

УДК 621.762.2

DOI: 10.18372/0370-2197.1(94).16470

С. Ю. ТЕСЛЯ, А. М. СТЕПАНЧУК, О. С. КУЧЕР

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ТА СКЛАДУ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ AL-Fe-C НА ЇХ СТІЙКІСТЬ ПІД ЧАС АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Тепер у науковому світі матеріалознавців багато уваги приділяється матеріалам на основі легких сплавів. У цьому відношенні перспективними є сплави на основі алюмінію, які знаходять широке застосування у різноманітних галузях науки і техніки як конструкційні, електротехнічного призначення, жаростійкі, стійкі до впливу агресивних середовищ тощо. Особлива увага приділяється розробці матеріалів триботехнічного призначення. Головною структурною складовою в алюмінієвих сплавах, яка забезпечує високу зносостійкість є дисперсні включення інтерметалідів. Отримання яких передбачає термічну обробку – старіння. Однак такий підхід обмежений певним інтервалом температур оскільки термічна дія спричиняє зворотнє розчинення легувальних компонентів в алюмінії та знеміцнення сплаву. Отримати стабільну структуру вдається під час застосування заліза як легувального елемента. За рахунок низької розчинності в алюмінії вдається зберігати отриману структуру як за кімнатних так і за підвищених температури. Проте, класичні методи литва не дозволяють отримати дрібні, рівномірно розподілені включення інтерметалідних фаз. Отримання комплексу фізико-механічних характеристик таких матеріалів з наперед заданими властивостями можливо під час застосування методів порошкової металургії. Де вихідні компоненти і їх структурні складові знаходяться в дисперсному стані. В роботі вивчено вплив температури спікання та складу вихідної шихти на стійкість проти абразивного зношування порошкових сплавів Al+15 мас.% Fe, Al+15 мас.% Fe + 1-3 мас.% C компактованих з порошків отриманих методом механічного диспергування розплавів. Показано, що стійкість проти абразивного зношування збільшується зі збільшенням температури спікання від 600 до 800 °C, що зумовлено збільшенням розміру їх структурної складової Al₃Fe. Стійкість проти абразивного зношування збільшується зі збільшенням вмісту графіту, що зумовлено його змащувальною дією.

Ключові слова: дисперсно зміцнені сплави, зношування, алюмінії, структура, інтерметаліди, зміцнення, графіт, антифрикційні матеріали

Вступ. На сьогоднішній день, підвищений інтерес вчених в області матеріалознавства спрямований на створення таких матеріалів, які б поєднували високу міцність, зносостійкість тощо, але водночас мали низьку масу [1]. У даному відношенні особливо перспективними є сплави на основі алюмінію. Такі матеріали знаходять своє застосування в авіа-, машинобудуванні, радіоелектроніці, трибології, електротехніці тощо [2]. В останній час, особливу увагу приділяють сплавам на основі алюмінію для створення на їх основі антифрикційних, електричних контактів ковзаннях [3]. У цьому відношенні перспективними є сплави системи Al-Fe, під час кристалізації в якій утворюється ряд інтерметалідів. Однак під час отримання таких матеріалів методом традиційного лиття не вдається отримати необхідні властивості тому, що інтерметаліди кристалізуються у вигляді крупних кристалів і, як наслідок, матеріал окрихчується. Тому актуальним є поліпшення властивостей таких сплавів. У цьому відношенні більш широке поле для отримання

необхідних властивостей надають методи порошкової металургії. Їх використання дає можливість вже на стадії отримання вихідних порошків для виготовлення виробів отримувати їх з необхідною структурою за рахунок модифікації, зменшення розміру зерен фазових складових і, тим самим, забезпечити підвищення характеристик міцності та експлуатаційних властивостей [4].

Аналіз літературних даних. Дані про застосування виробів трибо У цьому відношенні більш перспективно застосовувати сплави системи Al-Fe. За рахунок низької розчинності заліза в алюмінії (<0,005 мас. %) можливо отримати властивості, які зберігатимуться під дією температури чи напружень [10, 11]. Дослідження процесів отримання таких сплавів проводилось в роботах [10–15]. Аналіз даних отриманих в цих роботах дозволяє зтверджувати, що найбільш перспективними методами отримання сплавів алюмінію з підвищеними фізико-механічними властивостями і виробів на їх основі є застосування методів порошкової металургії за рахунок отримання вихідних порошків з сплавів Al-Fe механічним розмелюванням або розпилюванням (диспергуванням) їх розплавів з наступним компактуванням. На жаль у наведених роботах відсутні дані про експлуатаційні властивості отриманих матеріалів і, у тому числі, про триботехнічні властивості виробів з них. Тому, нам здається, актуальним є проведення робіт по вивченню процесів отримання порошків з сплавів на основі алюмінію з дисперсно зміцненою структурою, їх компактування і дослідження експлуатаційних характеристик отриманих таким чином виробів.

