

**АНАЛІЗ ЗАСТОСОВУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВКЛАДИШІВ
ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ**

ШИФР «dp1002212»

Зміст

Вступ.....	3
1. Композиційні матеріали і методи їх отримання.....	4
2. Антифрикційні властивості	11
3. Аналіз властивостей зміцнених композитних матеріалів вкладишів підшипників колінчастого валу.....	16
4. Обґрунтування застосовності композитного матеріалу у вкладишах колінчастого вала двигуна внутрішнього згоряння.....	24
Висновок.....	28
Список літератури.....	29

Вступ

Для сучасного обладнання характерні високі швидкості ковзання і навантаження. Тому для надійного його експлуатації потрібні нові антифрикційні матеріали в вузлах тертя, в тому числі і на алюмінієвій основі. Застосування поширених металевих і неметалевих матеріалів при цьому мало ефективно. Задовольнити всі необхідні вимоги можливо із застосуванням деталей з композиційних матеріалів.

1. Композиційні матеріали і методи їх отримання

У даний час для сучасного устаткування потрібні матеріали, здатні витримувати значні навантаження, як силові, так і температурні, в деяких випадках, і при наявності агресивного середовища. Застосування поширених металевих і неметалевих матеріалів при цьому мало ефективно. Задовольнити всі необхідні вимоги можливо із застосуванням деталей з композиційних матеріалів.

Композиційним матеріалом або композитом прийнято називати об'ємну гетерогенну систему, до складу якої входять різні за своїми властивостями, взаємно нерозчинні компоненти. Структура, яка об'єднує всі компоненти системи, дозволяє використовувати переваги кожного з компонентів [1].

Таким чином, за допомогою композиційних матеріалів можна отримати різnorідні властивості в одному виробі, що зазвичай неможливо із застосуванням поширених матеріалів. Завдяки застосуванню композиційних матеріалів з'являється можливість знизити масу машин і окремих конструкцій, збільшити потужність двигунів тощо. Відомо [1], що композити складаються з основи і наповнювачів. В якості наповнювача, в залежності від області застосування даного композиту, можуть використовуватися як тверді включення, якщо потрібні високі міцність і твердість, так і м'які. При наявності двох видів включень, композити називаються гібридними. Варто зазначити, що властивості композитів знаходяться в прямій залежності від характеристик основи, наповнювачів, а також сили їх взаємодії.

Основа або матриця укладає композицію в моноліт, а також надає форму і призначається для переносу зовнішніх навантажень на наповнювач. Композити класифікуються по виду матриці наступним чином: металеві, полімерні і керамічні. Найбільш поширеним методом отримання металевих композиційних матеріалів є порошкова металургія, також відомі методи окислення, відновлення, електрохімічні і кристалізація з розплаву. Керамічні композиційні матеріали виробляють змішуванням компонентів із застосуванням різних установок з подальшим формуванням заготовок шляхом ущільнення, лиття і ін. Отримання

полімерних композиційних матеріалів здійснюється при інтенсивному змішуванні в розплаві, після чого виробляють грануляцію [1, 2].

Металеві композити в порівнянні з композитами на інших основах володіють наступними перевагами [3].

Механічні властивості: високі значення характеристик, що залежать від властивостей матриці (міцність в напрямку, перпендикулярному осі армуючих волокон; пластичність; збереження міцності до температур плавлення основного металу).

Фізичні властивості: висока тепло- і електропровідність.

Хімічні властивості: негорючість (в порівнянні з КМ на полімерній основі).

Технологічні властивості: хороша деформованість, оброблюваність.

Також необхідно відзначити, що зміцнюючі наповнювачі існують трьох типів: шаруваті, волокнисті і дисперснозміцненні [4].

Відмінні риси їх будови представлені на рисунку 1.

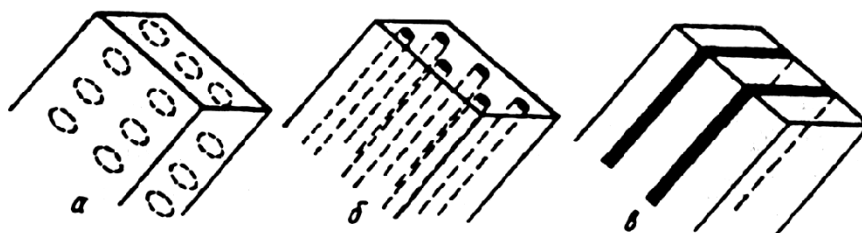


Рисунок 1 - Будова композитів: а – дисперснозміцненні, б – волокнисті, в – шаруваті [4]

Шаруваті композити виробляють шляхом чергування шарів наповнювача і основи. Основою вибирають метал, кераміку або пластмасу, а в якості наповнювача - стрічки з тканин, полімерні волокна і ін. Шаруваті композити широко застосовуються в машинобудуванні, будівництві, меблевої промисловості та ін. Крім цього, такі композити, виготовлені із застосуванням фенолформальдегідних смол зі скло- або вуглецевим волокном, застосовують для теплозахисту ракет. У певних випадках в ролі єднальної можуть виступати

нікелеві, алюмінієві, мідні, кобальтові та титанові листи, а шарами - кераміка, метали, інтерметалідним з'єднання [4].

