778-70. Мікроструктура металографічних шліфів травилась за допомогою розчину суміші мінеральних (неорганічних) кислот наступного хімічного складу [42], % (мас. частка): HF — 1,0; HCl — 1,5; HNO₃ — 2,5; H₂O — 95,0. Такими кислотами були: плавикова (HF), соляна (HCl) та азотна (HNO₃).

Триботехнічні властивості матеріалів як армованих (композиційно зміцнених), так і контрольного виливків, а також контртіл, й коефіцієнти тертя ковзання відповідних пар були визначені шляхом математичної обробки експериментальних даних. Математичний апарат, покладений в основу методики розрахунку триботехнічних характеристик досліджуваних матеріалів, докладно описаний у роботах [38—41, 43, 44]. Коефіцієнти тертя ковзання пар «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х» та «сплав АК12 — сталь 40Х», згідно з законом Кулона — Амонтона, були визначені розрахунковим методом [44]. У нашому випадку розрахунки здійснювали за умови, що сила нормальної ре-

Таблиця 1

Хімічний склад [% (мас. частка)] контрольного сплаву

Марка сплаву	Легуючі елементи (Al — основа)						
	Si	Mg	Cu	Mn	Ni	Ti	Fe
АК12 ДСТУ 2839:1994	11,002	0,028	1,105	0,370	0,025	0,055	0,500

Таблиця 2

Хімічний склад [% (мас. частка)] армуючої фази до армування

Природа матеріалу	Легуючі елементи та домішки (Fe — основа)						
	Al	Cu	Mn	Ni	Ti	Cr	Mo
Інтерметалід FeCr	0,363	0,147	1,105	0,359	0,297	39,951	0,447

акції опори дорівнює навантаженню [40], тобто $N = P$.

Величина зносу ЛКМ системи [Al — FeCr] та ливарного Al-сплаву марки АК12, як і спрацювання сталі марки 40Х, визначалась, практично, як відношення втрати маси матеріалу литого зразка й контртіла, відповідно, до добутку номінальної площі контакту пари «зразок — контртіло» та шляху тертя [39, 40, 43]:

$$I_q = \frac{\Delta m}{Sl} \quad (12)$$

де Δm — втрата маси литим зразком й контртілом, мг; S — площа контакту пари «зразок — контртіло», см²; l — шлях тертя, км.

Втрата маси матеріалу як литим зразком, так і контртілом, у свою чергу, була визначена за допомогою емпіричної формули, запропонованої авторами наукових праць [39, 40, 43]:

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (13)$$

Таблиця 3

Параметри мікроструктури ЛКМ системи [Al — FeCr] та його триботехнічні властивості

Індекс темплета	Параметри мікроструктури		Індекс темплета	Триботехнічні характеристики		
	$\bar{D}$, мкм	n , мм ⁻²		I_q , мг/(см ² -км)	I_q , мг/(см ² -км)	f
	В	В		В	К	В-К
1-Б	В	В	1-А	17,8	1,7	2,3
2-Б	26,6	263	2-А	20,0	0,9	2,4
3-Б	35,5	184	3-А	15,5	2,3	2,1
4-Б	50,9	074	4-А	12,1	5,7	1,7
5-Б	57,1	063	5-А	10,2	6,3	1,6
6-Б	45,4	068	6-А	13,3	5,6	1,8

Примітки: В — виливок, К — контртіло, В-К — пара тертя ковзання

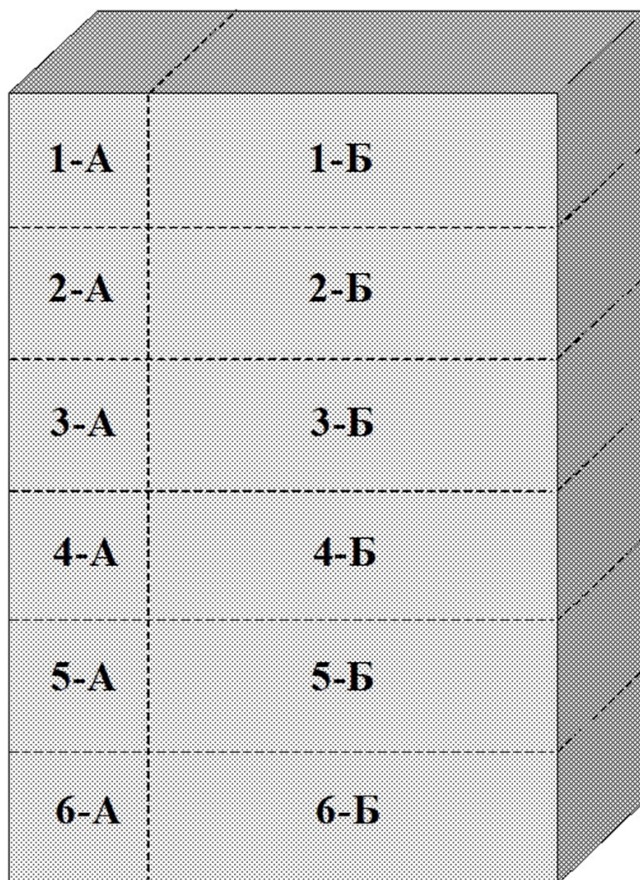


Рис. 1. Схема розрізання виливків на темплети для вивчення структури (1-А ... 6-А) та властивостей (1-Б ... 6-Б) ЛКМ системи [Al — FeCr] по вертикалі [11]

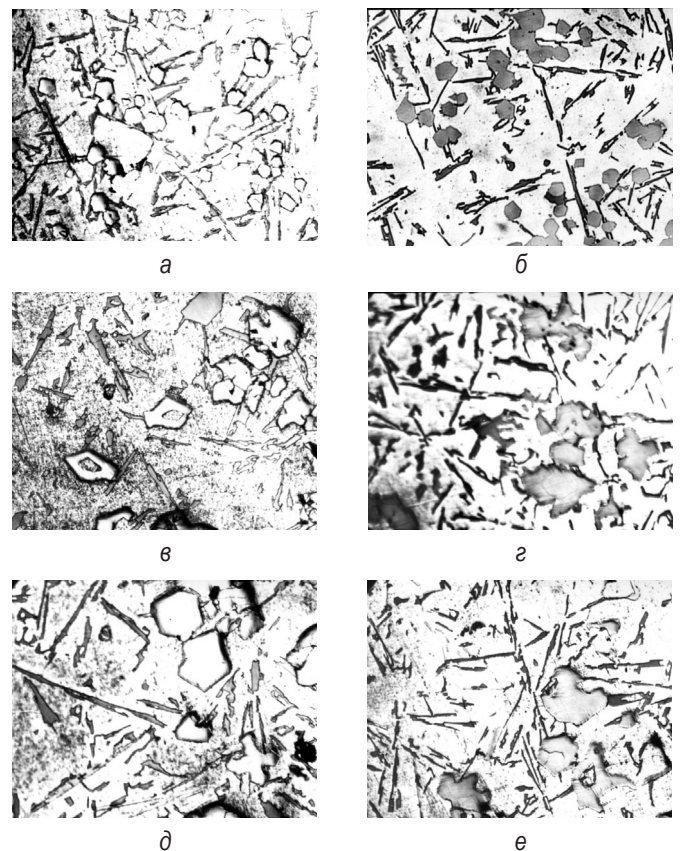


Рис. 2. Мікроструктура (x200) ЛКМ системи [Al — FeCr] у «контрольній» площині литого зразка по його висоті: а ... е — темплети з індексами «1-А» ... «6-А» відповідно [3]