Мета дослідження. Метою даної роботи було отримання порошків з сплаву Al + 15 мас. % Fe з дисперсно-зміцненою структурою. Вивчення впливу умов компактування виробів з отриманих порошків і, як наслідок, їх фазового складу і структури, на їх стійкість до абразивного зношування.

Методика дослідження. Для отримання порошків з сплаву Al+15 мас. % Fe використовували вилівки чистого алюмінію (99,95 мас. %) та заліза (мас. %) (Fe – 99%, C – 0,06 %, Si – 0,15 %, Mn – 0,25 %, S – 0,05 %, P – 0,04 %). Вихідні матеріали плавили в індукційній печі за температури 1300 °C – 1350 °C протягом 30 хв. Після цього розплав подавали у металоприймач установки для механічного диспергування розплавів за допомогою “Полет” [16, 17] звідки він вертикальним струменем діаметром 2 мм подавався у камеру розпилювання де і диспергувався (подрібнювався) за допомогою лопатей (Полет), які обертались зі швидкістю 2800 об/хв.у площині перпендикулярній до струменя. Таким чином отримували порошки гранулометричний склад яких, морфологія та структура наведені на рисунку 1. Компактування проводили пресуванням вихідних порошків на гідравлічному пресі з наступним спіканням у муфельній печі у середовищі водню. Металографічний аналіз проводили із застосуванням растрової електронної (РЕМ-106И) та світлової мікроскопії (Neophot фірми Carl Zeiss Jena). Зносостійкість при зношуванні проводили за стандартною методикою тертя «площина-площина» відповідно до стандарту ASTM G99 [18] на машині тертя Х4-Б. Як контр тіло було обрано закріпленний абразивний диск марки 25AF48L.

Результати дослідження та їх обговорення. Аналіз отриманих в роботі результатів показав, що порошки (рис. 1) мають не правильну форму з середнім розміром частинок 200 мкм. Форма частинок зумовлена умовами охолодження частинок продуктів диспергування та їх сфероїдизацією, яка згідно [17] свідчить про більш високу швидкість охолодження у порівнянні зі швидкістю сфероїдизації.

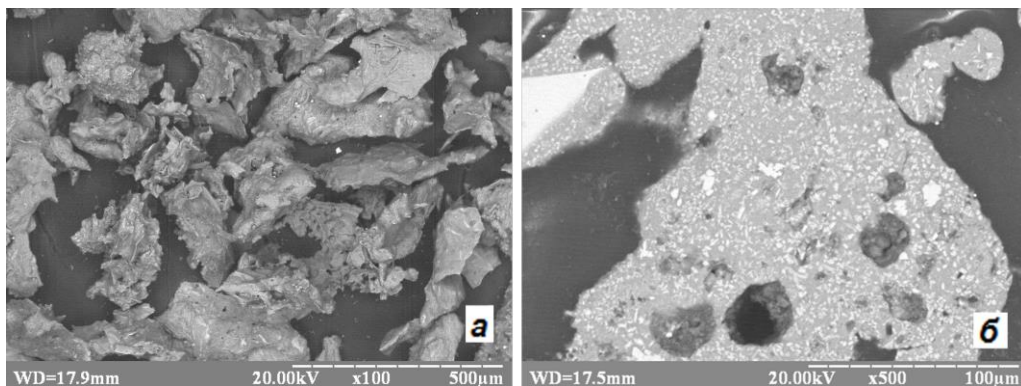


Рис. 1. Морфологія (а) та мікроструктура (б) частинок порошку з плаву Al +15 % Fe отриманого механічним диспергуванням розплаву