Волокнисті композити характеризуються волокнистих наповнювачем, існуючим в різному вигляді. Це можуть бути стрічки, нитки і сітки різного плетіння. Такі композити виробляють методами гарячого пресування або шликерного лиття, при якому волокна змочуються суспензією матричного матеріалу, після чого суспензія піддається сушінню, а потім спікання. На рисунку 2 показаний приклад виробництва волокнистого КМ. Процес починається з того, що волокна знімають з бобін, потім піддаються поверхневій обробці, що підвищує адгезію. Після чого волокна містяться в ванну для нанесення полімерної смоли. За допомогою смоли волокна об'єднуються в плоский джгут (стрічку). Готові стрічки можуть збиратися в шаруватий листовий матеріал, після чого відбувається затвердіння за допомогою термообробки [4].

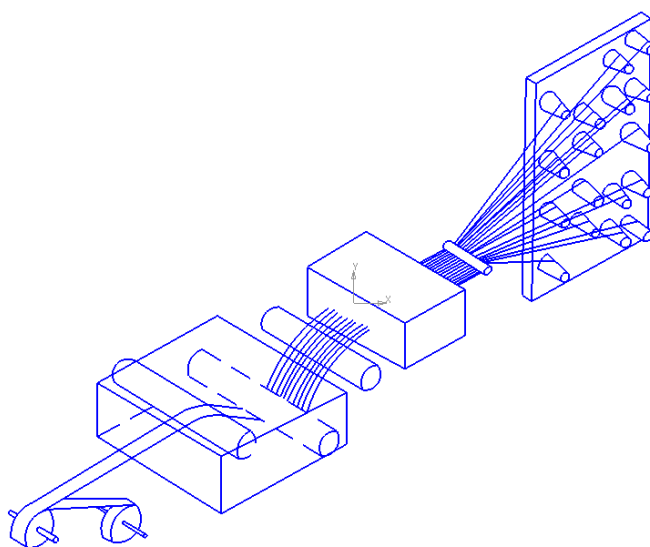


Рисунок 2- Схема виробництва волокнистого композиційного матеріалу

Волокнисті композити на металевій матриці використовують для експлуатації при дуже високих температурах. Найчастіше застосовують алюміній, титан і магній, що відрізняються невеликою щільністю. Для металевих КМ характерні висока теплопровідність і електропровідність. Експлуатація матеріалів при досить високих робочих температурах обумовлює використання

кераміки в якості основи композитів. Однак суттєвим її недоліком є відсутність пластичності, що різко обмежує її застосування в якості основи композиту. Також, варто відзначити, що використання в ролі основи аморфного вуглецю, а в ролі наповнювача - волокна з графіту, дозволило створити КМ, що витримує нагрівання до 2500 °С.

Для наповнення волокнистих композитів найчастіше використовуються безперервні волокна з наступних речовин: вуглецю, бору, карбіду і нітриду бору, оксиду алюмінію, карбіду і оксиду кремнію і диборида титану. Крім цього, може використовуватися металева тонка проволока, виготовлена методом волочіння з вольфраму, сталі, титану та берилію.

Широко розповсюдженими є вуглецеві і борні волокна.

Методами виробництва волокнистих композиційних матеріалів є просочення волокон в рідких розплавах магнію і алюмінію, плазмового напилення, а також гаряче пресування. Для виробництва композиту з чергуються шарів алюмінієвої фольги і волокон застосовують гаряче пресування, зварювання вибухом, прокатку і дифузійну зварювання [4].

У таблиці 1 представлені основні характеристики металевих матриць, серед яких щільність речовини (ρ), тимчасовий опір розриву (σ_s), модуль нормальної пружності (E) і температурний коефіцієнт лінійного розширення (α).

Таблиця 1 -Характеристики металевих матриць [1]

Матриця	ρ , г / см ³	σ_s , МПа	E , ГПа	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹
алюміній	2,63 - 2,80	250 - 573	69 - 73	11 - 13
магній	1,74 - 1,83	200 - 280	43 - 45	14 - 15
нікель	4,5	500 - 1200	113	9 - 10
мідь	8,94	220 - 400	132	17 - 18

Дісперснозміцненні композити отримують при введенні найдрібніших тугоплавких частинок карбідів, нітридів, оксидів і ін. Чим менше розмір часток і менше відстань між ними, тим міцнішим буде отриманий композит. Дисперсні

частинки перешкоджають шляхом опору руху дислокацій пластичної деформації, яка може виникати при дії навантаження. Найкраще опір руху дислокаціям забезпечується до температури плавлення основи, завдяки чому для таких композитів характерні висока жароміцність і високий опір повзучості. Відомо, застосування таких дисперсних тугоплавких частинок, як Al_2O_3 , SiO_2 , SiC , BN , що характеризуються відносно невеликою щільністю і високим модулем пружності.