де m_1, m_2 — маси литого зразка й контртіла до і після випробування, відповідно, мг.

Обговорення результатів експерименту. Експериментально встановлено, що ефективність композиційного зміцнення ливарних Al-сплавів, зокрема марки АК12, дисперсним інтерметалідом FeCr, у першу чергу, визначається мікроструктурою ЛКМ системи [Al — FeCr], одержаного на базі цих сплавів (цього сплаву). Критеріями оцінки або параметрами мікроструктури композитного виливка є, насамперед, середня дисперсність та питома кількість включень інтерметалідної АФ. Від цих показників, перш за все, залежать фізико-механічні [11, 15, 22] й спеціальні, зокрема триботехнічні [13, 15, 18] властивості досліджуваного композиту, про що вже згадувалося раніше.

Проте, автори цієї НДР дійшли висновків, наведених вище, із тих міркувань, що як триботехнічні характеристики [13, 15, 18, 20], так і параметри мікроструктури [3, 9, 16, 18, 20, 22, 24] зразків ЛКМ системи [Al — FeCr] змінюються по висоті (рис. 2) композитних виливків. Щоб спростувати або підтвердити це припущення необхідно провести серію досліджень, які б дозволили з'ясувати, яким чином та якою мірою середня дисперсність й питома кількість включень інтерметалідної АФ впливають на спрацювання МКТ, тобто конструкційної низьколегованої сталі марки 40Х, зношування ливарного Al-сплаву марки АК12 та ЛКМ системи [Al — FeCr], а також коефіцієнти тертя ковзання пар «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х» та «сплав АК12 — сталь 40Х». Щоб спрогнозувати, надалі, залежність триботехнічних властивостей того чи іншого досліджуваного матеріалу від параметрів його мікроструктури доцільно шляхом математичної обробки експериментальних даних вивести емпіричні рівняння, які б дозволили аналітично описати функціональний зв'язок незалежних факторів з тими чи іншими якісними й кількісними показниками.

Результати експериментальних даних (див. табл. 3) показали, що середня дисперсність та питома кількість включень інтерметалідної АФ не лише змінюються по висоті композитного виливка (див. рис. 2), але й знаходяться між собою у функціональній залежності. Щоб виявити її характер довелося вдаватися до графічної інтерпретації результатів поставленого експерименту (рис. 3), яка показала, що ця залежність носить степеневий характер. Так, наприклад, збільшення питомої кількості включень інтерметалідного FeCr від 63 мм² до 263 мм² є причиною підвищення середньої дисперсності від 53,1 мкм до 26,6 мкм. Подібне явище є наслідком теплофізичних процесів, що відбуваються під час формозаповнення, а також в об'ємі металічної ванни в процесі кристалізації. Процеси, які мають місце в системі «Al-розплав — ГМ — ЛФ», і про які, наразі, іде мова, докладно описані авторами НДР [3], й не тільки. Математична обробка результатів проведених досліджень дозволила вивести емпіричне рівняння ($R^2 = 0,9096$), яке аналітично описує вплив питомої кількості включень інтерметалідної АФ на її середню дисперсність в структурі ЛКМ системи [Al — FeCr]:

$$\bar{D} = 394,07 \cdot n^{-0,484} \quad (14)$$

де R^2 — величина достовірності апроксимації; $\bar{D}$ — середня дисперсність σ -фази, мкм; n — питома кількість включень σ -фази, мм².

Аналіз результатів поставленого експерименту (див. табл. 3) дозволив з'ясувати, що між параметрами мікроструктури композитних виливків та їх триботехнічними характеристиками існує функціональний зв'язок. Параметрами мікроструктури, які на думку авторів цієї НДР могли істотно вплинути на триботехнічні властивості зразків ЛКМ системи [Al — FeCr], є середня дисперсність й питома кількість включень часток АФ в структурі досліджуваного композита, про що вже згадувалося раніше.

Графічна інтерпретація (рис. 4, 5) експериментальних даних (див. табл. 3) дозволила з'ясувати, яким саме чином та якою мірою комплексно впливають середня дисперсність й питома кількість включень часток інтерметаліду FeCr на триботехнічні властивості ЛКМ системи [Al — FeCr], що працює у парі зі сталлю марки 40Х. Зокрема встановлено, що зниження середньої дисперсності інтерметалідної АФ від 26,6 мкм до 57,1 мкм (див. рис. 4) призводить до стрімкого падіння коефіцієнта тертя ковзання пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х». Дана характеристика, при цьому, знаходиться в інтервалі 2,4 ... 1,6. Зазначений чинник сприяє також і зменшенню зношування зразків ЛКМ системи [Al — FeCr], практично, від 20,0 мг/(см²·км) до 10,2 мг/(см²·км). Спрацювання МКТ за даних умов навпаки збільшується, й на початку досліджуваного інтервалу воно становить 0,9 мг/(см²·км), у той час як в його кінці досягає 6,3 мг/(см²·км). Дослідження залежності триботехнічних характеристик пари тертя (див. рис. 5) від питомої кількості включень часток інтерметалідної АФ показали, що у діапазоні від 63 мкм до 263 мкм коефіцієнт тертя ковзання пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х» та зношування ЛКМ системи [Al — FeCr] зростають від 1,6 й 10,2 мг/(см²·км) до 2,4 й 20,0 мг/(см²·км), відповідно. Натомість, по мірі збільшення питомої кількості включень часток інтерметаліду FeCr спрацювання сталі марки 40Х зменшується від 6,3 мг/(см²·км) при 63 мкм до 0,9 мг/(см²·км) при 263 мкм.