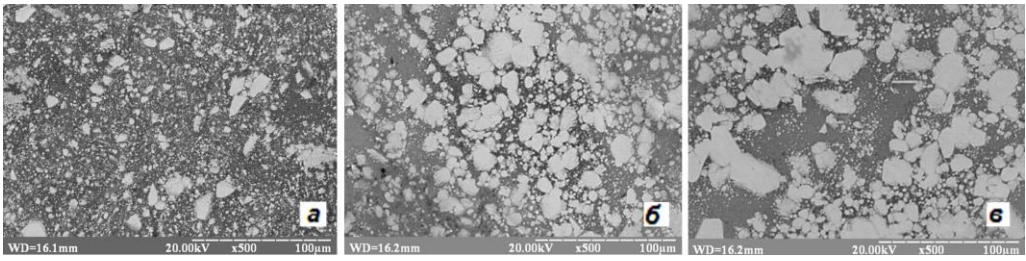
Мікроструктура порошків двофазна і складається з сірої матричної фази на основі твердого розчину заліза в алюмінії та світлих включень інтерметаліду Al_3Fe та метастабільної фази Al_6Fe . Утворення Al_6Fe можливе за рахунок високої швидкості охолодження сплавів Al–Fe [19], яка у нашому випадку складала $(4–5) \times 10^{-5}$ с. Розмір фазової складової інтерметалідів складає 1–3 мкм. Останнє може свідчити, що вони у цьому матеріалі можуть відігравати роль дисперсно зміцнюючої фази.

Отримані порошки з та без добавок графіту (1, 2, 3 мас. %) готували зразки методом пресування за тиску 600 МПа з наступним спіканням за температур 600, 700 та 800 °С. Графіт добавляли з метою підвищення антифрикційних характеристик [3, 4]. Вивчення властивостей та структури отриманих матеріалів показало, що вони мали практично стовідсоткову щільність і рівномірний розподіл фазових складових по об'єму матеріалу.

Вивчення структури матеріалу без вмісту графіту показало (рис. 2), що вона є двох фазною та складається з сірої матричної фази на основі твердого розчину заліза в алюмінії та світлих включень інтерметаліду Al_3Fe . Слід зауважити, що у спечених матеріалів відсутня фаза метастабільного інтерметаліду Al_6Fe , який за малих швидкостях охолодження є не стабільним. Матеріали спечені за температури 600 °С, за якої процес спікання відбувався у твердій фазі, в основному спадкують структуру вихідних порошків, яка складається з алюмінієвої матриці і дисперсних включень інтерметаліду Al_3Fe (рис. 2, а) з розміром зерен переважно 1–5 мкм. У випадку спікання за температур 700 та 800 °С, за яких, відповідно до діаграми стану Al–Fe [20], з'являється рідка фаза і спікання відбувається у її присутності, структура дещо змінюється. Фазовий склад залишається таким же як і під час спікання за температури 600 °С, але розмір інтерметалевої складової збільшується (рис. 2, б, в). При цьому їх розмір збільшується зі збільшенням температури спікання. Останнє може бути зумовлено перекристалізацією більш тугоплавких зерен інтерметалідів через розплав алюмінію, що є характерним для процесів спікання порошкових матеріалів у присутності рідкої фази, наприклад твердих сплавів [17].

Виходячи з того, що під час спікання за температури 600 °С практично не відбувається зміни структури матеріалу основи, в якій дисперсні включення інтерметаліду зберігають свої розміри і морфологію, спікання зразків з різним

вмістом графіту проводили за температури 600 °С протягом 30 хв. Структура спечених таким чином матеріалів наведена на рис. 3.



a – 600 °С; *б* – 700°С; *в* – 800°С

Рис. 2. Мікроструктура матеріалів із сплаву Al–Fe спечених за різних температур

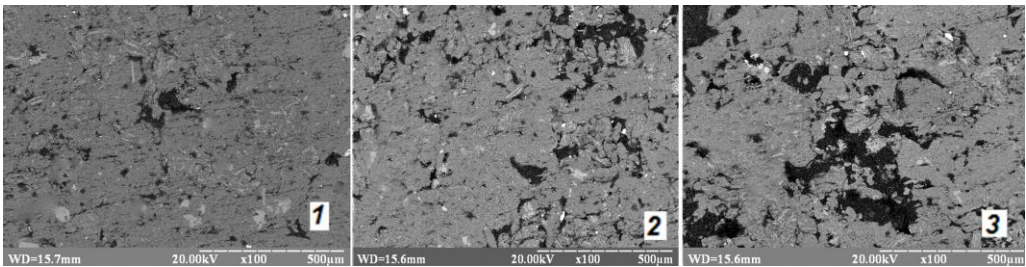


Рис. 3. Мікроструктура спеченого матеріалів із сплаву Al–Fe з додаванням графіту (мас. %): 1– 1 мас. % С; 2– 2 мас. % С; 3– 3 мас. % С

Як видно з рисунку в структурі отриманих таким матеріалу з'являється структурна складова графіту, яка рівномірно розміщується в матеріалі і кількість цієї складової збільшується зі збільшенням вмісту графіту в матеріалі. Структура матеріалу основи спадкує структуру вихідних порошків і структуру спечених за температури 600 °С матеріалів без додавання графіту (рис. 4).

