

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Теслі Сергія Юрійовича на тему «Закономірності отримання порошкових сплавів Al-Fe триботехнічного призначення», представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Актуальність теми дисертації.

Інноваційний розвиток сучасного машинобудування ставить нові вимоги до різноманітних класів матеріалів, що використовуються в різних вузлах машин та апаратів. В сучасній промисловості особливо гострою є проблема тертя, оскільки більше 90 % вузлів виходять з ладу не за рахунок руйнування, а саме за рахунок зношування. Для оптимізації та контролю процесів тертя застосовують матеріали на основі міді, заліза, графіту тощо. Проте, дані матеріали вже втрачають свою актуальність, як за рахунок підвищення вимог до триботехнічних матеріалів, так і за рахунок ряду екологічних проблем пов'язаних з ними. Сучасний підхід щодо розробки нових матеріалів для вузлів тертя полягає у вирішенні комплексних завдань заснованих на оптимізації хімічного, фазового складу, мікроструктури та механічних властивостей для отримання стабільних показників коефіцієнту тертя та величини зношування. Перспективними з точки зору розробки триботехнічних матеріалів є сплави алюмінію, які мають високу теплопровідність, корозійну стійкість та ряд спеціальних властивостей і можуть змінювати свої властивості в широких межах в залежності від легування та термічної обробки. Під час створення пар особливу увагу приділяють формуванню гетерофазної зміцненої структури, як для алюмінію може бути досягнути шляхом легування сплаву залізом. Введення заліза призводить до утворення ряду інтерметалідів, які зміцнюють матрицю та стабілізують процеси тертя. Однак, отримання сплавів алюмінію легованих залізом має ряд проблем пов'язаних з кристалізацією грубих зерен інтерметалідів та втратою відповідних властивостей сплавів.

Тому дисертація Теслі С. Ю. спрямована на розробку умов отримання порошків сплавів Al-15Fe з дисперсною структурою фаз та теоретичних засад процесів консолідації сплавів Al-Fe для роботи в умовах тертя та зношування.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше вивчені процеси отримання порошків дисперсно-зміцненого сплаву алюмінію легованого 15 мас. % заліза методом механічного диспергування розплаву. Встановлено, що за рахунок високої швидкості охолодження відбувається утворення метастабільної фази Al_6Fe , яка може дисперснозміцнювати сплав Al-15Fe. Встановлено механізм формування гранулометричного складу порошків та їх структури. Відповідно до

запропонованих теоретичних засад процесу отримання порошків розмір частинок впливає на розмір інтерметалевої зміцнюючої фази та її морфологію, що зумовлено градієнтом температур по перетину частинок під час їх охолодження. Так, для порошків менших за 150 мкм розмір інтерметалідів складає менше 1 – 5 мкм, а для частинок більше 200 мкм – 7 – 15 мкм.

2. Досліджено закономірності формування мікроструктури порошків сплаву Al-15Fe. Показано, що в отриманих механічним диспергуванням порошках, мікроструктура складається з матриці із твердого розчину алюмінію та рівномірно розподілених фаз інтерметалідів. Встановлено механізм структуроутворення, згідно з яким метастабільна фаза Al_6Fe кристалізується у вигляді дисперсних частинок розміром 1 – 3 мкм та у вигляді стільникової евтектики яка складається з двох взаємо переплєтених дендритів $\alpha-Al$ та Al_6Fe . Зміна морфології частинок інтерметалідів зумовлено зміною швидкості евтектичної кристалізації, яка є функцією від швидкості охолодження.

3. В роботі вперше отримані фундаментальні дані щодо властивостей інтерметаліду $Al_{13}Fe_4$, які можуть бути використані під час моделювання матеріалів за його участю. Розроблено технологію його отримання яка заснована на синтезі виливків $Al_{13}Fe_4$ з подальшим їх подрібненням з метою отримання порошку та консолідацією методом іскро-плазмового спікання за 1150 °С, протягом 10 хв, в середовищі аргону за тиску 16 кН. Модуль пружності інтерметаліду складає 180 ± 10 ГПа, мікротвердість 1000 ± 15 НВ, межа міцності на згин – 63 ± 5 МПа, коефіцієнт теплопровідності 20 ± 3 Вт/м×К, питомий електроопір – $2 \pm 0,7 \times 10^{-6}$ Ом×м.

4. Вперше встановлені закономірності отримання сплавів триботехнічного призначення Al-15Fe-C(MoS₂) методами пресування з наступним спіканням і гарячою штамповкою. Вивчені їх властивості та встановлена їх природа.

5. Встановлено механізм тертя, згідно якому під час взаємодії поверхонь контр тіла та сплаву Al-15Fe-C(MoS₂) відбувається диспергування зерен інтерметаліду та армування продуктами його руйнування матриці сплаву. У наслідок дії даного механізму збільшується зносостійкість і зменшується коефіцієнт тертя.