Математична обробка результатів проведених досліджень, яка практично зводилася до лінійної апроксимації співвідношень фізичних величин, заданих у табличній формі (див. табл. 3), дозволила аналітично описати вплив параметрів мікроструктури ЛКМ системи [Al — FeCr], що утворює зі сталлю марки 40Х пару тертя, на триботехнічні властивості матеріалу композитного виливка й МКТ. Емпіричні рівняння, які були отримані внаслідок математичної обробки результатів експерименту (див. табл. 3), наведені нижче:

$$I_{q[Al-FeCr]}^{40X} = -5 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{D}^3 + 6,76 \cdot 10^{-2} \cdot \bar{D}^2 - 3,1498 \cdot \bar{D} + 64,845, \quad (15)$$

$$I_{q(40X)}^{[Al-FeCr]} = -2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{D}^2 + 3,905 \cdot 10^{-1} \cdot \bar{D} - 7,5732, \quad (16)$$

$$f_{[Al-FeCr]}^{40X} = 14,07 \cdot \bar{D}^{-0,5389}, \quad (17)$$

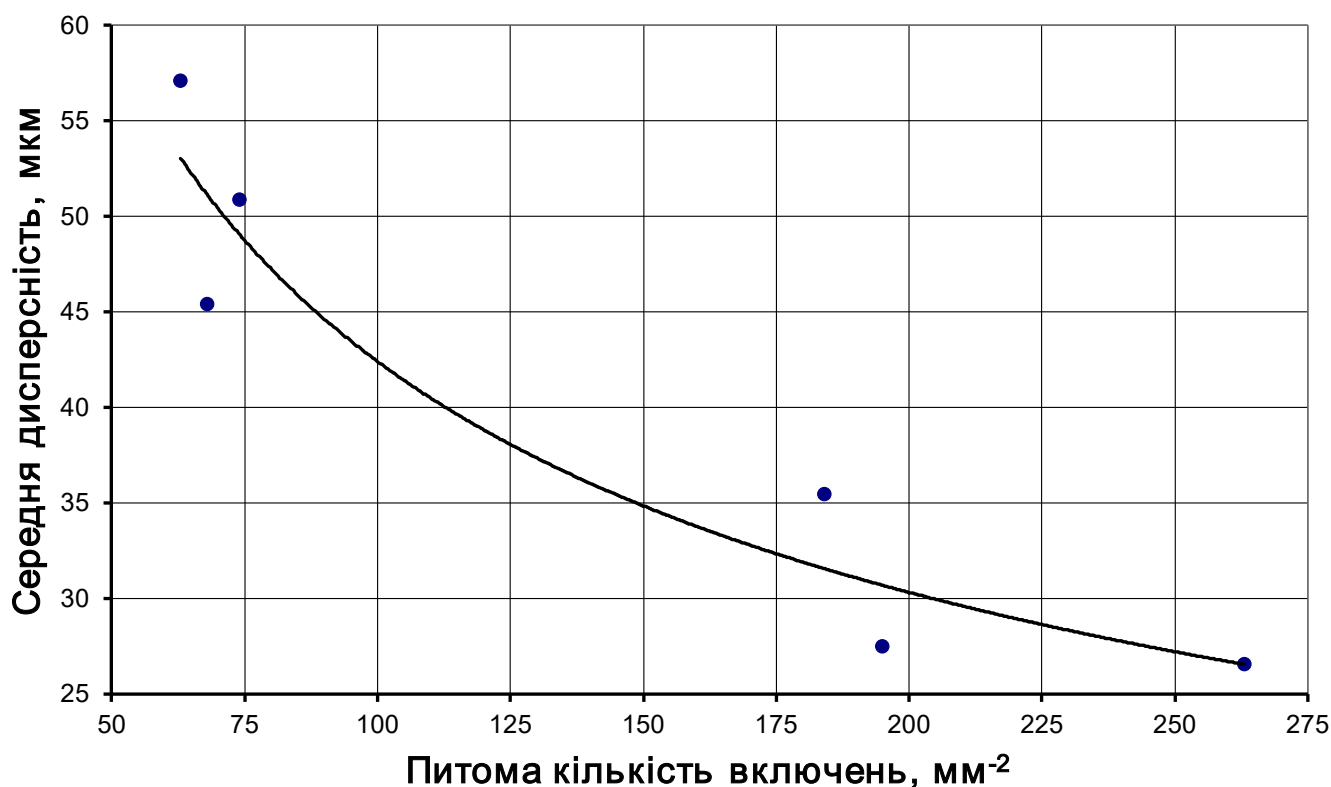


Рис. 3. Залежність середньої дисперсності інтерметалідної армуючої фази FeCr від питомої кількості її включень

$$I_{q[Al-FeCr]}^{40X} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot n^3 - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot n^2 + 2,475 \cdot 10^{-1} \cdot n + 4,5 \cdot 10^{-1}, \quad (18)$$

$$I_{q(40X)}^{[Al-FeCr]} = 9 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 - 5,44 \cdot 10^{-2} \cdot n + 9,1792, \quad (19)$$

$$f_{[Al-FeCr]}^{40X} = 5,747 \cdot 10^{-1} \cdot n^{0,2563}, \quad (20)$$

де $I_{q[Al-FeCr]}^{40X}$ — зношування ЛКМ системи [Al — FeCr], що працює у парі зі сталлю марки 40X, мг/(см²·км); $I_{q(40X)}^{[Al-FeCr]}$ — спрацювання сталі марки 40X, яка працює у парі з ЛКМ системи [Al — FeCr], мг/(см²·км); $f_{[Al-FeCr]}^{40X}$ — коефіцієнт тертя ковзання пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40X».

Для емпіричних рівнянь 15, 16, 17, що аналітично описують вплив середньої дисперсності інтерметалідної АФ в структурі композитного виливка на триботехнічні характеристики ЛКМ системи [Al — FeCr], який утворює зі сталлю марки 40X пару тертя (див. рис. 4), $R^2 = 0,9791$, $R^2 = 0,9529$, $R^2 = 0,9927$, відповідно. Емпіричним рівнянням 18, 19, 20, що аналітично описують залежність триботехнічних властивостей ЛКМ системи [Al — FeCr], який працює у парі зі сталлю марки 40X, від питомої кількості включень інтерметаліду FeCr (див. рис. 5), відповідають $R^2 = 0,9159$, $R^2 = 0,9932$, $R^2 = 0,9405$.