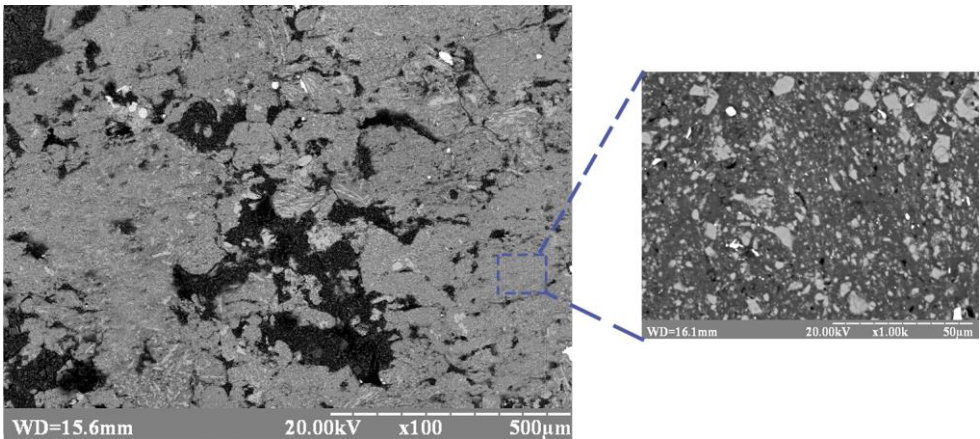


Рис. 4. Мікроструктура матеріалу основи в спечених матеріалів із сплаву Al–Fe з додаванням 3 мас.% графіту

В роботі проводились дослідження впливу умов компактування порошків з сплаву Al–Fe без додавання графіту та з додаванням графіту на стійкість проти зношування. Дослідження впливу часу зношування для сплавів отриманих за різних температур спікання наведено на рис. 5. Як видно з нього, збільшення часу

випробування від 5 до 15 хв для всіх матеріалів призводить до зменшення величини зношування. Подальше збільшення часу практично не змінює величину зношування і його значення залежить лише від складу матеріалу. Характер зміни величини зношування на початкових стадіях цілком узгоджується із сучасними уявленнями про процеси тертя та зношування [10]. Відповідно до яких, на першому етапі відбувається зменшення шорсткості поверхонь тертя, утворення вторинних структур та проміжних шарів.

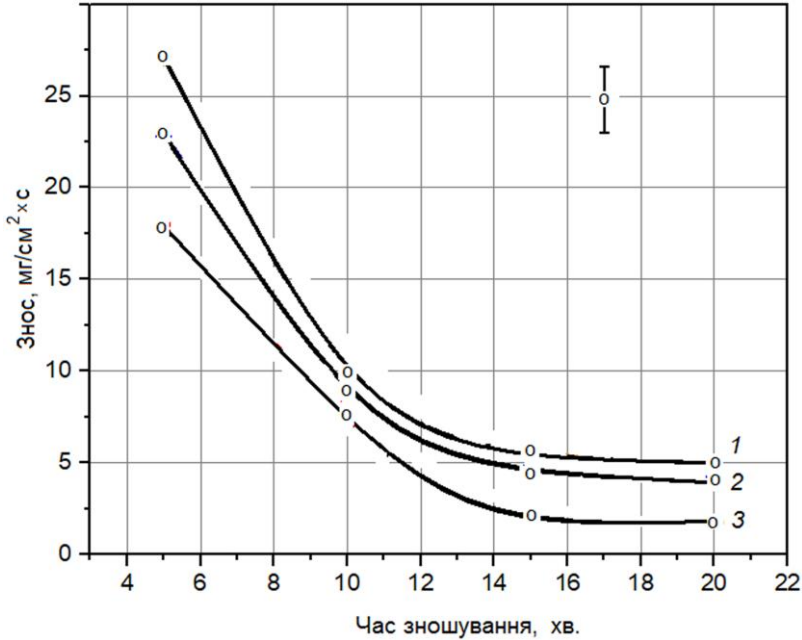


Рис. 5. Залежність зношування матеріалів із сплаву Al-Fe від часу зношування і температури спікання: 1 – 600 °C; 2 – 700 °C; 3 – 800 °C