6. Встановлено, що більш високу зносостійкість і найменший коефіцієнт тертя мають матеріали з композиції Al-15Fe-1,5 % MoS₂ які отримано гарячим штампуванням. Добавки дисульфиду молібдену дозволяють отримати вищу якість поверхні тертя, ніж добавки графіту, що пов'язано зі складною кристалічною структурою MoS₂. Дисульфід молібдену складається з оксидно-сульфідних шарів, зі слабкими зв'язками, які сприяють підвищенню антифрикційних властивостей та зниженню адгезійного зношування.

Пункти наукової новизни результатів знаходять своє підтвердження в наступних пунктах:

1-2. Вказані наукові положення розкрито у розділ 3 дисертаційної роботи. Дисертантом проведені всесторонні дослідження процесів отримання порошку з використанням теоретичних відомостей (табл. 3.3. – 3.4), відомих та усталених фундаментальних засад процесів розпилювання – формули (3.1)-(3.7) та підтверджено власні теорії та гіпотези експериментальним дослідженням

процесу отримання порошків механічним диспергуванням на установці Полет. Показний вплив розміру частинок порошку в паро-газовій суміші на швидкість охолодження так як наслідок на формування мікроструктури. Під час обробки власних даних дисертантом використано для пояснення процесів сплавоутворення допоміжні теплові моделі, що зайвий раз доводить глибину та якість отриманих даних. Заявлений хімічний та фазовий склад порошків, було ретельно досліджено засобами електронної мікроскопії та рентгенівською дифракцією.

3. Зазначене положення наукової новизни розкрито автором в розділі 5. Було проведено фундаментальні дослідження з точки зору отримання чистої фази $Al_{13}Fe_4$ та дослідження її властивостей. Вказаний підхід є дуже вдалим прикладом оптимального шляху під час отримання та розробки нових матеріалів. Відомо, що властивості гетерофазних систем визначаються властивостями кожного зі складових. Зрозуміло, що отримання комплексу властивостей (механічних, теплових, електричних) відкривають широкі можливості для теоретичних досліджень (рис. 5.4-5.7), прогнозування і пояснення нових ефектів та властивостей. Запропонований спосіб отримання шляхом ущільнення методом іскро-плазмового спікання є оптимальним рішенням з точки зору отримання безпористого стану. Вивчення властивостей проводилось на сучасному обладнанні з використанням сучасних методик, що дозволяє стверджувати про високу якість та об'єктивність даних (табл. 5.1).

4-6. Вказані пункти наукової новизни описані в розділі 6. Були проведені прецизійні дослідження процесу отримання сплаву $Al-15Fe$ з добавками твердих мастил на основі графіту та дисульфиду молібдену методами пресування в закритих прес формах з подальшим спіканням (табл. 6.1) та методом гарячого штампування. Аналіз властивостей вказаних сплавів пропонується здійснювати шляхом комплексного підходу з вивчення механічних та триботехнічних властивостей сплавів (п. 6.3, табл. 6.2). Автором дисертації детально проаналізовані поверхні тертя та величини коефіцієнту тертя (рис. 6.6-6.10). Автором оптимізовано склад матеріалу, та запропоновано склад $Al-15Fe-1,5\% MoS_2$ та метод отримання гарячим штампуванням.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії КПІ ім. Ігоря Сікорського під керівництвом професора, кандидата технічних наук, професора кафедри ВТМ та ПМ Степанчука Анатолія Михайловича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо отримання сплавів $Al-15Fe$ з підвищеними експлуатаційними властивостями та високою дисперсністю фаз виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Теслі Сергія Юрійовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності

132 Матеріалознавство та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Матеріалознавство.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Порошкові композиційні матеріали».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Теслі Сергія Юрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською. Текст роботи має структурно-логічну послідовність викладення матеріалу і являє собою комплексну завершену роботу, що містить ґрунтовний аналіз літературних даних, результати дослідження процесів отримання порошків сплавів механічним диспергуванням розплаву, закономірності формування структури та фазового складу порошків та спечених матеріалів, аналітичний опис процесі ущільнення, модельні та експериментальні дослідження механічних та теплових властивостей, триботехнічні властивості сплавів без та з добавками твердих мастил.

Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 172 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, сформовано мету і завдання дослідження, вказано об'єкт та предмет дослідження, наведено ключові методи дослідження властивостей, визначено наукову новизну і практичне значення роботи. Зазначено особистий внесок здобувача, дані про апробацію і публікації результатів дослідження.

У **першому** розділі здійснено аналізу сучасного стану теорії та технології отримання матеріалів триботехнічного призначення. Проведено літературно-патентний пошук методів отримання та закономірностей формування структури і властивостей сплавів алюмінію легованих залізом. В повній мірі розкриті вплив різних факторів на процеси росту зерен інтерметалідів та кінетику спікання.