Такий характер функціональних залежностей (див. рис. 4, 5), що існує між параметрами мікроструктури ЛКМ системи [Al — FeCr] і триботехнічними властивостями матеріалу виливка й МКТ, можна пояснити таким чином. По мірі зменшення середньої

дисперсності інтерметалідної АФ на межі розділу фаз «литий зразок — контртіло» зменшується загальна площа м'якої Al-матриці, яка безпосередньо контактує із МКТ, тобто з конструкційною низьколегованою сталлю марки 40X. Сумарна площа твердих та зносостійких включень інтерметаліду FeCr у цій площині, водночас, збільшується. А це призводить, насамперед, до того, що у процесі випробування досліджуваного зразка на зношування в умовах сухого тертя, налипання Me-матриці ЛКМ системи [Al — FeCr] на поверхню контртіла істотно зменшується і, як наслідок того, знижується коефіцієнт тертя пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40X». За цієї ж причини зменшується величина зношування ЛКМ системи [Al — FeCr]. Разом із тим, збільшення загальної площі контакту компонентів системи «інтерметалід FeCr — сталь 40X» неодмінно сприяє спрацюванню МКТ. Вплив питомої кількості включень часток інтерметалідної АФ на триботехнічні властивості досліджуваної пари тертя можна пояснити за допомогою функціональної залежності, що існує між цією характеристикою та середньою дисперсністю часток інтерметаліду FeCr. Ця залежність у вигляді масиву числових експериментальних даних представлена в табл. 3, наглядно показана на рис. 3 та аналітично описана за допомогою емпіричного рівняння 14.

Висновки

Із застосуванням МГА та в результаті випробувань на зношування в умовах сухого тертя виливків із ливарного Al-сплаву марки АК12 ДСТУ 2839:1994,

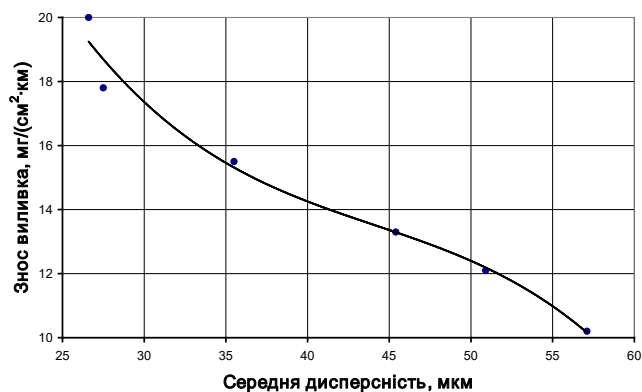
армованого (композиційно зміцненого) за допомогою дисперсно-наповненої ГМ інтерметалідом FeCr, було експериментально доведено, що:

а) між питомою кількістю включень інтерметалідної АФ в структурі ЛКМ системи [Al — FeCr] та її середньою дисперсністю існує функціональний зв'язок — чим більша питома кількість включень σ -фази, тим вища її середня дисперсність (збільшення питомої кількості включень інтерметалідної АФ від 63 мм^2 до 263 мм^2 призводить до того, що її середня дисперсність

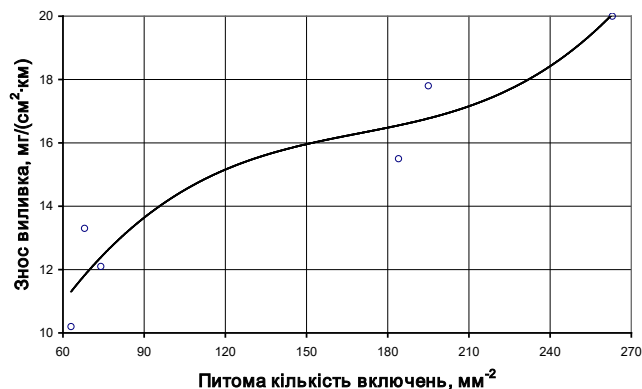
підвищується від $57,1 \text{ мкм}$ до $26,6 \text{ мкм}$);

б) по мірі зниження середньої дисперсності часток інтерметаліду FeCr від $26,6 \text{ мкм}$ до $57,1 \text{ мкм}$ коефіцієнт тертя ковзання пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х» й зношування ЛКМ системи [Al — FeCr] зменшуються від $2,4$ й $20,0 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{км})$ до $1,6$ й $10,2 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{км})$, відповідно, а спрацювання конструкційної низьколегованої сталі марки 40Х збільшується від $0,9 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{км})$ до $6,3 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{км})$;

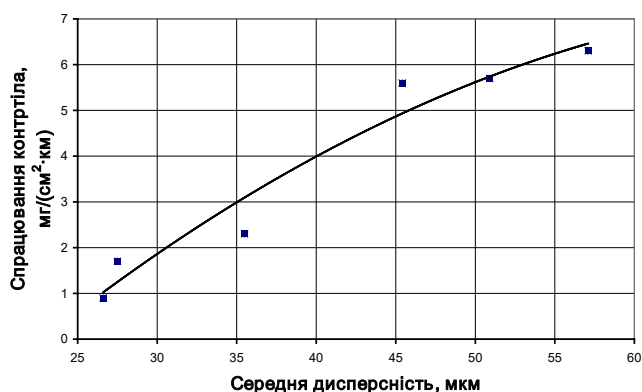
в) збільшення питомої кількості включень