Аналіз отриманих залежностей та морфології поверхонь тертя (рис. б) показує, що стійкість проти зношування збільшується зі збільшенням часу спікання вихідних матеріалів. Таке збільшення супроводжується дещо відмінними механізмами зношування, які лежать в основі процесу. Як видно з рис. б, (1) на поверхні сплаву отриманого за температури 600 °C спостерігаються сліди різання, що характерні для зношування пластичних матеріалів (в нашому випадку алюмінію), а також продукти руйнування більш крихкого інтерметаліду Al_3Fe . Натомість збільшення температури спікання і утворення великих зерен інтерметаліду за рахунок процесів перекристалізації призводить до збільшення площі твердої складової в об'ємі матеріалу. Відповідно крупні інтерметаліди починають виступати основним елементом структури, який сприймає ударно-стираючу дію абразиву, що і сприяє збільшенню зносостійкості.

Викладене також корелює з результатами вивчення морфології поверхні зношування (рис. б, 2-3). Глибина канавок зношування зменшується зі збільшенням температури спікання матеріалів.

Збільшення зносостійкості може бути також зумовлено підвищенням якості контакту між фазовими складовими матеріалу за рахунок рафінуванням міжфазової поверхні під час спікання та збільшенням когерентності кристалічної ґратки інтерметаліду та матриці.

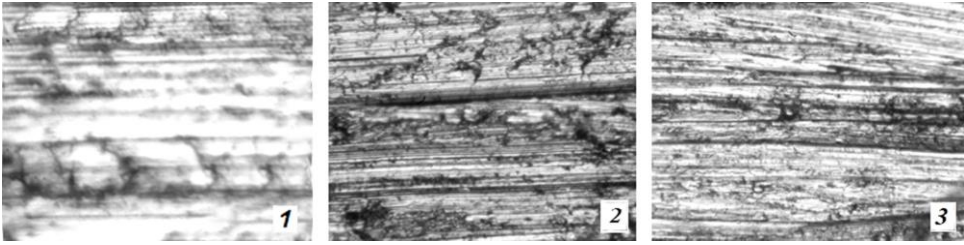


Рис. 6. Топографія поверхні зношування матеріалів з сплаву Al-Fe від температури їх спікання ($\times 500$): 1 – 600°C; 2 – 700°C; 3 – 800°C

Уведення до складу матеріалу графіту змінює характер зношування. Як видно з рис. 7 збільшення часу зношування від 5 до 15–18 хв. для всіх матеріалів сприяє зменшенню величини зношування. Подальше збільшення часу практично не впливає на величину зносу і його значення залежать тільки від складу матеріалу. Найбільші значення зносу має матеріал без додавання графіту. Збільшення вмісту графіту сприяє підвищенню зносостійкості матеріалів.

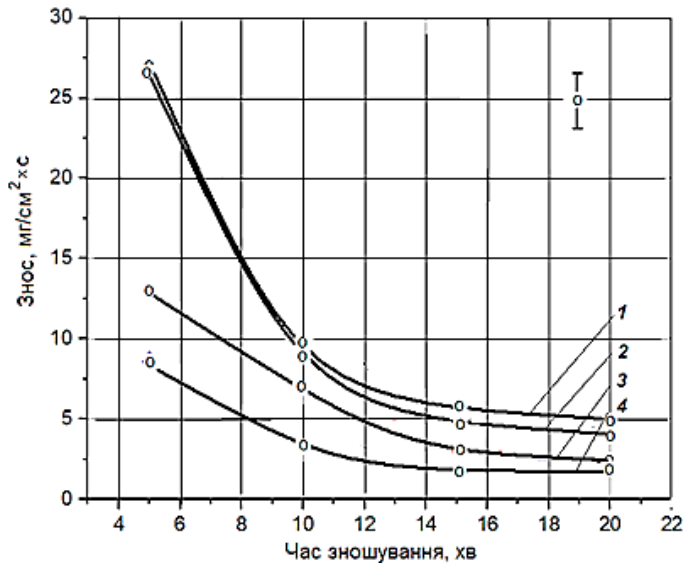


Рис. 7. Залежність зношування матеріалів з композицій Al-Fe-C спечених за 600 °C, з витримкою 30 хв від часу зношування і вмісту вуглецю (мас. %): 1 – 0 мас. % C; 2 – 1 мас. % C; 3 – 2 мас. % C; 4 – 3 мас. % C