У **другому** розділі роботи зазначено методики дослідження, технологічні параметри процесу отримання порошків сплаву Al-15Fe методом механічного диспергування та їх подальше ущільнення.

У **третьому** розділі розглянуті теоретичні та технологічні засади процесу отримання порошків Al-15Fe. Відповідно до аналітичного опису показано, що забезпечення високої швидкості охолодження і як наслідок формування дисперсної структури фаз можливо забезпечити за швидкостей охолодження більше 10^6 °C/с. Зі зменшенням розміру частинок швидкість охолодження збільшується від $1,23 \times 10^7$ °C/с для частинок розміром 250 мкм до $2,05 \times 10^7$ °C/с для частинок розміром 50 мкм. Мікроструктура порошків складається з матриці алюмінію та частинок $Al_{13}Fe_4$ та метастабільної фази Al_6Fe .

У **четвертому** розділі автором наведені закономірності процесів пресування відповідно до уявлень М. Ю. Бальшина та спікання. Показано, що фактор пресування L зі збільшенням ступеню деформації не залишається постійним. За рахунок аналізу мікроструктури пресовок, та кривих відносної щільності автором запропоновано механізм пресування, за яким в основі ущільнення лежать процеси не лише пластичної деформації, але й крихкого руйнування інтерметалідів. розділі представлено основі закономірності процесів консолідації сплавів $Al_{13}Fe_4$. Консолідацію порошків автором пропонується проводити вільним спікання та гарячим штампуванням. Показано, що в умовах твердофазного спікання у середовищі водню в інтервалі температур $500 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 30 хв відбувається збільшення об'єму (від'ємна усадка) деталей. Останнє зумовлено трансформацією метастабільної фази Al_6Fe у $Al_{13}Fe_4$. Альтернативним методом отримання триботехнічних матеріалів запропоновано імпульсний метод – гарячого штампування за енергії 2,5 кДж та температури попереднього нагріву $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час застосування гарячого штампування порошкові матеріали мають практично без пористу структуру та спадкують реологічні особливості структури закладені на етапі їх отримання.

У **п'ятому** розділі дисертаційної роботи проведені експериментальні дослідження щодо отримання чистого інтерметаліду $Al_{13}Fe_4$. Нові та фундаментальні дані щодо властивостей інтерметаліду можуть бути цінними в області прогнозування кінцевих властивостей сплавів. Автором запропоновано аналіз механічних властивостей методом скінченних елементів сплавів $Al-15Fe$ виходячи з отриманих властивостей чистого інтерметаліду. Показано, що розрахункові значення міцності на розтяг складають $350 \pm 12\text{ МПа}$, в той же час для сплавів отриманих гарячим штампуванням експериментальні значення міцності на розтяг складає $250 \pm 8\text{ МПа}$. Межа текучості на стиск сплави отримані гарячою штамповкою мають межу текучості на рівні $350 \pm 10\text{ МПа}$, натомість після спікання $240 \pm 13\text{ МПа}$. Було проведені додаткові дослідження процесів теплопровідності, значення якої є фундаментальними з точки зору конструювання вузлів тертя показано, що значення теплопровідності сплавів $Al-15Fe$ змінюються в межах $145 - 150 \pm 8\text{ Вт/м}\times\text{К}$ залежно від умов їх отримання. Оскільки, під час тертя можливе виникнення локальних перегрівів матеріалів, дисертантом було проведено дослідження окисної стійкості та показано, що за температур $300 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ процеси зміни маси і, відповідно, окиснення практично не відбуваються.

У **шостому** розділі представлені результати триботехнічних випробувань матеріалів $Al-Fe-M$ (де M – графіт або MoS_2). Показано, що оптимальним складом матеріалу триботехнічного призначення є $Al-15Fe-1,5\text{ \% } MoS_2$ отриманого методами гарячого штампування за попереднього нагріву в $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час аналізу топології поверхонь тертя дисертантом встановлено, що в основі процесу зношування лежить механізм крихкого руйнування інтерметалідів з їх подальшим проникненням в пластину матрицю алюмінію. Дія даного механізму дозволяє додатково зміцнити матрицю та стабілізувати процес тертя. Тверді мастила під час тертя, разом з продуктами зношування формують шари вторинних структур як знижують коефіцієнт тертя. Встановлено що в парі $Al-$

15Fe-1,5 % MoS₂ стальне та мідне контр тіло, коефіцієнт тертя складає 0,05 та 0,037 відповідно.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 12 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 2 статей у виданнях, віднесених до першого — третього кuartилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях. Аналізуючи внесений доробок дисертанта, можна дійти до висновку, що матеріали дисертаційної роботи пройшли широку апробацію, є достовірними та науково-обґрунтованими. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. На рисунку 1.5 бракує схеми утворення металевого контакту між двома елементарними частинками порошку під впливом зовнішнього тиску.