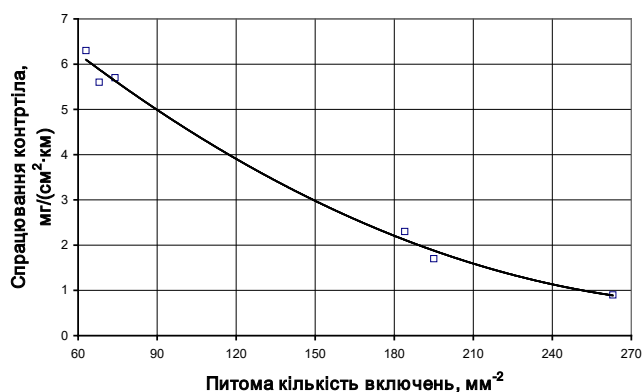
а



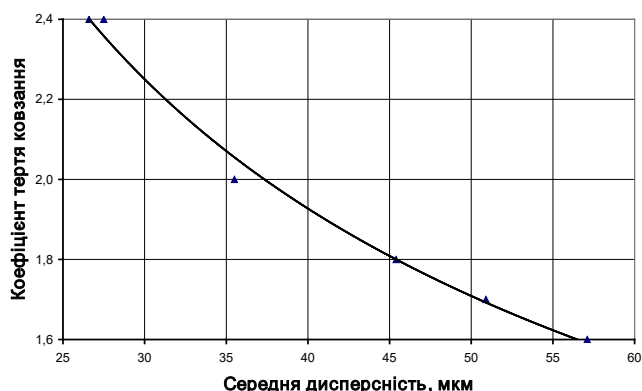
а



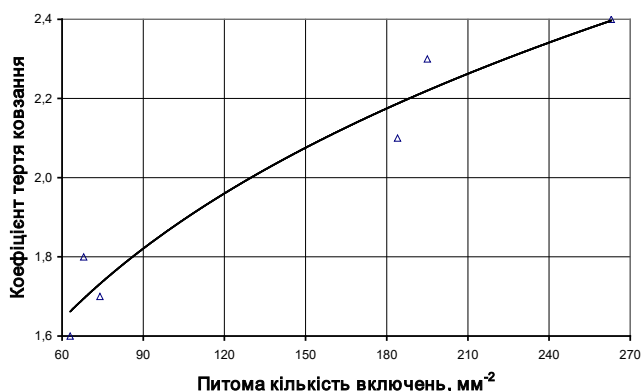
б



б



в



в

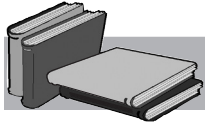
Рис. 4. Вплив середньої дисперсності інтерметалідної армуючої фази на триботехнічні характеристики пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х»: а — знос виливка; б — спрацювання контртіла; в — коефіцієнт тертя пари

Рис. 5. Залежність триботехнічних властивостей пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х» від питомої кількості включень інтерметаліду FeCr: а — зносу виливка; б — спрацювання контртіла; в — коефіцієнта тертя пари

інтерметалідної АФ в структурі литих заготовок від 63 мм² до 263 мм² призводить до того, що коефіцієнт тертя ковзання пари «ЛКМ системи [Al — FeCr] — сталь 40Х» збільшується від 1,6 до 2,4; натомість зношування ЛКМ системи [Al — FeCr] та спрацювання сталі марки 40Х зменшуються від 20,0 мг/(см²·км) та 6,3 мг/(см²·км) до 10,2 мг/(см²·км) та 0,9 мг/(см²·км), відповідно;

г) спрацювання сталі марки 40Х та коефіцієнт тертя ковзання пари «Al-сплав АК12 — сталь 40Х» внаслідок

армування (композиційного зміцнення) ливарного Al-сплаву марки АК12 дисперсним інтерметалідом FeCr, у середньому [13], збільшується від 1,15 мг/(см²·км) й 1,77 до 3,75 мг/(см²·км) й 1,98, відповідно, у той час як його зношування, у середньому, зменшується від 17,85 мг/(см²·км) до 14,15 мг/(см²·км).

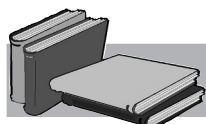


ЛІТЕРАТУРА

1. Chang W.S., Muddle B.C. Trialuminide intermetallic alloys for elevated temperature applications — overview. *Metal and Materials*. 1997. No. 3 (1). P. 1—15. <https://doi.org/10.1007/BF03026100>
2. Затуловський С.С., Кезик В.Я., Иванова Р.К. Литые композиционные материалы. Киев: Техника, 1990. 240 с.
3. Небожак І.А., Дерев'янюк О.В. Структура литого композиційного матеріалу системи [Al — FeCr], отриманого з використанням дисперсно-наповненої моделі, що газифікується. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 1 (324). С. 70—80. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.01.070>
4. Цветное литье: справ. пособ. / Н.М. Галдин и др.; под общ. ред. Н.М. Галдина. Москва: Машиностроение, 1989. 528 с. (Технология литейного производства).
5. Затуловський А.С. Литі композиційні матеріали. URL: https://esu.com.ua/search_articles.php?id=55239 (дата звернення: 27.04.2020).
6. Шишкіна Ю.О. Вдосконалення процесів отримання алюмоматричних композитів на основі системи Al — TiC методами термічного синтезу та гарячого штампування: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / НАН України. ІПМ ім. І.М. Францевича. Київ, 2018. 217 с.
7. Takeshi Kobayashi, Toru Maruyama. Thermal Decomposition Behavior of Expandable Pattern Including Blended Metal or Metal Oxide Powder in Evaporative Pattern Casting Of Al — Si System Alloy. *Materials Transactions*. 2003. Vol. 44. No. 11. P. 2404—2409.
8. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Комплексная электронно-ионно-плазменная обработка поверхности алюминия в едином вакуумном цикле. *Известия ВУЗов. Физика*. 2019. Т. 62. № 7 (739). С. 59—68. (Сильноточная электроника и ее применение).
9. Гаврилюк В.П., Шинский О.И., Ткачук И.В., Небожак И.А. Исследование возможности получения монолитных износостойких композиционных отливок и двухслойных отливок с износостойким композиционным слоем по ЛГМ-процессу. *Процессы литья*. 2000. № 3. С. 86—91.
10. Михаленков К.В. Перераспределение титана при кристаллизации алюминия. *Процессы литья*. 2002. № 2. С. 37—41.
11. 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.
12. Гзовский К.Ю., Бялик О.М., Голуб Л.В., Кулинич А.А. Микролегирование алюминиевых сплавов Al — Ti — С -лигатурой. *Литейное производство*. 2001. № 4. С. 15—17.
13. Небожак І.А., Новицький В.Г., Шинський О.Й., Гаврилюк В.П. Триботехнічні властивості сплаву АК 12, армованого дисперсним інтерметалідом FeCr. *Металознавство та обробка металів*. 2004. № 2. С. 62—70.
14. Михаленков К.В., Чернега Д.Ф. Модифицирование алюминия титаном, цирконием и лигатурами AlTiB и AlTiC. *Литейное производство*. 2001. № 4. С. 17—20.
15. Небожак І.А., Небожак Я.І., Пересенчук В.В., Шинський О.Й. Дослідно-експериментальна партія виливків, отриманих за допомогою дисперсно-наповнених моделей, що газифікуються. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 4 (327). С. 78—84. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.078>
16. Небожак И.А. Особенности структурообразования железоуглеродистых и цветных сплавов, обработанных ферродобавками в «полости» литейной формы по ГАМОЛИВ-процессу. Литейное производство в новом веке — как победить в конкуренции: тезисы докл. Междунар. науч.-тех. конгресса. Киев: Редакция журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитъ», 2002. С. 13—14.
17. Шумихин В.С., Щерецкий А.А., Лахненко В.Л. Влияние дисперсных частиц на структуру металлической матрицы композиционных материалов на основе алюминия. *Процессы литья*. 2002. № 2. С. 33—37.
18. Небожак И.А. Влияние армирования дисперсным интерметаллидом FeCr, имплантированным в газифицируемую модель, на структуру и триботехнические свойства сплава АК12. Литейное производство: высококачественные отливки на основе эффективных технологий: тезисы докл. Междунар. науч.-тех. конгресса. Киев: Редакция журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитъ», 2004. С. 86—87.