Останнє може бути зумовлене тим, що графіт, який в матеріалі є структурною складовою (рис. 3), змішується з продуктами зношування і утворює вторинні структури [4], які можуть відігравати роль мастила. У цьому випадку на поверхні тертя практично відсутні сліди зношування за рахунок різання, особливо вмісту графіту 3 мас.% (рис. 8, 4).

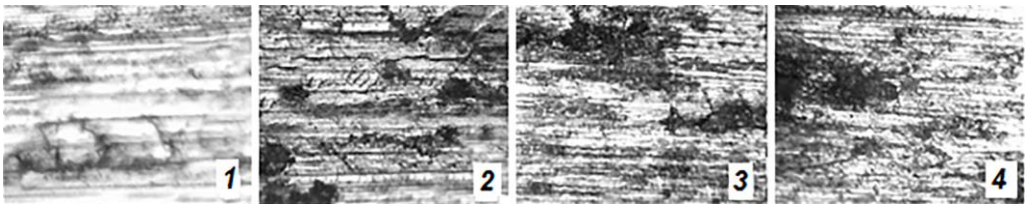


Рис. 8. Топографія поверхні зношування матеріалів з композицій Al-Fe-C від вмісту вуглецю ($\times 500$): 1 – 0; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3

Висновки. Унаслідок вивчення процесів зношування матеріалів на основі алюмінію легованого залізом та у суміші з графітом у парі з закріпленим абразивом показано, що їх знос залежить від умов їх отримання та складу матеріалів. Збільшення температури спікання сприяє збільшенню зносостійкості матеріалу за рахунок збільшення розміру твердої структурної складової з інтерметаліду алюмінію Al_3Fe .

Збільшення в матеріалі вмісту графіту від 0 до 3 мас.%, за інших рівних умов, також сприяє збільшенню зносостійкості, що зумовлено утворенням вторинних структур графіту з продуктами зношування, які відіграють роль твердого мастила.

Список літератури

1. Tomoko Sano. *Advanced Composites for Aerospace, Marine, and Land Applications* / Tomoko Sano, T. S. Srivatsan, Michael W. Perett. – Springer, Cham, 2016. – 268 p.
2. Kavian Cooke. *Aluminium Alloys and Composites* / Kavian Cooke. –IntechOpen, 2020. – 182 p.
3. Берент В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. – М. : Интекст, 2005. – 408 с.
4. Крагельский И. В. Трение и износ /И.В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 430 с.
5. Степанчук А. Н. Технология порошковой металлургии . Уч. пособие / А. Н. Степанчук, И. И. Билык, П. А. Бойко. – К. : ”Вища школа”. – 1989. – 415 с.
6. Кипарисов С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либерсон. – М. : «Металлургия», 1980. – 496 с.
7. Crystallographic orientation and spatially resolved damage in a dispersion-hardened Al alloy / Qingge Xie, Junhe Lian, Juri J. Sidor [et al.] // *Acta Materialia*. – 2020. – Vol. 193. – P. 138 – 150.
8. Dispersion hardening of an AlSi3Mg alloy with Cr and Mn addition / M. Tocci, A. Pola, G. Angella, R. Donnini [et al.] // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 10. – P. 319 – 326.
9. Effect of T6-treatments on microstructure and mechanical properties of forged Al-4.4Cu-0.7Mg-0.6Si alloy / Hui-zhong Li, Ze-xiao Zhu, Xiao-peng Lian // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2017. – Vol. 27, Is. 12. – P. 2539 – 2547.
10. S. Srivastava. Study of wear and friction of Al-Fe metal matrix composite produced by liquid metallurgical method / S. Srivastava, S. Mohan // *Tribology in industry*. – 2011. – Vol. 33, Is. 3. – P. 128 – 137.
11. F. Czerwinski. Cerium in aluminum alloys / F. Czerwinski // *Journal of Materials Science*. – Vol. 55, Is. 1. – P. 24 – 72.
12. D. K. Mukhopadhyay. Structural evolution in mechanically alloyed Al-Fe powders / D. K. Mukhopadhyay, C. Suryanarayana, F. H. Froes // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1995. – Vol. 26, Is. 8. – P. 1939 – 1946.
13. M. Baig. Thermo-mechanical responses of nanocrystalline Al-Fe alloy processed using mechanical alloying and high frequency heat induction sintering / M. Baig, H. R. Ammar, A. H. Seikh // *Materials Science and Engineering: A*. – Vol. 655. – P. 132 – 141.
14. Microstructure evolution of atomized Al-0.61 wt pct Fe and Al-1.90 wt pct Fe alloys / J. Chen, U. Dahlborg, C. M. Bao [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 42, Is. 3. – P. 557 – 567.
15. Droplet Solidification of Impulse Atomized Al-0.61Fe and Al-1.9Fe / Hani Henein, Vincent Buchoud, Ralf-Roman Schmidt, Chuck Watt // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 2010. – Vol. 49, Is. 4. – P. 446.