2. В літературному огляді наводиться багато посилань та прикладів досліджень сплавів Al-Fe. Дисертантом під час опис літературних даних використовуються всі існуючі в практиці позначення концентрації елементів, а саме атомарні, об'ємні, вагові відсотки, та позначення концентрації компонентів без вказання розмірності. Це дещо ускладнює порівняння та аналіз отриманих в межах дисертації даних, з іншими дослідженнями.

3. В літературному огляді та в розділах 2 і 4 наведено приклади та експериментальні дані деформаційної обробки порошкових тіл, зокрема консолідації заготовок. Водночас у літературному огляді процес гарячого штампування автор характеризує зусиллям штампування, а під час власного експерименту – енергією штампування. Зусиллям, як правило, характеризується обладнання, а не процес. А у випадку холодного пресування автор використовує питому характеристику процесу ущільнення – тобто тиск, в МПа. Таким чином, порівняти процеси ущільнення при наявності тільки вказаних вище даних проблематично.

4. У висновках до розділу 1 автор вказує, що «За рахунок отримання сплавів у вигляді порошків можливо суттєво зменшити розмір інтерметалідів до 1 – 5 мкм, що повністю задовольнятиме вимоги щодо дисперсного зміцнення». Це вірний підхід, однак дисперсне зміцнення найкраще реалізується за розмірів дисперсоїдів в нанометровому діапазоні. Важливо було б показати ще й вміст

дисперсної фази по відношенню до матричного матеріалу. Інакше, при мікронних розмірах зміцнювальної фази для досягнення заданої міцності необхідно буде збільшувати частку дисперсної фази, що може призвести до переходу із класу дисперсно-зміцнених до класу композиційних матеріалів.

5. Згідно рис. 3.3 частинки розміром 50 мкм при розпиленні охолоджуються майже вдвічі швидше порівняно з частинками розміром 250 мкм і в 1,5 рази швидше за частинки розміром 100 мкм, а аналізу структури для даних частинок не приведено, хоча саме в структурі таких частинок можна очікувати утворення дисперсних фаз розміром менше 0,5 мкм, які повинні краще виконувати функцію частинок зміцнювання матриці при реалізації механізму дисперсного зміцнення.

6. В розділі 5, підрозділ 5.1.2 автор зазначає, що: «Дані уявлення щодо міцності матеріалів повністю узгоджуються з теоріями Орована та Ансвела-Ланела» - в роботі автор посиляється на дані теорії, але не приводить дані щодо розрахункових значень зміцнення, що може виникати від утворених інтерметалідних дисперсоїдів.

7. В деяких наведених автором формулах не вказано назву та розмірності змінних, що входять до складу рівняння, також відсутня нумерація рівнянь, в розділах 4 та 5.

8. На рис. 5.4 та рис. 5.7 показано криві напруження-деформація зразків сплаву Al-15Fe (ваг.%). Помітна суттєва різниця модулів пружності для експериментального матеріалу, який консолидовано різними методами. В роботі відсутні аргументи, щодо пояснення даного ефекту. Крім того, навіть модельна оцінка модуля пружності експериментального матеріалу, якщо користуватися показаною кривою напруження-деформація, буде відповідати занадто низькому значенню, приблизно 1,5 ГПа. Але під час модельних розрахунків автор задавав параметр модуля пружності для чистого алюмінію 70 ГПа. Тобто в наведених кривих напруження-деформація присутня суттєва невідповідність, що може бути пов'язано з помилками при вичлененні жорсткості машини із загальної кривої, можливо невірно показана шкала деформації, можливо випробування зразків відбувалися з різними швидкостями, тощо.

9. Автор в підрозділі 5.1.2 стверджує, що «Під час деформації відбувається рух дислокацій з виходом на поверхню, що відображається у вигляді ліній ковзання на зламах» опираючись на «струмковий візерунок», що виникає на поверхні зламу. Однак вказаний характер руйнування притаманний крихким матеріалам та інтерметалідам також і виникає внаслідок розповсюдження тріщини сколу, яка проходить по різних площинах, що створює характерні сходишки. Але з наведених фрактографічних досліджень зробити однозначний висновок про лінії ковзання складно.

10. Із таблиці 5.2 випливає, що межа плинності спеченого експериментального матеріалу становить 50 МПа, в той час як на кривій напруження-деформація даний параметр відповідає значенню близько 150 МПа.

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Теслі Сергія Юрійовича на тему «Закономірності отримання порошкових сплавів Al-Fe триботехнічного призначення», представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Актуальність теми дисертації.