19. Белоусов Н.Н. Литье с кристаллизацией под давлением композитов на алюминиевой основе. *Литейное производство*. 1992. № 6. С. 14—16.
20. Ivan A. Nebozhak, Viktor G. Novytsky, Oleg I. Shynsky, Vladimir P. Havryliuk. Wear Rate Of Aluminum Alloys Reinforced By Means Of Dispersed Intermetallic Compound Fe-Cr Under Dry Friction. *Proceedings of WTC2005 World Tribology Congress III*. Washington, 2005. WTC2005-63062. P. 1—2.
21. Курганова Ю.А. и др. Технология получения перспективного алюмоматричного композиционного материала с дискретными волокнами Al_2O_3 . *Технология металлов*. 2019. № 10. С. 22—27. (Новые материалы. Технология композиционных материалов).
22. Небожак И.А. Влияние армирования дисперсным интерметаллидом FeCr, имплантированным в газифицируемую модель, на структуру и механические свойства сплава АК12. Литье-2016: тезисы докл. XII Междунар. науч.-практ. конф. Запорожье, 2016. С. 166—168.
23. Oleksandr I. Raychenko, Oleksandr V. Derev'yanko, Victor P. Popov. Analysis of diffusion from an inclusion in a current-carrying liquid metal. *Progress in Computational Fluid Dynamics*. 2004. Vol. 4. No. 2. P. 92—98. <https://doi.org/10.1504/PCFD.2004.003790>
24. Небожак И.А., Шинський О.Й. Параметри трибоструктури ЛКМ системи [Al – FeCr], отриманого за допомогою дисперсно-наповненої газомоделі. Литво. Металургія. 2021: матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (18—20 трав. 2021 р., м. Запоріжжя) / під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко. Запоріжжя: АА ТанDEM, 2021. С. 128—130.
25. Райченко А.И. и др. Активизирующее действие электрического тока на проникновение расплавленного металла в глубь поверхностных дефектов материалов различной физической природы. *Порошковая металлургия*. 2003. № 3—4. С. 124—128.
26. Небожак И.А., Шинський О.Й. Характер зв'язку між структурними складовими ЛКМ системи [Al – FeCr], отриманого у “порожнині” ливарної форми за ЛГМ-процесом. Литво. Металургія. 2021: матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (18—20 трав. 2021 р., м. Запоріжжя) / під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко. Запоріжжя: АА ТанDEM, 2021. С. 131—134.
27. Шинський О.Й., Вишнякова Л.П., Плотнікова В.Н., Князев Є.Ф. Спосіб виготовлення моделей із пінополістиролу / НАН України. Ін-т пробл. лиття (Україна): пат. 244 Україна: МКІЗ В22С7/02, В22С3/00. № 3493216/22-02; заявл. 15.01.93; опубл. 30.04.93, Бюл. № 1; пріоритет 27.09.82, № 1079340 А1 (СССР). 1 с.
28. Павлов В.А. Пенополистирол. Москва: Химия, 1973. 240 с.
29. Косторнов А.Г. Триботехническое материаловедение: монография. Луганск: Ноулидж. Донецк. отд-ние, 2012. 696 с.
30. Гаркунов Д.И. Триботехника. Москва: Машиностроение, 1985. 424 с.
31. Коефіцієнт тертя: Вікіпедія. URL: <https://uk.m.wikipedia.org> (дата звернення: 20.01.2023).
32. Кіндрачук М.В., Кульгавий Е.А. Трибологія — наука двадцять першого століття. *Вісник НАУ*. 2005. № 4. С. 67—72.
33. Механічні властивості матеріалу: Вікіпедія. URL: <https://uk.m.wikipedia.org> (дата звернення: 17.01.2023).
34. Кіндрачук М.В., Кульгавий Е.А., Перро Д.І., Подлесний В.О. Триботехнічні характеристики гетерогенних карбидовмісних покриттів. *Вісник НАУ*. 2009. URL: <https://jrn1.nau.edu.ua> (дата звернення: 19.01.2023).
35. Кіндрачук М.В., Кульгавий Е.А., Шевченко О.Л., Данілов А.П. Метод визначення триботехнічних характеристик антифрикційних систем. *Вісник НАУ*. 2009. Т. 1. № 1. URL: <https://jrn1.nau.edu.ua> (дата звернення: 21.01.2023).
36. Властивості металевих порошків. URL: https://elib.intu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/садова/page13.html (дата звернення: 28.12.2022).
37. Масленников Ф.И. Лабораторный практикум по металловедению. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машгиз, 1961. 268 с.
38. Методи випробувань на зношування. URL: <https://zp.edu.ua/metody-vyprobuvan-na-znoshuvannya> (дата звернення: 05.10.2020).
39. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посіб. / МОН України. ТНТУ ім. Івана Пулюя. Тернопіль, 2011. 322 с. URL: http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/1076/1/Text_Book_Zakalov_Basic.pdf (дата звернення: 30.10.2020).
40. Гаврилюк В.П., Новицкий В.Г. Методика определения износостойкости материалов в условиях трения скольжения на машине трения М22М. Киев: ФТИМС НАН Украины, 2002. 4 с.
41. Мамыкин Э.Т., Юга А.И. Комплекс машин и методика определения антифрикционных свойств при трении скольжения. *Порошковая металлургия*. 1973. № 1. С. 67—72.
42. Бенкерт М., Клем Х. Способы металлографического травления: справ. пособ.: пер. с нем. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1988. 400 с.
43. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. Москва: Машиностроение, 1977. 207 с.
44. Сила тертя: дистанційна підтримка освіти школярів. URL: <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/12059> (дата звернення: 18.12.2022).