Композиційні матеріали з зміцнюючих дисперсними частинками.

У промисловості найбільш поширені дісперснозміцненні композити на алюмінієвій основі. Серед яких яскравим прикладом є спечена алюмінієва пудра, що складається з алюмінієвої основи і зміцнюючих дисперсних частинок з оксиду алюмінію. Методом розпилення розплавленого металу і подальшого подрібнення в кульових млинах у присутності кисню отримують порошок алюмінію з розміром частинок до 1 мкм. У процесі помелу частки подрібнюються, і в них збільшується концентрація оксиду алюмінію. На наступній стадії виробництва виробів здійснюється холодне пресування, попереднє спікання, гаряче пресування, прокатка або видавлювання заготовки у формі готових виробів, які в деяких випадках, піддають термічній обробці [4].

У гарячому стані, сплави подібні спеченої алюмінієвої пудри, здатні добре деформуватися, а в умовах кімнатної температури деформуються сплави з концентрацією 6-9% оксиду алюмінію. Відомо, застосування подібних сплавів з вмістом від 6 до 23% оксиду алюмінію [1]. Подібні сплави застосовуються в авіаційній техніці, також з них виготовляють оболонки теплообмінників, деталі компресорів, штоки поршнів та ін.

Основні фізико-механічні властивості наповнювачів композиційних матеріалів на алюмінієвій основі наведені в таблиці 2, в яку занесені найбільш важливі характеристики композитів, такі як питома міцність (σ_b / ρ) і питома жорсткість (E / ρ).

Необхідно відзначити, що у односпрямованих композитів на основі алюмінію, магнію і титану модуль пружності, міцність, опір удару підвищуються

зі збільшенням кількості волокон. Особливістю металевого армування є значне підвищення ударної в'язкості.

Використання в якості наповнювача оксиду алюмінію для композиційного матеріалу на основі алюмінію забезпечує обмеження для розвитку тріщин, і тим самим, запобігає розшарування [4].

Таблиця 2 - Характеристики наповнювачів композитів на основі алюмінію

Матеріал волокна	ρ , г/см ³	E, ГПа	σ_b , МПа	α , 10^{-6} К ⁻¹	E/ ρ	σ_b/ρ	T _{max} , °C
основа алюмінієвого сплаву	2,63 - 2,8	69 - 73	40 - 60	11 - 13	2,5	20	150
вуглець	2,1 - 2,3	360/35	850/70	1,0 - 3,6	20	90	500
Бор	2,6	250/140	1800/330	6,0	10	70	540
Карбід кремнію	2,85 - 2,9	230/140	1600/350	6,1	7	56	300
Оксид алюмінію	3,4	260/140	1200	-	7	34	-

Композиційні матеріали на основі алюмінію широко поширені в аерокосмічній, автомобільній, будівельній, морський та електронної промисловості завдяки відносно легкій вазі, відмінними механічними властивостями, хорошою теплової та електричної провідності.

Актуальною проблемою в даний час є зменшення інтенсивності зношування деталей відповідального обладнання в процесі тертя. Для вирішення даної проблеми необхідні модернізація існуючих або створення принципово нових антифрикційних виробів, що відрізняються підвищеними механічними і трибологічними властивостями. Успішна розробка такого роду виробів призведе до зниження витрат на ремонт обладнання і в цілому виявиться вельми вигідною з економічної точки зору.

Відомо, що алюмінієві сплави і композиційні матеріали на основі алюмінію досить рідко застосовуються для створення антифрикційних виробів через велику ймовірність схоплювання з дотичними сталевими деталями в разі

недостатньої кількості мастила на поверхні тертя. Однак додавання олова до алюмінію дозволяє перешкоджати процесам схоплювання, оскільки олово в процесі експлуатації підшипника здатне розмазуватися по поверхні тертя. Крім цього, сплави на основі системи Al-Sn характеризуються корозійною стійкістю, втомної міцністю і високою теплопровідністю, що дуже важливо при роботі антифрикційних матеріалів. Варто відзначити, що підвищення вмісту олова в сплаві на основі алюмінію сприяє підвищенню зносостійкості антифрикційного матеріалу в разі наявності зв'язкового матричного каркаса.

Методи лиття дозволяють отримувати подібні матеріали з вмістом олова не більше 20%, що може бути недостатньо з огляду на високі швидкості ковзання і тисків, при яких експлуатуються вузли тертя сучасних машин і механізмів. Саме тому став затребуваний метод порошкової металургії, що дозволяє отримувати спечені композити на основі алюмінію з вмістом олова до 40% зі збереженням високої пов'язаності алюмінієвого каркаса.