Інноваційний розвиток сучасного машинобудування ставить нові вимоги до різноманітних класів матеріалів, що використовуються в різних вузлах машин та апаратів. В сучасній промисловості особливо гострою є проблема тертя, оскільки більше 90 % вузлів виходять з ладу не за рахунок руйнування, а саме за рахунок зношування. Для оптимізації та контролю процесів тертя застосовують матеріали на основі міді, заліза, графіту тощо. Проте, дані матеріали вже втрачають свою актуальність, як за рахунок підвищення вимог до триботехнічних матеріалів, так і за рахунок ряду екологічних проблем пов'язаних з ними. Сучасний підхід щодо розробки нових матеріалів для вузлів тертя полягає у вирішенні комплексних завдань заснованих на оптимізації хімічного, фазового складу, мікроструктури та механічних властивостей для отримання стабільних показників коефіцієнту тертя та величини зношування. Перспективними з точки зору розробки триботехнічних матеріалів є сплави алюмінію, які мають високу теплопровідність, корозійну стійкість та ряд спеціальних властивостей і можуть змінювати свої властивості в широких межах в залежності від легування та термічної обробки. Під час створення пар особливу увагу приділяють формуванню гетерофазної зміцненої структури, як для алюмінію може бути досягнути шляхом легування сплаву залізом. Введення заліза призводить до утворення ряду інтерметалідів, які зміцнюють матрицю та стабілізують процеси тертя. Однак, отримання сплавів алюмінію легованих залізом має ряд проблем пов'язаних з кристалізацією грубих зерен інтерметалідів та втратою відповідних властивостей сплавів.

Тому дисертація Теслі С. Ю. спрямована на розробку умов отримання порошків сплавів Al-15Fe з дисперсною структурою фаз та теоретичних засад процесів консолідації сплавів Al-Fe для роботи в умовах тертя та зношування.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше вивчені процеси отримання порошків дисперсно-зміцненого сплаву алюмінію легованого 15 мас. % заліза методом механічного диспергування розплаву. Встановлено, що за рахунок високої швидкості охолодження відбувається утворення метастабільної фази Al_6Fe , яка може дисперснозміцнювати сплав Al-15Fe. Встановлено механізм формування гранулометричного складу порошків та їх структури. Відповідно до

запропонованих теоретичних засад процесу отримання порошків розмір частинок впливає на розмір інтерметалевої зміцнюючої фази та її морфологію, що зумовлено градієнтом температур по перетину частинок під час їх охолодження. Так, для порошків менших за 150 мкм розмір інтерметалідів складає менше 1 – 5 мкм, а для частинок більше 200 мкм – 7 – 15 мкм.

2. Досліджено закономірності формування мікроструктури порошків сплаву Al-15Fe. Показано, що в отриманих механічним диспергуванням порошках, мікроструктура складається з матриці із твердого розчину алюмінію та рівномірно розподілених фаз інтерметалідів. Встановлено механізм структуроутворення, згідно з яким метастабільна фаза Al_6Fe кристалізується у вигляді дисперсних частинок розміром 1 – 3 мкм та у вигляді стільникової евтектики яка складається з двох взаємо переплєтених дендритів $\alpha-Al$ та Al_6Fe . Зміна морфології частинок інтерметалідів зумовлено зміною швидкості евтектичної кристалізації, яка є функцією від швидкості охолодження.

3. В роботі вперше отримані фундаментальні дані щодо властивостей інтерметаліду $Al_{13}Fe_4$, які можуть бути використані під час моделювання матеріалів за його участю. Розроблено технологію його отримання яка заснована на синтезі виливків $Al_{13}Fe_4$ з подальшим їх подрібненням з метою отримання порошку та консолідацією методом іскро-плазмового спікання за 1150 °С, протягом 10 хв, в середовищі аргону за тиску 16 кН. Модуль пружності інтерметаліду складає 180 ± 10 ГПа, мікротвердість 1000 ± 15 НВ, межа міцності на згин – 63 ± 5 МПа, коефіцієнт теплопровідності 20 ± 3 Вт/м×К, питомий електроопір – $2 \pm 0,7 \times 10^{-6}$ Ом×м.

4. Вперше встановлені закономірності отримання сплавів триботехнічного призначення Al-15Fe-C(MoS₂) методами пресування з наступним спіканням і гарячою штамповкою. Вивчені їх властивості та встановлена їх природа.

5. Встановлено механізм тертя, згідно якому під час взаємодії поверхонь контр тіла та сплаву Al-15Fe-C(MoS₂) відбувається диспергування зерен інтерметаліду та армування продуктами його руйнування матриці сплаву. У наслідок дії даного механізму збільшується зносостійкість і зменшується коефіцієнт тертя.

6. Встановлено, що більш високу зносостійкість і найменший коефіцієнт тертя мають матеріали з композиції Al-15Fe-1,5 % MoS₂ які отримано гарячим штампуванням. Добавки дисульфиду молібдену дозволяють отримати вищу якість поверхні тертя, ніж добавки графіту, що пов'язано зі складною кристалічною структурою MoS₂. Дисульфід молібдену складається з оксидно-сульфідних шарів, зі слабкими зв'язками, які сприяють підвищенню антифрикційних властивостей та зниженню адгезійного зношування.