Надійшла 23.03.2023



REFERENCES

1. Chang, W.S., Muddle, B.C. (1997). Trialuminide intermetallic alloys for elevated temperature applications — overview. *Metal and Materials*, 3 (1), 1—15. <https://doi.org/10.1007/BF03026100>
2. Zatulovsky, S.S., Kezik, V.Ya., Ivanova, R.K. (1990). *Cast composite materials*. Kyiv: Tekhnika, 240 p. [in Russian].
3. Nebozhak, I.A., Derev'yanko, O.V. (2021). Structure of the cast composite material for system [Al – FeCr], obtained by application of dispersionally filled gasifying model. *Metal and Casting of Ukraine*, 29, 1 (324), 70—80. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.01.070> [in Ukrainian].
4. Galdin, N.M et al. (1989). *Colored casting: Handbook*, under total. ed. N.M. Galdin. Moscow: Mashinostroenie, 528 p. (Foundry technology) [in Russian].
5. Zatulovsky, A.S. *Casting composite materials*. URL: https://esu.com.ua/search_articles.php?id=55239 (Last accessed: 27.04.2020) [in Ukrainian].
6. Shishkina, Yu.O. (2018). Improvement of processes for obtaining aluminos-matrix composites based on the system Al – TiC by methods of thermal synthesis and hot stamping: thesis ... candidate technical Sciences: 05.16.06 / NAS of Ukraine. IPM named after I.M. Frantsevich. Kyiv, 2018. 217 p. [in Ukrainian].
7. Takeshi Kobayashi, Toru Maruyama (2003). Thermal Decomposition Behavior of Expandable Pattern Including Blended Metal or Metal Oxide Powder in Evaporative Pattern Casting Of Al – Si System Alloy. *Materials Transactions*, 44, 11, 2404—2409.
8. Koval, N.N., Ivanov, Yu.F. (2019). Complex electron-ion-plasma treatment of aluminum surface in a single vacuum cycle. *Izvestiya VUZov. Physics*, 62, 7 (739), 59—68 [in Russian].
9. Gavriluk, V.P., Shinsky, O.I., Tkachuk, I.V., Nebozhak, I.A. (2000). Study of the possibility of obtaining monolithic wear-resistant composite castings and two-layer castings with a wear-resistant composite layer by the casting on gasifiable models. *Casting processes*, 3, 86—91 [in Russian].
10. Mikhalekov, K.V. (2002). Redistribution of titanium during the crystallization of aluminum. *Casting processes*, 2, 37—41 [in Russian].
11. Nebozhak, I.A., Shinsky, O.I., Gavriluk, V.P., Panasenko, D.D. (2004). Mechanical properties of isotropic cast composite materials of the [Al – FeCr] system obtained by casting according to gasified models. *Casting processes*, 2, 83—87 [in Russian].
12. Gzovsky, K.Yu., Byalik, O.M., Golub, L.V., Kulinich, A.A. (2001). Microalloying of aluminum alloys with Al – Ti – C alloy. *Foundry. Technologies and Equipment*, 4, 15—17 [in Russian].
13. Nebozhak, I.A., Novitskiy, V.G., Shinsky, O.Y., Gavriluk, V.P. (2004). Tribotechnical power of AK12 alloy reinforced with dispersed intermetal FeCr. *Scientific Technical Journal Metal Science & Treatment of Metals*, 2, 62—70 [in Ukrainian].
14. Mikhalekov, K.V., Chernega, D.F. (2001). Modification of aluminum with titanium, zirconium and AlTiB and AlTiC ligatures. *Foundry. Technologies and Equipment*, 4, 17—20 [in Russian].
15. Nebozhak, I.A., Nebozhak, Ya.I., Peresenchuk, V.V., Shyn'sky, O.Y. (2021). Experimental batch of castings obtained by dispersion-filled evaporative models. *Metal and Casting of Ukraine*, 29, 4 (327), 78—84. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.078> [in Ukrainian].
16. Nebozhak, I.A. (2002). Features of the structure formation of iron-carbon and non-ferrous alloys treated with ferroadditives in the “cavity” of the casting mold according to the GAMOLIV-process. *Foundry in the new century — how to beat the competition: abstracts International sci.-tech. congress*. Kyiv: Editorial Board of the journal “Casting Processes” with the participation of MP “Informlityo”, 13—14 [in Russian].
17. Shumikhin, V.S., Shheretskiy, A.A., Lakhnenko, V.L. (2002). Influence of dispersed particles on the structure of the metal matrix of aluminum-based composite materials. *Casting processes*, 2, 33—37 [in Russian].
18. Nebozhak, I.A. (2004). Effect of reinforcement with dispersed FeCr intermetallic compound implanted in a gasified model on the structure and tribological properties of the AK12 alloy. *Foundry: high-quality castings based on efficient technologies: abstracts International sci.-tech. congress*. Kyiv: Editorial Board of the journal “Casting Processes” with the participation of MP “Informlityo”, 86—87 [in Russian].
19. Belousov, N.N. (1992). Casting with crystallization under pressure of aluminum-based composites. *Foundry. Technologies and Equipment*, 6, 14—16 [in Russian].
20. Ivan A. Nebozhak, Viktor G. Novytsky, Oleg I. Shynsky, Vladimir P. Havryliuk (2005). Wear Rate Of Aluminum Alloys Reinforced By Means Of Dispersed Intermetallic Compound Fe-Cr Under Dry Friction. *Proceedings of WTC2005 World Tribology Congress III*. Washington, 2005. WTC2005-63062, 1—2.
21. Kurganova, Yu.A. et al. (2019). Technology of obtaining a promising aluminum-matrix composite material with discrete fibers Al₂O₃. *Technology of metals*, 10, 22—27 (New materials. Technology of composite materials) [in Russian].
22. Nebozhak, I.A. (2016). Effect of reinforcement with dispersed FeCr intermetallic compound implanted in a gasified model on the structure and mechanical properties of the AK12 alloy. *Casting-2016: abstracts of reports. XII Intern. scientific-practical conf. Zaporozhye*, 166—168 [in Russian].
23. Oleksandr I. Raychenko, Oleksandr V. Derev'yanko, Victor P. Popov (2004). Analysis of diffusion from an inclusion in a current-carrying liquid metal. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 4 (2), 92—98. <https://doi.org/10.1504/PCFD.2004.003790>