16. Найда Ю. И. Промышленное производство порошков сплавов меди методом ударного дробления струи расплава / Ю. И. Найда, А. Н. Степанчук, А. Ю. Найда // Порошковая металлургия, 2006. – No1/2. – С.112 – 117.

17. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук. Підручник. / А. М. Степанчук. – К. : Видавництво “Політехніка”. – 2006. – 353 с.

18. ASTM G99-17 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, WestConshohocken, PA, 2017, www.astm.org

19. Study Of Al-Al3Fe In High Frequency Magnetic Induction Fusion Al-Fe / Abdelhak Fekrache, Mohamed Yacine Debili, N. Boukhris, M. Draissia // Material Science. – 2013. – Vol. 9, Is. 12. – P. 467 – 470.

20. Hossein Sina. A study on the formation of iron aluminide (FeAl) from elemental powders / Hossein Sina, J. Corneliusson // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 636 – P. 261 – 269.

Стаття надійшла до редакції 07.02.2022.

Тесля Сергій Юрійович – аспірант кафедри Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона, КПІ ім Ігоря Сікорського; E-mail: teslasergij7@gmail.com.

Степанчук Анатолій Миколайович – к. т. н., професор кафедри Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона, КПІ ім Ігоря Сікорського; E-mail: astepanchuk@iff.kpi.ua.

Кучер Олександр Сергійович – магістрант кафедри Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона, КПІ ім Ігоря Сікорського.

S. Y. TESLIA, A. M. STEPANCHUK, O. S. KUCHER

INFLUENCE OF STRUCTURE AND COMPOSITION OF POWDER MATERIALS BASED ON Al-Fe-C ON THEIR WEAR RESISTANCE

Now in the scientific world of materials scientists a lot of attention is paid to materials based on light alloys.. In this regard, promising are aluminum-based alloys, which are widely used in various fields of science and technology such as structural, electrical, heat-resistant, resistant to aggressive environments and more.. Particular attention is paid to the development of tribotechnical materials. The main structural component in aluminum alloys, which provides high wear resistance are inclusions of intermetallics. Obtaining which involves heat treatment – aging. However, this approach is limited by a certain temperature range because the thermal action causes the reverse dissolution of the alloying components in aluminum and the softening of the alloy. It is possible to obtain a stable structure when using iron as an alloying element. Due to the low solubility in aluminum it is possible to preserve the resulting structure both at room temperature and at elevated temperatures. However, classical casting methods do not allow to obtain small, evenly distributed inclusions of intermetallic specialties. Obtaining a set of physical and mechanical characteristics of such materials with predetermined properties is possible when using methods of powder metallurgy. Where the original components and their structural components are in a dispersed state. The effect of sintering temperature and composition of the initial charge on the resistance against abrasive wear of powder alloys Al + 15 wt.% Fe, Al + 15 wt.% Fe + 1-3 wt.% C compacted from powders obtained by mechanical dispersion of melts. It is shown that the resistance to abrasive wear increases with increasing sintering temperature from 600 to 800 ° C, which is due to the increase in the size of their structural component Al₃Fe. Resistance against abrasive wear increases with increasing graphite content due to its lubricating action.