Однак композити Al-Sn мають відносно низьку твердість, що є їх недоліком при роботі підшипників при високих навантаженнях. Одним з методів підвищення зносостійкості композиційних матеріалів є впровадження в їх склад зміцнюючих твердих частинок. Останнім часом великий інтерес у трибологів викликають так звані гібридні композити, які містять одночасно велику кількість і м'яких включень, і твердих частинок. При цьому, варто зазначити, що добавки, які вводяться, не повинні знижувати пластичність матеріалу, а повинні сприяти підвищенню міцності і поліпшенню несучої здатності КМ. Крім того, розташовуючись на периферії алюмінієвих зерен, зазначені добавки взаємно перешкоджають утворенню небажаних безперервних сіток. Ідеальне поєднання твердих і м'яких добавок в алюмінії реалізується в системі Al-Si-Sn. І кремній, і олово в твердому алюмінії практично не розчиняються, тому не утворюють з матрицею тендітних перехідних шарів, що знижують пластичність матеріалу. При експлуатації підшипників в умовах високих температур, потрібна наявність зміцнюючих часток, більш міцних і жаростійких, ніж кремній. Крім того, кремній погано змочується оловом навіть при температурі вище плавлення

алюмінію, тому адгезійні границі «Si-Sn» є слабкими місцями в такому композиційному матеріалі.

Вирішити зазначену проблему можна шляхом введення інтерметалідів, що містять алюміній, оскільки його наявність у складі з'єднань забезпечує їх хорошу адгезію з алюмінієвої матрицею і міцні міжфазні границі. У зв'язку з цим можливе застосування композиційного матеріалу системи Al-Fe-Sn, при синтезі якого можуть утворюватися тугоплавкі і тверді інтерметаліди типу FeAl_3 . Отримання таких композиційних матеріалів доцільно здійснювати методом порошкової металургії, оскільки в даному випадку, в матеріалі, який спекається, буде постійно присутня велика кількість твердих, періодично зіштовхуються один з одним часток, що істотно обмежує процеси розшарування фаз.

2. Антифрикційні властивості

Антифрикційними матеріалами прийнято називати спеціальні матеріали, які використовуються для деталей машин, що експлуатуються в умовах тертя. Для таких матеріалів характерні низький коефіцієнт тертя, слабка адгезія, висока теплопровідність, висока зносостійкість, здатність забезпечити рівномірне змащування і відмінну працездатність.

Різні конструкції вузлів тертя, особливості умов експлуатації сприяли розробці досить різноманітних антифрикційних матеріалів, до яких можна віднести [3]:

- Бабіти - сплави на основі свинцю та олова;
- Бронза - сплав на основі міді;
- Сірий чавун - сплав на основі заліза;
- Бронзографіт, залізографіт - металокерамічні сплави;
- Фторопласт-4, текстоліт - пластмаси;
- Композиційні матеріали типу «метал-пластмаса»;

- Алюмінієві сплави.

В даний час для виробництва підшипників найбільш часто вибирають дорогі сплави, серед яких найбільш затребувані бронзи [3]. Саме тому актуальним завданням є створення більш дешевих, але не менш надійних матеріалів. Алюмінієві сплави відповідають необхідним вимогам і мають антифрикційні властивості, порівнянні з бронзою. Останнім часом алюмінієві сплави також найбільш поширені в якості заміни сплавів на свинцевою і олов'яної основі. Металеві антифрикційні матеріали по структурі поділяються на дві категорії: матеріали з твердою основою і м'якими наповнювачами і матеріали з м'якою основою і твердими наповнювачами.

Алюмінієві сплави за своїм складом поділяються на дві групи. До першої групи відносяться сплави на основі металу, до складу яких входять тверді структурні складові, такі як: Al_3Ni , Mg_2Si , FeAl_3 , CuAl_2 і ін. Такі сплави застосовуються при великих швидкостях обертання і незначних навантаженнях з використанням мастила. Недоліком подібного роду сплавів є те, що в разі припинення мастила, відбувається їх схоплювання з контртілом. Саме з цієї причини були розроблені сплави, леговані оловом, які відносяться до другої групи. При використанні таких сплавів, в разі припинення надходження мастила, її функцію виконує м'яке олово. Отже, не відбувається контакту заліза з алюмінієм, а значить, деталі не схоплюються. Однак велика концентрація олова робить негативний вплив на пластичність через погіршення пов'язаності алюмінієвого каркаса. Відомо, що в сплави можна ввести мідь для зміцнення алюмінієвої основи, а також залізо, кремній, нікель як зміцнюючі добавки. В результаті несуча здатність, а, отже, і зносостійкість алюмінієвого сплаву знижується [4].