Пункти наукової новизни результатів знаходять своє підтвердження в наступних пунктах:

1-2. Вказані наукові положення розкрито у розділ 3 дисертаційної роботи. Дисертантом проведені всесторонні дослідження процесів отримання порошку з використанням теоретичних відомостей (табл. 3.3. – 3.4), відомих та усталених фундаментальних засад процесів розпилювання – формули (3.1)-(3.7) та підтверджено власні теорії та гіпотези експериментальним дослідженням

процесу отримання порошків механічним диспергуванням на установці Полет. Показний вплив розміру частинок порошку в паро-газовій суміші на швидкість охолодження так як наслідок на формування мікроструктури. Під час обробки власних даних дисертантом використано для пояснення процесів сплавоутворення допоміжні теплові моделі, що зайвий раз доводить глибину та якість отриманих даних. Заявлений хімічний та фазовий склад порошків, було ретельно досліджено засобами електронної мікроскопії та рентгенівською дифракцією.

3. Зазначене положення наукової новизни розкрито автором в розділі 5. Було проведено фундаментальні дослідження з точки зору отримання чистої фази $Al_{13}Fe_4$ та дослідження її властивостей. Вказаний підхід є дуже вдалим прикладом оптимального шляху під час отримання та розробки нових матеріалів. Відомо, що властивості гетерофазних систем визначаються властивостями кожного зі складових. Зрозуміло, що отримання комплексу властивостей (механічних, теплових, електричних) відкривають широкі можливості для теоретичних досліджень (рис. 5.4-5.7), прогнозування і пояснення нових ефектів та властивостей. Запропонований спосіб отримання шляхом ущільнення методом іскро-плазмового спікання є оптимальним рішенням з точки зору отримання безпористого стану. Вивчення властивостей проводилось на сучасному обладнанні з використанням сучасних методик, що дозволяє стверджувати про високу якість та об'єктивність даних (табл. 5.1).

4-6. Вказані пункти наукової новизни описані в розділі 6. Були проведені прецизійні дослідження процесу отримання сплаву $Al-15Fe$ з добавками твердих мастил на основі графіту та дисульфиду молібдену методами пресування в закритих прес формах з подальшим спіканням (табл. 6.1) та методом гарячого штампування. Аналіз властивостей вказаних сплавів пропонується здійснювати шляхом комплексного підходу з вивчення механічних та триботехнічних властивостей сплавів (п. 6.3, табл. 6.2). Автором дисертації детально проаналізовані поверхні тертя та величини коефіцієнту тертя (рис. 6.6-6.10). Автором оптимізовано склад матеріалу, та запропоновано склад $Al-15Fe-1,5\% MoS_2$ та метод отримання гарячим штампуванням.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії КПІ ім. Ігоря Сікорського під керівництвом професора, кандидата технічних наук, професора кафедри ВТМ та ПМ Степанчука Анатолія Михайловича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо отримання сплавів $Al-15Fe$ з підвищеними експлуатаційними властивостями та високою дисперсністю фаз виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Теслі Сергія Юрійовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності

132 Матеріалознавство та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Матеріалознавство.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Порошкові композиційні матеріали».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Теслі Сергія Юрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською. Текст роботи має структурно-логічну послідовність викладення матеріалу і являє собою комплексну завершену роботу, що містить ґрунтовний аналіз літературних даних, результати дослідження процесів отримання порошків сплавів механічним диспергуванням розплаву, закономірності формування структури та фазового складу порошків та спечених матеріалів, аналітичний опис процесі ущільнення, модельні та експериментальні дослідження механічних та теплових властивостей, триботехнічні властивості сплавів без та з добавками твердих мастил.

Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 172 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, сформовано мету і завдання дослідження, вказано об'єкт та предмет дослідження, наведено ключові методи дослідження властивостей, визначено наукову новизну і практичне значення роботи. Зазначено особистий внесок здобувача, дані про апробацію і публікації результатів дослідження.

У **першому** розділі здійснено аналізу сучасного стану теорії та технології отримання матеріалів триботехнічного призначення. Проведено літературно-патентний пошук методів отримання та закономірностей формування структури і властивостей сплавів алюмінію легованих залізом. В повній мірі розкриті вплив різних факторів на процеси росту зерен інтерметалідів та кінетику спікання.

У **другому** розділі роботи зазначено методики дослідження, технологічні параметри процесу отримання порошків сплаву Al-15Fe методом механічного диспергування та їх подальше ущільнення.

У **третьому** розділі розглянуті теоретичні та технологічні засади процесу отримання порошків Al-15Fe. Відповідно до аналітичного опису показано, що забезпечення високої швидкості охолодження і як наслідок формування дисперсної структури фаз можливо забезпечити за швидкостей охолодження більше 10^6 °C/с. Зі зменшенням розміру частинок швидкість охолодження збільшується від $1,23 \times 10^7$ °C/с для частинок розміром 250 мкм до $2,05 \times 10^7$ °C/с для частинок розміром 50 мкм. Мікроструктура порошків складається з матриці алюмінію та частинок $Al_{13}Fe_4$ та метастабільної фази Al_6Fe .

