

**Степанчук А.М., Тесля С.Ю., Степашко І.О., Кучер О.С., Кружкова М.А.**  
*(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)*

**ОТРИМАННЯ ПОРОШКІВ СПЛАВІВ Al-Fe ПОДРІБНЕННЯМ  
У КУЛЬОВИХ ТА ПЛАНЕТАРНИХ МЛИНАХ**

**E-mail:** [astepanchuk@iff.kpi.ua](mailto:astepanchuk@iff.kpi.ua)

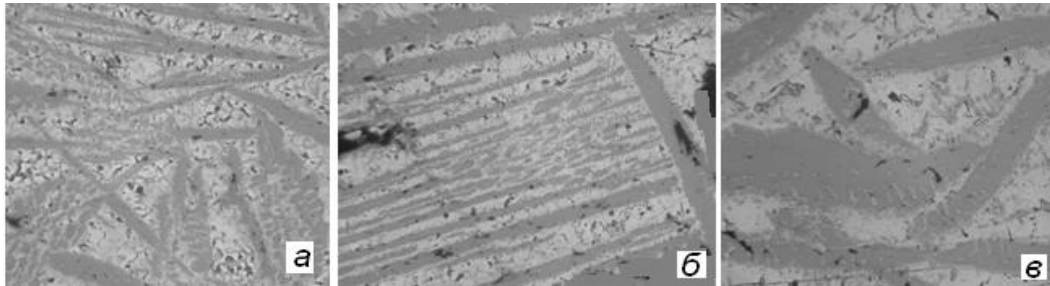
Сьогодні у машинобудуванні виникає потреба в матеріалах багатофункціонального призначення, які мають малу густину. Це, перш за все, матеріали, які використовують під час виготовлення ряду деталей вузлів і механізмів у машинобудуванні, авіаційної і ракетно-космічної техніки. Перспективними у цьому відношенні є порошкові композиційні матеріали на основі алюмінію. Поєднання в них компонентів з високим модулем Юнга та меншими значеннями модуля пружності дає можливість одержувати композиційні матеріали з необхідними значеннями основних фізико-механічних та функціональних властивостей.

Одним з варіантів створення таких матеріалів є отримання дисперсно-зміцнених сплавів на основі алюмінію. В таких матеріалах як дисперсно-зміцнювальну складову можна використовувати дисперсні порошки карбідів, боридів, нітридів та інтерметаліди алюмінію [1-3].

До перспективних матеріалів можуть бути віднесені матеріали із сплавів алюміній – залізо. В цих сплавах, згідно з діаграмою стану Al – Fe, під час кристалізації утворюються інтерметаліди  $Al_xFe_y$ . Якщо забезпечити їх утворення в структурі матеріалу у дисперсному стані, то вони можуть виступати як дисперсно-зміцнювальна фаза. Як показано в роботах [4-5], порошкові матеріали з такою структурою можна отримувати за використання вихідних порошків, отриманих розпилюванням розплавів з високою швидкістю охолодження або механічним подрібненням литих заготовок з використанням порошкової технології.

Метою нашої роботи було вивчення умов отримання порошків із сплавів Al + 15% Fe подрібненням у кульових та планетарних млинах.

Як вихідний матеріал використовували виливки із сплаву Al-Fe, які отримували плавленням вихідної шихти у індукційній печі з наступним охолодженням у металевому кокілі. Структура отриманих виливків показана на рис. 1. Як видно з нього, дійсно, структура виливків двофазна і складається з матричної фази алюмінію і вкраплень інтерметаліду  $Al_3Fe$  різної величини (від 0,25 до 2,0 мм) і морфології залежно від температурного поля охолодження (рівновісних або голчастих).



*а* – охолодження у воді; *б* – охолодження у кокілі; *в* – охолодження у воді

Рис. 1. Структура сплавів Al – Fe, охолоджених за різних умов (x250) [4]

Отримані виливки у подальшому подрібнювали виходячи з передбачення, що під час нього структурна складова з інтерметаліду  $Al_3Fe$  теж буде подрібнюватись. Виливки попередньо подрібнювались різанням (точінням) на токарному верстаті за глибини різання 1 мм і подачі 0,5 мм. Такий режим точіння забезпечував отримання дискретної стружки. Гранулометричний склад отримуваного продукту наведений у табл. 1.

У подальшому отриманий таким чином продукт (стружку) подрібнювали у кульовому та планетарному млинах. Вивчався вплив часу подрібнення на фракційний склад та структуру частинок отримуваного продукту. Розмелювання у кульовому млині проводили упродовж 30, 60, 90 та 120 хв, а у планетарному млині – 1, 2 та 3 хв.

Враховуючи те, що матеріал, який розмелювався, складається з пластичної та твердої складової, розмелювання у кульовому млині проводилось у режимі «перекочування», який забезпечує ударну та стиральну дію розмольних тіл на матеріал [6].

Результати визначення фракційного складу отриманого порошку залежно від часу розмелювання наведені у табл. 1.