Згідно з літературними даними [5], для виготовлення двигунів широко застосовується силумін, для якого характерні низький коефіцієнт термічного розширення, хороша текучість і зносостійкість. Велика кількість тендітних і великих кристалів кремнію в силуміні обумовлює зниження пластичності, теплопровідності і оброблюваності тиском.

Таким чином, і олово, і кремній при певній концентрації можуть сприяти зменшенню пластичності алюмінієвого сплаву. Можна припустити, що наявність двох легуючих компонентів, один з яких виконує функцію змащення, а інший – твердих інертних до контртіла частинок, призведе до підвищення зносостійкості зі збереженням пластичності. Так, в роботі [6] встановлено, що зносостійкість сплаву Al17Si-10Sn, отриманого напиленням на мідну підкладку, виявилася набагато вище зносостійкості силуміну, отриманого і випробуваного в тих же умовах.

Іншими словами, навіть невелика кількість олова сприятливо впливає на зносостійкість силумінів. Можна припустити, що при більш високих концентраціях олова покращиться трибологічна властивість композиту, якщо при цьому вдасться зберегти міцні зв'язки алюмінієвої матриці і виключити контакт частинок олова і кремнію, оскільки їх міжфазні границі неміцні.

В роботі [7] показано, що методом порошкової металургії можна отримати сплав алюмінію з оловом, де концентрація останнього склала 40%, зі збереженням пов'язаності алюмінієвого каркаса.

При проведенні досліджень по створенню композиційного матеріалу (Al-12Si) -xSn методом рідкофазного спікання пресовок з суміші порошків олова і евтектичного сплаву (Al-12Si) встановлено, що зносостійкість композитів збільшується зі зростанням концентрації в них олова, на відміну від міцності, де спостерігається зворотна залежність [8]. Необхідно відзначити, що всі отримані композиційні матеріали характеризуються досить міцною матрицею. Найменшу інтенсивність зношування при сухому терті сталевому контртілі мали зразки з підвищеним вмістом олова. Варто відзначити, що чим більше тиск на поверхні тертя, тим сильніше виражена така закономірність (таблиця 3).

Таблиця 3 - Вплив вмісту олова і тиску на інтенсивність зношування спечених композитів (Al-12Si) -xSn підданих подальшому доущільненню при 250°C

Склад	Інтенсивність зношування, мк м / м			
	Тиск, МПа			
	1	2	3	4
(Al-12Si) -10Sn	0,11	0,19	0,26	0,34
(Al-12Si) -20Sn	0,10	0,16	0,24	0,21
(Al-12Si) -30Sn	0,13	0,17	0,22	0,20
(Al-12Si) -40Sn	0,10	0,14	0,21	0,18

Згідно з даними, наведеними в таблиці 3, видно, що при збільшенні тиску від 1 до 4 МПа інтенсивність зношування порівнюваних композитів збільшується. При тиску понад 4МПа відбувається зниження інтенсивності зношування, за винятком композиту (Al-12Si) -10Sn. У складі кожного сплаву присутні олово, свинець, мідь, кремній, магній і цинк. Хімічний склад і характеристики експериментальних сплавів представлені в таблиці 4.

В процесі тертя по сталевому при подачі масла M14V2 як мастило, сплав АТ-5,8 показав найнижчий знос, тим самим перевищивши свідчення еталонної бронзи в 5-6 разів.

Таблиця 4 - Композиційні матеріали і їх характеристики, отримані після 40 годин тертя.

Сплав	Масовий вміст, %							σ , МПа	Знос сплаву, мг	Знос сталі, мг	Темп., °С
	Sn	Pb	Cu	Si	Zn	Mg	Al				
АТ-5,4	5,4	2,6	3,5	0,8	2,3	1,7	83,7	144	0,5	0,7	36
АТ-5,8	5,8	2,7	4,1	1,5	2,3	1,5	82,1	140	0,4	0,6	40
АТ-6,4	6,4	3,0	4,1	0,9	1,9	1,4	82,3	139	0,9	1,0	38
АТ-7,6	7,6	3,3	4,0	1,0	0,5	0,07	83,5	159	0,5	0,8	42
АТ-8,7	8,7	3,2	3,4	0,5	2,9	0,4	80,9	168	2,4	0,8	32
АТ-9,6	9,6	3,2	4,9	0,1	4,4	0,3	77,5	185	2,0	2,1	37
АТ-9,8	9,8	2,5	4,5	0,6	2,4	1,2	79,0	163	0,1	0,7	31
АТ-11	11,0	2,6	3,9	0,1	2,6	-	79,8	173	1,2	0,6	33
BrO4Z4S17	4,1	16,9	75,2	-	3,8	-	-	148	2,7	4,0	38

Після 40 годин тертя виявлені структурні зміни, а саме, утворення вторинних структур на поверхні тертя сплаву. У процесі тертя такі структури сприяють меншому зношуванню алюмінієвої матриці, так як утворюють на поверхні мікрорельєф, який сприятливо впливає на здатність утримувати масло на поверхні тертя. Процесами, які беруть участь у формуванні вторинних структур, є масообмін, дифузія, окислювання, і трибохімічні реакції. [9].