Keywords: dispersion-strengthened alloys, wear, aluminum, structure, intermetallics, hardening, graphite, antifriction materials

References

1. Tomoko Sano. Advanced Composites for Aerospace, Marine, and Land Applications / Tomoko Sano, T. S. Srivatsan, Michael W. Perett. – Springer, Cham, 2016.– 268 p.
2. Kavian Cooke. Aluminium Alloys and Composites / Kavian Cooke. –IntechOpen, 2020. – 182 p.
3. Berent V. Ya. Materialyi i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta. – M. : Intekst, 2005. – 408 s.
4. Kragelskiy I. V. Trenie i iznos / I.V. Kragelskiy. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 430 s.
5. Stepanchuk A. N. Tehnologiya poroshkovoy metallurgii . Uch. posobie / A. N. Stepanchuk, I. I. Bilyik, P. A. Boyko. – K. : "Vischa shkola". – 1989. – 415 s.
6. Kiparisov S. S. Poroshkovaya metalurgiya / S. S. Kiparisov, G. A. Liberson. – M. : «Metallurgiya», 1980. – 496 s.
7. Crystallographic orientation and spatially resolved damage in a dispersion-hardened Al alloy / Qingge Xie, Junhe Lian, Juri J. Sidor [et al.] // Acta Materialia. – 2020. – Vol. 193. – P. 138 – 150.
8. Dispersion hardening of an AlSi3Mg alloy with Cr and Mn addition / M. Tocci, A. Pola, G. Angella, R. Donnini [et al.] // Materials Characterization. – 2019. – Vol. 10. – P. 319 – 326.
9. Effect of T6-treatments on microstructure and mechanical properties of forged Al-4.4Cu-0.7Mg-0.6Si alloy / Hui-zhong Li, Ze-xiao Zhu, Xiao-peng Lian // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2017. – Vol. 27, Is. 12. – P. 2539 – 2547.
10. S. Srivastava. Study of wear and friction of Al-Fe metal matrix composite produced by liquid metallurgical method / S. Srivastava, S. Mohan // Tribology in industry. – 2011. – Vol. 33, Is. 3. – P. 128 – 137.

-
11. F. Czerwinski. Cerium in aluminum alloys / F. Czerwinski // *Journal of Materials Science*. – Vol. 55, Is. 1. – P. 24 – 72.
 12. D. K. Mukhopadhyay. Structural evolution in mechanically alloyed Al-Fe powders / D. K. Mukhopadhyay, C. Suryanarayana, F. H. Froes // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1995. – Vol. 26, Is. 8. – P. 1939 – 1946.
 13. M. Baig. Thermo-mechanical responses of nanocrystalline Al-Fe alloy processed using mechanical alloying and high frequency heat induction sintering / M. Baig, H. R. Ammar, A. H. Seikh // *Materials Science and Engineering: A*. – Vol. 655. – P. 132 – 141.
 14. Microstructure evolution of atomized Al-0.61 wt pct Fe and Al-1.90 wt pct Fe alloys / J. Chen, U. Dahlborg, C. M. Bao [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 42, Is. 3. – P. 557 – 567.
 15. Droplet Solidification of Impulse Atomized Al-0.61Fe and Al-1.9Fe / Hani Henein, Vincent Buchoud, Ralf-Roman Schmidt, Chuck Watt // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 2010. – Vol. 49, Is. 4. – P. 446.
 16. Nayda Yu. I. Promyishlenoe proizvodstvo poroshkov splavov medi metodom udarnogo drobleniya strui rasplava / Yu. I. Nayda, A. N. Stepanchuk, A. Yu. Nayda // *Poroshkovaya metallurgiya*, 2006. – No1/2. – S.112 – 117.
 17. Stepanchuk A. M. Teoretychni ta tekhnolohichni osnovy otrymannia poroshkiv metaliv, splaviv i tuhoplavkykh spoluk. Pidruchnyk. / A. M. Stepanchuk. – K. : Vydavnytstvo “Politekhnik”. – 2006. – 353 s.
 18. ASTM G99-17 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, WestConshohocken, PA, 2017, www.astm.org
 19. Study Of Al-Al3Fe In High Frequency Magnetic Induction Fusion Al-Fe / Abdelhak Fekrache, Mohamed Yacine Debili, N. Boukhris, M. Draissia // *Material Science*. – 2013. – Vol. 9, Is. 12. – P. 467 – 470.
 20. Hossein Sina. A study on the formation of iron aluminide (FeAl) from elemental powders / Hossein Sina, J. Corneliusson // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 636 – P. 261 – 269.