У **четвертому** розділі автором наведені закономірності процесів пресування відповідно до уявлень М. Ю. Бальшина та спікання. Показано, що фактор пресування L зі збільшенням ступеню деформації не залишається постійним. За рахунок аналізу мікроструктури пресовок, та кривих відносної щільності автором запропоновано механізм пресування, за яким в основі ущільнення лежать процеси не лише пластичної деформації, але й крихкого руйнування інтерметалідів. розділі представлено основі закономірності процесів консолідації сплавів $Al_{13}Fe_4$. Консолідацію порошків автором пропонується проводити вільним спікання та гарячим штампуванням. Показано, що в умовах твердофазного спікання у середовищі водню в інтервалі температур $500 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 30 хв відбувається збільшення об'єму (від'ємна усадка) деталей. Останнє зумовлено трансформацією метастабільної фази Al_6Fe у $Al_{13}Fe_4$. Альтернативним методом отримання триботехнічних матеріалів запропоновано імпульсний метод – гарячого штампування за енергії 2,5 кДж та температури попереднього нагріву $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час застосування гарячого штампування порошкові матеріали мають практично без пористу структуру та спадкують реологічні особливості структури закладені на етапі їх отримання.

У **п'ятому** розділі дисертаційної роботи проведені експериментальні дослідження щодо отримання чистого інтерметаліду $Al_{13}Fe_4$. Нові та фундаментальні дані щодо властивостей інтерметаліду можуть бути цінними в області прогнозування кінцевих властивостей сплавів. Автором запропоновано аналіз механічних властивостей методом скінченних елементів сплавів $Al-15Fe$ виходячи з отриманих властивостей чистого інтерметаліду. Показано, що розрахункові значення міцності на розтяг складають $350 \pm 12\text{ МПа}$, в той же час для сплавів отриманих гарячим штампуванням експериментальні значення міцності на розтяг складає $250 \pm 8\text{ МПа}$. Межа текучості на стиск сплави отримані гарячою штамповкою мають межу текучості на рівні $350 \pm 10\text{ МПа}$, натомість після спікання $240 \pm 13\text{ МПа}$. Було проведені додаткові дослідження процесів теплопровідності, значення якої є фундаментальними з точки зору конструювання вузлів тертя показано, що значення теплопровідності сплавів $Al-15Fe$ змінюються в межах $145 - 150 \pm 8\text{ Вт/м}\times\text{К}$ залежно від умов їх отримання. Оскільки, під час тертя можливе виникнення локальних перегрівів матеріалів, дисертантом було проведено дослідження окисної стійкості та показано, що за температур $300 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ процеси зміни маси і, відповідно, окиснення практично не відбуваються.

У **шостому** розділі представлені результати триботехнічних випробувань матеріалів $Al-Fe-M$ (де M – графіт або MoS_2). Показано, що оптимальним складом матеріалу триботехнічного призначення є $Al-15Fe-1,5\text{ \% }MoS_2$ отриманого методами гарячого штампування за попереднього нагріву в $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час аналізу топології поверхонь тертя дисертантом встановлено, що в основі процесу зношування лежить механізм крихкого руйнування інтерметалідів з їх подальшим проникненням в пластину матрицю алюмінію. Дія даного механізму дозволяє додатково зміцнити матрицю та стабілізувати процес тертя. Тверді мастила під час тертя, разом з продуктами зношування формують шари вторинних структур як знижують коефіцієнт тертя. Встановлено що в парі $Al-$

15Fe-1,5 % MoS₂ стальне та мідне контр тіло, коефіцієнт тертя складає 0,05 та 0,037 відповідно.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 12 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 2 статей у виданнях, віднесених до першого — третього кuartилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях. Аналізуючи внесений доробок дисертанта, можна дійти до висновку, що матеріали дисертаційної роботи пройшли широку апробацію, є достовірними та науково-обґрунтованими. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. На рисунку 1.5 бракує схеми утворення металевого контакту між двома елементарними частинками порошку під впливом зовнішнього тиску.

2. В літературному огляді наводиться багато посилань та прикладів досліджень сплавів Al-Fe. Дисертантом під час опис літературних даних використовуються всі існуючі в практиці позначення концентрації елементів, а саме атомарні, об'ємні, вагові відсотки, та позначення концентрації компонентів без вказання розмірності. Це дещо ускладнює порівняння та аналіз отриманих в межах дисертації даних, з іншими дослідженнями.

3. В літературному огляді та в розділах 2 і 4 наведено приклади та експериментальні дані деформаційної обробки порошкових тіл, зокрема консолідації заготовок. Водночас у літературному огляді процес гарячого штампування автор характеризує зусиллям штампування, а під час власного експерименту – енергією штампування. Зусиллям, як правило, характеризується обладнання, а не процес. А у випадку холодного пресування автор використовує питому характеристику процесу ущільнення – тобто тиск, в МПа. Таким чином, порівняти процеси ущільнення при наявності тільки вказаних вище даних проблематично.