Олово вмістом від 8,5 до 11% здатне знизити питомий опір і збільшити зносостійкість матеріалу і сталевго контртіла. Свинець концентрацією 2,5-3,2% підвищує працездатність і зносостійкість алюмінієвого антифрикційного сплаву. Цинк концентрацією від 2,41% до 3,39% також підвищує працездатність і сприяє зниженню зносу контртіла. Введення заліза до 0,13% також є сприятливим, так як сприяє підвищенню зносостійкості сплавів [10].

На основі аналізу встановлено, що спікання порошків алюмінію і олова при температурі 600°C протягом 1 години сприяє створенню високощільних композитів з міцної алюмінієвої основою і рівномірно розподіленими частинками олова. Такі композиційні матеріали з концентрацією олова до 20 об.% мають високу зносостійкість при сухому терті по сталі.

Варто відзначити, що розмір часток алюмінію в спечених композитах Al-Sn не залежить від змісту олова, оскільки формування алюмінієвої матриці відбувається за єдиним механізмом наступним чином. Спочатку відбувається фрагментація алюмінієвих порошків рідким оловом, потім - укрупнення алюмінієвих частинок, що протікає з однаковою швидкістю шляхом розчинення дрібних і перекристалізації розчинилися атомів через рідку фазу. Товщина прошарків олова збільшується з ростом його концентрації в композиті, а зв'язок частинок алюмінієвої матриці при цьому погіршується.

Відомо, що каркас спечених композиційних матеріалів залишається міцним і пов'язаним при об'ємній частці олова (20 об.%), що вдвічі більше, ніж в литих промислових сплавах алюмінію з оловом.

Існує інформація, що міцність спечених композитів при стисненні є величиною адитивною, яка визначається об'ємним співвідношенням Al- і Sn-фаз.

Дані фази являють собою механічну суміш невзаємодіючих частинок і відчують однакову деформацію незалежно від їх розташування.

Як приклад на рисунку 3 представлена структура композитів Al-Sn, отриманих спіканням при температурі 600 °C протягом 1 години.

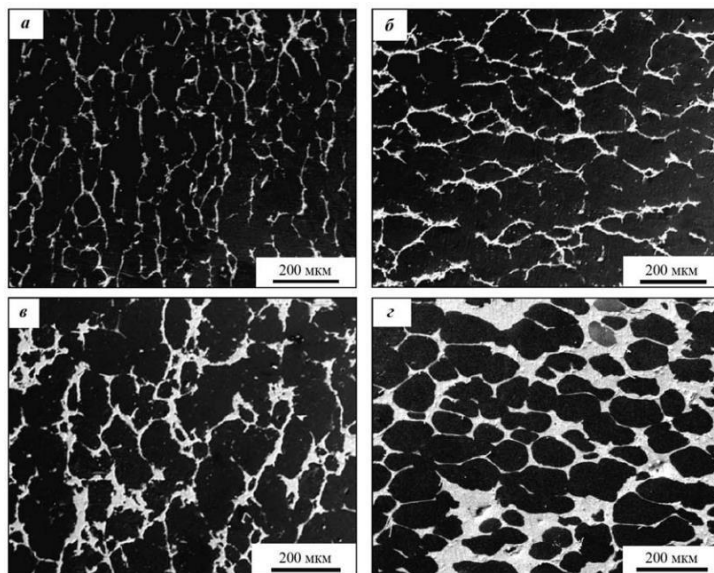


Рисунок 3 - Мікроструктура композитів алюмінію з оловом, отриманих спіканням при температурі 600 °C протягом 1 години.

Sn, мас. %: А - 10; б - 20; в - 30; г - 50 [11]

3. Аналіз властивостей зміцнених композитних матеріалів вкладишів підшипників колінчастого валу

Об'єктом дослідження є композитний матеріал в якості матеріалу вкладишів колінчастого валу двигуна внутрішнього згорання, елементи кривошипно-шатунного механізму 4х циліндрового двигуна.

Основні вихідні дані для розрахунку напружено деформованого стану елементів кривошипно-шатунного механізму, є результатом динамічного розрахунку, виконаного в аналітичній формі (табл. 5).