Отримані результати показують, що за перші 30 хв. розмелювання спостерігається зменшення в порошок вмісту частинок з середнім розміром 515 та 815 мкм і збільшення вмісту частинок з меншим розміром. Останнє узгоджується з сучасними уявленнями про кінетику розмелювання матеріалів у кульових млинах. Але у подальшому зі збільшенням часу подрібнення вміст частинок з розміром 815 мкм зменшується, а з розміром 515 мкм практично не змінюється. Також незначною мірою збільшується вміст частинок з розміром меншим за 515 мкм. Ці результати дещо не узгоджуються з існуючими результатами дослідження кінетики розмелювання матеріалів у кульових млинах. Слабка залежність ступеню подрібнення від часу розмелювання (табл. 1) у нашому випадку може бути зумовлена конгломерацією дрібних частинок. Останнє може відбуватись за рахунок прагнення системи до зменшення поверхневої енергії порошкового тіла за рахунок зменшення вільної поверхні, яка збільшується зі збільшенням ступеню подрібнення. З іншого боку, конгломерація можлива за рахунок утворення зв'язків між частинками порошку за рахунок дії Ван-Дер-Ваальсівських сил під час утворення контактної поверхні під дією стискальних напружень, які виникають під час ударної дії розмольних тіл на матеріал, що розмелюється. Вірогідність цих процесів збільшується при наявності у матеріалі, що розмелюється, пластичної складової, у нашому випадку алюмінію.

Викладені міркування підтверджуються результатами дослідження морфології та структури отриманих порошків (рис. 2). Як видно з рис. 3, частинки порошків, отриманих розмелюванням у кульовому млині, мають близьку до рівновісної форму зі згладженою поверхнею і складаються з більш дрібних конгломератів (рис. 2, а). Також видно, що в частинках (конгломератах) мають місце дисперсні вкраплення світлої фази, які можуть представляти частинки інтерметаліду  $Al_3Fe$ . Останнє підтверджується результатами дослідження мікроструктури частинок (рис. 2, б).

Таблиця 1– Вміст (%) частинок порошку різного розміру

Вид розмелювання	Час розмелювання, хв.	Середній розмір частинок, мкм							
		50	105	180	255	282	357	515	815
Вихідний	0	1,6	4,1	1,0	2,0	3,0	3,2	18,1	67,4
Кульовий млин	30	1,4	5,3	2,1	5,2	7,4	9,6	36,0	33,1
	60	3,0	8,0	3,8	5,6	9,0	10,8	36,1	22,6
	90	3,2	8,2	2,5	5,8	9,4	11,2	36,4	23,0
	120	3,9	9,1	2,8	5,9	9,8	11,2	36,1	20,9
Планетарний млин	1	8,6	17,8	3,7	8,8	11,6	11,0	25,0	13,8
	2	12,8	27,2	5,2	11,7	9,4	7,4	14,7	11,6
	3	16,8	33,2	7,1	10,2	8,1	5,6	10,0	11,0

Аналіз мікроструктури показує, що вона значно відрізняється від мікроструктури вихідного матеріалу. Вона складається з сірої матричної фази з вкрапленнями частинок світлої фази розміром від 1–2 до 16–20 мкм, що значно менше, ніж у структурі вихідного (литого, рис. 1) матеріалу. Як зазначалось вище, збільшення часу розмелювання не впливає значно на розмір частинок (конгломератів). В той же час розмір вкраплень інтерметаліду суттєво зменшується. Така структура частинок може бути пояснена тим, що при розмелюванні структурні складові вихідного матеріалу (у першу чергу твердих, крихких вкраплень інтерметалідів) подрібнюються і потім конгломеруються за причин, викладених вище.