24. Nebozhak, I.A., Shinsky, O.Y. (2021). Parameters of the tribostructure of the LCM of the [Al – FeCr] system obtained using the dispersed-filled gas model. *Casting. Metallurgy. 2021: materials of the XVII International science and practice conf. (May 18—20, 2021, Zaporizhzhia) / under general ed. by Ph.D., prof. O.I. Ponomarenko*. Zaporizhzhia: AA Tandem, 2021, 128—130 [in Ukrainian].
25. Raichenko, A.I. et al. (2003). Activating action of electric current on penetration of melt metal into surface defects of materials of various physical origin. *Powder Metallurgy*, 3—4, 124—128 [in Russian].
26. Nebozhak, I.A., Shinsky, O.Y. (2021). Parameters of the tribostructure of the LCM of the [Al – FeCr] system obtained using the dispersed-filled gas model. *Casting. Metallurgy. 2021: materials of the XVII International science and practice conf. (2021 May 18—20, Zaporizhzhia) under general ed. by Ph.D., prof. O.I. Ponomarenko*. Zaporizhzhia: AA Tandem, 2021, 131—134 [in Ukrainian].
27. Shinsky, O.Y., Vyshnyakova, L.P., Plotnikova, V.N., Knyazev, E.F. (1993). The method of making models from polystyrene foam / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Problems casting (Ukraine): pat. 244 Ukraine: MKI3 B22C7/02, B22C3/00. No. 3493216/22-02; statement 15.01.93; published 04/30/93, Bull. No. 1; priority 09/27/82, No. 1079340 A1 (USSR). 1 p. [in Ukrainian].
28. Pavlov, V.A. (1973). *Styrofoam*. Moscow: Khimiya, 240 p. [in Russian].
29. Kostornov, A.G. (2012). *Tribotechnical materials science*: monograph. Lugansk: Knowledge. Donetsk. department, 696 p. [in Russian].
30. Garkunov, D.I. (1985). *Tribotechnics*. Moscow: Mashinostroenie, 424 p. [in Russian].
31. Coefficient of friction: Wikipedia. URL: <https://uk.m.wikipedia.org> (Last accessed: 20.01.2023) [in Ukrainian].
32. Kindrachuk, M.V., Kulgavy, E.A. (2005). Tribology is a science of the twenty-first century. *Bulletin of NAU*, 4, 67—72 [in Ukrainian].
33. Mechanical properties of material: Wikipedia. URL: <https://uk.m.wikipedia.org> (Last accessed: 17.01.2023) [in Ukrainian].
34. Kindrachuk, M.V., Kulgavy, E.A., Perro, D.I., Podlesny, V.O. (2009). Tribotechnical characteristics of heterogeneous carbide-containing coatings. *Bulletin of NAU*. 2009. URL: <https://jrn1.nau.edu.ua> (Last accessed: 19.01.2023) [in Ukrainian].
35. Kindrachuk, M.V., Kulgavy, E.A., Shevchenko, O.L., Danilov, A.P. (2009). The method of determining the tribotechnical characteristics of antifriction systems. *Bulletin of NAU*, 1 (1). URL: <https://jrn1.nau.edu.ua> (Last accessed: 01.21.2023) [in Ukrainian].
36. Properties of metal powders. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/sadova/page13.html (Last accessed: 12.28.2022) [in Ukrainian].
37. Maslennikov, F.I. (1961). Laboratory workshop on metallurgy. 3-rd ed., revised and added. Moscow: Mashgiz, 268 p. [in Russian].
38. Wear test methods. URL: <https://zp.edu.ua/metody-vyprobuvan-na-znoshuvannya> (Last accessed: 05.10.2020) [in Ukrainian].
39. Zakalov, O.V., Zakalov, I.O. (2011). Basics of friction and wear in machines: teaching manual / MES of Ukraine. TNTU named after Ivan Pulyuy. Ternopil, 322 p. URL: http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/1076/1/TextBook_Zakalov_Basic.pdf (Last accessed: 10.30.2020) [in Ukrainian].
40. Gavrilyuk, V.P., Novitskyi, V.G. (2002). Method for determining the wear resistance of materials under conditions of sliding friction on the M22M friction machine. Kyiv: PTIMA NAS of Ukraine, 4 p. [in Russian].
41. Mamykin, E.T., Yuga, A.I. (1973). A complex of machines and a method for determining antifriction properties during sliding friction. *Powder metallurgy*, 1, 67—72 [in Russian].
42. Benkert, M., Clem, H. (1988). Methods of metallographic etching: reference book accomplice: translation from German 2-nd edition, revised and supplemented. Moscow: Metallurgiya, 400 p. [in Russian].
43. Kragelsky, I.V., Dobychin, M.N., Kombalov, V.S. (1977). Fundamentals of friction and wear calculations. Moscow: Mashinostroenie, 207 p. [in Russian].
44. The force of friction: distance education support for schoolchildren. URL: <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/12059> (Last accessed: 12.18.2022) [in Ukrainian].

Received 23.03.2023

Summary

I.A. Nebozhak¹, Leading Engineer, e-mail: nebozhak@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-0291-8144>

V.H. Novytskyi¹, PhD (Engin.), Leading Research Scientist, e-mail:
v_novytskyi@ukr.net

O.V. Derevyanko², PhD (Engin.), Senior Research Scientist, e-mail:
alederevyanko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2345-7869>

D.S. Kanibolotsky¹, PhD (Chem.), Senior Research Scientist, e-mail:
kanibolotsky@univ.kiev.ua

A.M. Verkhovliuk¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department,
 e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

¹*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine
 (Kyiv, Ukraine)*

²*Frantsevykh Institute for Problems of Materials Science of the NAS of
 Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

Dependence of the tribotechnical properties of the cast composite material of the [Al — FeCr] system, obtained using a dispersed-filled gas model, on the parameters of its microstructure

Analysis of scientific and technical published works and sources of patent information made it possible to formulate and set the goal of the performed scientific research work (R&D). By inoculating cast Al-alloy grade AK12 of DSTU 2839:1994 with dispersed intermetallic FeCr in the “volume” of the casting mold (CM) during casting according to gasifying models, samples of zero-dimensional cast composite material (CCM) of the [Al — FeCr] system were obtained. The application of metallographic analysis (MGA) showed that the zero-dimensional CCM of the [Al — FeCr] system has an optimal microstructure, and the parameters of its tribostructure (the specific number of inclusions of the σ -phase and its dispersion) not only change along the height of the cast samples, but also depend on each other. The results of the wearability tests of the material under conditions of friction showed, that the tribotechnical properties (workability of the counter-body material and CCM of the [Al — FeCr] system and the coefficient of sliding friction of the pair “CCM of [Al — FeCr] system — steel 40X” is depending not only on the height composite casting, as well as from the parameters of its tribostructure. The MGA showed, that after testing the zero-dimensional CCM of the [Al — FeCr] system and the control casting during wear under conditions of friction, it was experimentally proven that the activation of the counter-body material and the coefficient of friction for steam sliding “Al-alloy AK12 — steel 40X” as a result of reinforcement (composite strengthening) of cast Al-alloy grade AK12 with dispersed intermetallic FeCr, on average, increases from 1.15 mg/(cm²·km) and 1.77 to 3.75 mg/(cm²·km) and 1.98, respectively. In contrast, its wear, on average, decreases from 17.85 mg/(cm²·km) to 14.15 mg/(cm²·km).

Keywords

Al-matrix, FeCr, σ -phase, reinforcement, dispersed inoculator, dispersed-filled gas model, intermetallic reinforcing phase, composite casting, composite strengthening, Lost-foam casting (LFC-process), Al-alloy of AK12 grade, CCM of [Al — FeCr] system, metallographic analysis, parameters of microstructure, tribotechnical properties.