Для отримання композитів Al-Fe-Sn можливе використання порошку карбонільного заліза з розміром частинок менше 50 мкм, порошок олова марки

ПО-2 і алюмінієвий порошок АСД-4. Мінімальний вміст олова в складі ПО-2 становить 99% згідно з ГОСТ 9723-73. Колір ПО-2 - сірий. Олов'яний порошок ПО-2 характеризується негорючістю, здатністю надавати поверхні антикорозійні властивості, тому його застосування виправдане в різних галузях промисловості. Алюмінієвий порошок АСД-4 представляє собою сферичний дрібнодисперсний порошок світло-сірого кольору, що відрізняється металевим блиском. До складу порошку входять 99,7% алюмінію і 0,3% домішок. АСД-4 характеризується легкістю, корозійну стійкість, стійкість до високих температур і до ультрафіолету. Застосування алюмінієвого порошку затребуване в теплоенергетиці, космічній промисловості, а також у хімічній і парфумерній галузі. Оскільки алюмінієвий порошок містить вологу, то перед приготуванням сумішей потрібно сушка при температурі 120 °С протягом двох годин у вакуумі.

Використання суміші з вмістом заліза 5% виходячи з того, що в процесі спікання пресування Al-Fe-Sn повинні формуватися інтерметаліди складу FeAl_3 , або FeSn_2 , і обсяг нової фази повинен зрости приблизно в 4 і 3 рази, відповідно. Ваговий вміст компонентів в суміші обчислюється за формулою:

$$C_a = \frac{A_a \cdot a}{A_a \cdot a + B_b \cdot b + C_c \cdot c} \cdot 100\%$$

де A_a , B_b , C_c - атомні маси компонентів А, В і С.

a , b , c - атомні концентрації даних компонентів.

Таким чином, ваговий вміст заліза і олова в механічній суміші обчислимо таким чином:

$$C_{Fe} = \frac{A_{Fe} \cdot a}{A_{Fe} \cdot a + B_{Sn} \cdot b + C_{Al} \cdot c} \cdot 100\%$$

$$C_{Sn} = \frac{B_{Sn} \cdot b}{B_{Sn} \cdot b + A_{Fe} \cdot a + C_{Al} \cdot c} \cdot 100\%$$

де A_{Fe} - атомна маса заліза, що дорівнює 55,847 а. е. м. ;

B_{Sn} - атомна маса олова, рівна 118,710 а. е. м. ;

C_{Al} - атомна маса алюмінію, що дорівнює 26,982 а. е. м.

Обчислимо ваговий вміст заліза в першій механічній суміші Al-5at.% Fe-6at.% Sn:

$$C_{Fe} = \frac{55.847 \cdot 5}{55.847 \cdot 0.05 + 118.710 \cdot 0.06 + 26.982 \cdot 0.89} \cdot 100\% = 8\text{мас}\%$$

Обчислимо ваговий вміст олова в першій механічній суміші Al-5at.% Fe-6at.% Sn:

$$C_{Sn} = \frac{118.710 \cdot 6}{118.710 \cdot 0.06 + 55.847 \cdot 0.05 + 26.982 \cdot 0.89} \cdot 100\% = 21\text{мас}\%$$

Обчислимо ваговий вміст заліза в другій механічній суміші Al-5at.% Fe-13at.% Sn:

$$C_{Fe} = \frac{55.847 \cdot 5}{55.847 \cdot 0.05 + 118.710 \cdot 0.13 + 26.982 \cdot 0.82} \cdot 100\% = 7\text{мас}\%$$

Обчислимо ваговий вміст заліза в другій механічній суміші Al-5at.% Fe-13at.% Sn:

$$C_{Sn} = \frac{118.710 \cdot 13}{118.710 \cdot 0.13 + 55.847 \cdot 0.05 + 26.982 \cdot 0.82} \cdot 100\% = 38\text{мас}\%$$

Таким чином, були отримані вагові значення компонентів в двох досліджуваних композитах: Al-8% Fe-21Sn і Al-7% Fe-38% Sn (далі - Al-8Fe-21Sn Al-7Fe-38Sn, відповідно). Знаючи ваговий вміст компонентів в суміші можна розрахувати теоретичну її щільність наступним чином:

$$\rho_{\text{теор}} = \frac{100}{C_{Al}/\rho_{Al} + C_{Fe}/\rho_{Fe} + C_{Sn}/\rho_{Sn}}$$

де C_{Al} , C_{Fe} , C_{Sn} – ваговий вміст компонентів;

ρ_{Al} – щільність алюмінію, що дорівнює 2,699 г / см³;

ρ_{Fe} – щільність заліза, що дорівнює 7,874 г/см³;

ρ_{Sn} - щільність олова, рівна 7,290 г/см³.

Розрахуємо теоретичну щільність першої суміші складу, якої Al-8Fe-21Sn:

$$\rho_{\text{теор}} = \frac{100}{71/2.699 + 8/7.847 + 21/7.290} = \frac{100}{26.31 + 1.02 + 2.88} = 3.31 \text{ г/см}^3$$

Розрахуємо теоретичну щільність другий суміші складу, якої Al-7Fe-38Sn:

$$\rho_{\text{теор}} = \frac{100}{55/2,699 + 7/7,847 + 38/7,290} = \frac{100}{20,38 + 0,89 + 5,21} = 3,78 \text{ г/см}^3$$

Однорідні механічні суміші порошків можуть бути отримані шляхом змішування протягом 5 годин в змішувачі типу «кульовий млин». Після чого отримані суміші повинні піддаватися холодному двосторонньому пресуванню в сталевий циліндричної прес-формі на прес машині МС-500 (рисунок 4). Необхідний тиск, що подається на зразки, має становити 8-10 тонн. Бічні стінки прес-форми попередньо покриваються тонким шаром суміші мазуту з графітом для запобігання задирів.