4. У висновках до розділу 1 автор вказує, що «За рахунок отримання сплавів у вигляді порошків можливо суттєво зменшити розмір інтерметалідів до 1 – 5 мкм, що повністю задовольнятиме вимоги щодо дисперсного зміцнення». Це вірний підхід, однак дисперсне зміцнення найкраще реалізується за розмірів дисперсоїдів в нанометровому діапазоні. Важливо було б показати ще й вміст

дисперсної фази по відношенню до матричного матеріалу. Інакше, при мікронних розмірах зміцнювальної фази для досягнення заданої міцності необхідно буде збільшувати частку дисперсної фази, що може призвести до переходу із класу дисперсно-зміцнених до класу композиційних матеріалів.

5. Згідно рис. 3.3 частинки розміром 50 мкм при розпиленні охолоджуються майже вдвічі швидше порівняно з частинками розміром 250 мкм і в 1,5 рази швидше за частинки розміром 100 мкм, а аналізу структури для даних частинок не приведено, хоча саме в структурі таких частинок можна очікувати утворення дисперсних фаз розміром менше 0,5 мкм, які повинні краще виконувати функцію частинок зміцнювання матриці при реалізації механізму дисперсного зміцнення.

6. В розділі 5, підрозділ 5.1.2 автор зазначає, що: «Дані уявлення щодо міцності матеріалів повністю узгоджуються з теоріями Орована та Ансвела-Ланела» - в роботі автор посиляється на дані теорії, але не приводить дані щодо розрахункових значень зміцнення, що може виникати від утворених інтерметалідних дисперсоїдів.

7. В деяких наведених автором формулах не вказано назву та розмірності змінних, що входять до складу рівняння, також відсутня нумерація рівнянь, в розділах 4 та 5.

8. На рис. 5.4 та рис. 5.7 показано криві напруження-деформація зразків сплаву Al-15Fe (ваг.%). Помітна суттєва різниця модулів пружності для експериментального матеріалу, який консолидовано різними методами. В роботі відсутні аргументи, щодо пояснення даного ефекту. Крім того, навіть модельна оцінка модуля пружності експериментального матеріалу, якщо користуватися показаною кривою напруження-деформація, буде відповідати занадто низькому значенню, приблизно 1,5 ГПа. Але під час модельних розрахунків автор задавав параметр модуля пружності для чистого алюмінію 70 ГПа. Тобто в наведених кривих напруження-деформація присутня суттєва невідповідність, що може бути пов'язано з помилками при вичлененні жорсткості машини із загальної кривої, можливо невірно показана шкала деформації, можливо випробування зразків відбувалися з різними швидкостями, тощо.

9. Автор в підрозділі 5.1.2 стверджує, що «Під час деформації відбувається рух дислокацій з виходом на поверхню, що відображається у вигляді ліній ковзання на зламах» опираючись на «струмковий візерунок», що виникає на поверхні зламу. Однак вказаний характер руйнування притаманний крихким матеріалам та інтерметалідам також і виникає внаслідок розповсюдження тріщини сколу, яка проходить по різних площинах, що створює характерні сходинки. Але з наведених фрактографічних досліджень зробити однозначний висновок про лінії ковзання складно.

10. Із таблиці 5.2 випливає, що межа плинності спеченого експериментального матеріалу становить 50 МПа, в той час як на кривій напруження-деформація даний параметр відповідає значенню близько 150 МПа.

Окрім того, з даної таблиці також видно, що різниця в межі плинності експериментального матеріалу при випробуваннях на стискання та розтяг становить близько 100 МПа (при отриманні матеріалу за однією технологією, наприклад, штампуванням). Автор не зосереджує увагу на даному факті і не пояснює його.

11. В анотації та загальних висновках (висновок 4) автор звертає увагу на значно вищий показник межі плинності матеріалу консолідованого гарячим штампуванням порівняно зі спеченим. Автор пояснює даний факт різними механізмами формування металевго контакту між вихідними частинками порошку під час їх ущільнення, але чомусь не звертає уваги на високу пористість спечених зразків, яка складає до 15% порівняно з безпористими зразками після гарячого штампування.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Теслі Сергія Юрійовича на тему «Закономірності отримання порошкових сплавів Al-Fe триботехнічного призначення» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для 13 Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Тесля Сергій Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

Страшний науковий співробітник,
Інституту проблем матеріалознавства
імені І. М. Францевича НАН України,
кандидат технічних наук

Олександр ТОЛОЧИН



«24» квітня 2024 року

Дис. С.И.С. Л.Т.Н. Олексаширо Телогиня
во. дд. секретаря ГИМ Нотариуса Делу Л. Мухомов