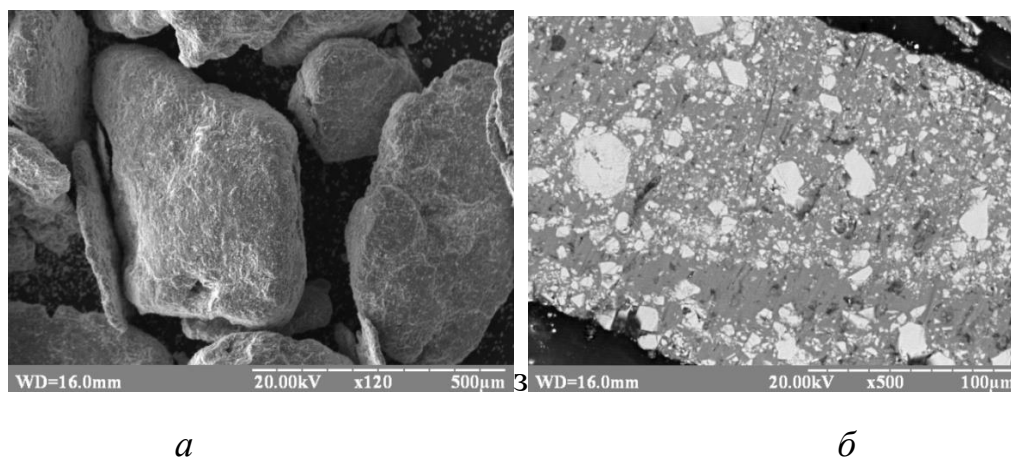
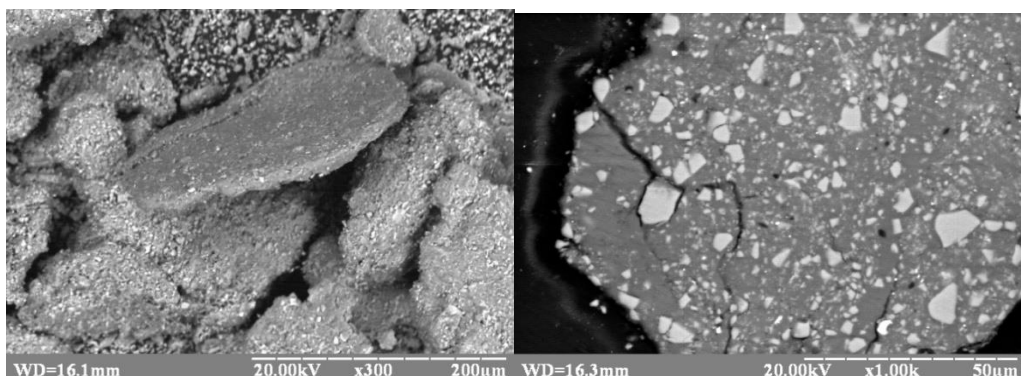


Рис. 2. Морфологія (а) та мікроструктура (б) частинок порошоків, отриманих розмелюванням у кульовому млині

Аналіз результатів, отриманих при розмелюванні у планетарному млині, показує (табл. 1), що відбувається суттєва зміна фракційного складу порошку з часом розмелювання. Вже під час розмелювання протягом 1 хвилини кількість вихідної фракції з середнім розміром 815 мкм зменшується у 5 – 6 разів. У той же час кількість фракцій з меншим середнім розміром частинок (50 – 255 мкм) збільшується у 5 – 10 разів. Такий характер залежності ступеню подрібнення від часу розмелювання у планетарних млинах у цілому якісно узгоджується з сучасними уявленнями про процеси подрібнення у планетарних млинах. Але у кількісному плані отримані у роботі результати у деяких випадках відрізняються від результатів, отриманих при розмелюванні інших матеріалів [7]. У нашому випадку ступінь подрібнення зі збільшенням часу розмелювання збільшується менш інтенсивно. Останнє може бути пояснене тими ж причинами, що і при розмелюванні у кульових млинах. Вивчення морфології отриманих порошків показує (рис. 3, *a*), що вони мають конгломератну форму. Водночас конгломерати мають не рівновісну, пластинчасту форму. Така форма може бути зумовлена переважно стиральною дією молотильних тіл на матеріал, що подрібнюється [6]. Структура частинок (конгломератів) порошків (рис. 3, *б*) подібна до структури порошків, отриманих у кульових млинах. Однак розмір вкраплень інтерметалідної фази менший і змінюється у межах 1 – 5 мкм, що менше, ніж у порошків, отриманих розмелюванням у кульовому млині.



*a*

*б*

Рис. 3. Морфологія (*a*) та структура (*б*) частинок порошків, отриманих розмелюванням у планетарному млині

Таким чином показано, що порошки із сплавів Al – Fe можна отримувати механічним подрібненням литих сплавів. При цьому структуру сплавів можна регулювати, використовуючи необхідний вид обладнання та змінюючи параметри розмелювання.

#### Література:

1. Баглюк Г.А. Новые композиционные дисперсно-упрочненные материалы на основе алюминия [Текст] / Г.А. Баглюк, Ю.А. Шишкина // Технологические системы. – 2011. – № 4 (57). – С.36–43.
2. Богачева А.Г. Получение и свойства дисперсно-упрочненных легких сплавов / А.Г. Богачева, Г.А. Баглюк, Ю.А. Шишкина / Технологические системы. – 2013. – № 6(64). – С. 23 – 38.
3. Yang Xue. Fabrication, microstructure and mechanical properties of Al–Fe intermetallicparticle reinforced Al-based composites / Yang Xue, RujuanShen, Song Ni [and oth.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – №618. – P.537–544.
4. Степанчук А. М. Вплив методу отримання на структуру сплавів Al – Fe / А. М. Степанчук, Б. О. Похилько // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8», – Київ: 6 – 7 грудня 2018. – К.: НТУУ «КПІ». – 2018. – С. 86 – 89.
5. J. Juarez-Islas. Spray atomization of two Al–Fe binary alloys: solidification and microstructure characterization / J. Juarez-Islas, Y. Zhou & E. J. Lavernia // Journal of Materials Science. – 1999. – Vol. 34. – P. 1211–1218.
6. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук. Підручник. / А.М. Степанчук. – К.: Видавництво «Політехніка», 2006. – 353 с.
7. Ходаков Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. – М.: Metallургия, 1972.– 307 с.