Рисунок 4 - Прес машина МС-500

В результаті холодного двостороннього пресування порошків формуються брикети діаметром 15 мм і висотою близько 5 мм. Схема пресування представлена на рисунку 5.

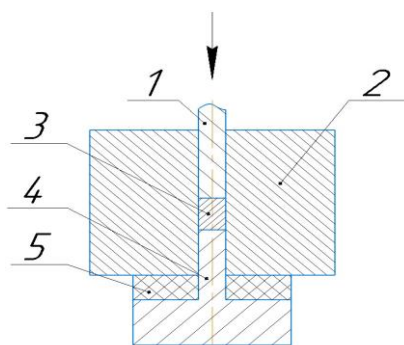


Рисунок 5 - Схема пресування: 1 - верхній пуансон; 2 - порожнистий циліндр; 3 - зразок; 4 - нижній пуансон; 5 - гума

Знаючи розміри зразків і теоретичну щільність, обчислимо їх масу за формулою:

$$m = \rho_{\text{теор}} \cdot V$$

де $\rho_{\text{теор}}$ – щільність зразка; V – об'єм зразка.

$$V = \pi R^2 \cdot h$$

де R - радіус зразків, рівний 10 мм; h - висота зразків, рівна 7 мм.

тоді,

$$m = \rho_{\text{теор}} \cdot \pi R^2 \cdot h$$

Маса зразків з пористістю 10%, отриманих з порошкової суміші Al-8Fe-21Sn:

$$m = 3.31 \cdot \pi \cdot 1^2 \cdot 0.7 \cdot 0.9 = 6,55 \text{ г}$$

Маса зразків с пористістю 10%, отриманих з порошкової суміші Al-7Fe-38Sn:

$$m = 3.78 \cdot \pi \cdot 1^2 \cdot 0.7 \cdot 0.9 = 7.48 \text{ г}$$

Спінання КМ можливо за допомогою електропечі СНВЕ-1.3.1 / 16 (рисунок 6).



Рисунок 6 - Електропеч СНВЕ

Для спікання брикету необхідно тиску газів не вище 10^{-2} Па з попередньою витримкою при температурі 530 °С протягом 1 години для того, щоб дати олову рівномірно розтектися за обсягом композиту без значного його випотівання. Подальший нагрів зразків до температур 570-590 °С, протягом яких вони також витримувалися протягом години. Після закінчення спікання частина зразків піддавалася подальшому доущільненню у вихідній прес-формі при температурі 250 °С.

Таблиця 5 - Вплив режиму спікання і подальшого гарячого доущільнення на механічні властивості при випробуванні на стиснення композитів Al-Fe-Sn

Композит	Режим отримання	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_2 , МПа	σ_B , МПа	δ , %
Al-7Fe-38Sn	(570 °С; 1 год)	61	76	81	9,4
	(570 °С; 1 год) + ГД 250 °С	101	123	126	18
	(595 °С; 1 год) + ГД 250 °С	100	123	128	18,5
	(620 °С; 1 год)	61	81	98	> 30
	(620 °С; 1 год) + ГД 250 °С	93	113	123	> 30
Al-8Fe-21Sn	(620 °С; 1 год) + ГД 250 °С	97	119	129	> 30
Al-40Sn	(600 °С; 1 год) + ГД 250 °С	58	71	85	> 30
Al-20Sn	(600 °С; 1 год) + ГД 250 °С	66	80	102	> 30

Характеристики зразків при випробуванні на стиснення показали, що структурні зміни, викликані легуванням сплавів Al-Sn залізом (5 ат%), позитивно позначилися на механічні властивості спечених композитів, і міцність їх в результаті легування зростає до 1,5 рази (табл. 5) . При цьому міцність

композитів Al-7Fe-21Sn і Al-7Fe-38Sn відрізняється всього на 4-5%, не дивлячись на значну відмінність кількості в них м'якою олов'яної фази.

Обумовлено це тим, що атомна концентрація заліза в сумішах була однакова. У процесі спікання залізо може розчинити в собі тільки обмежена кількість атомів олова, тому вміст заліза в спечених зразках також виявляється приблизно однаковим. Олово, яке не прореагувало, залишається у вільному вигляді і розподіляється по брикету, який спікається. Відмінність меж плинності олова і алюмінію невелике $\sigma_{0,2}(\text{Sn}) = 3,8$ і $\sigma_{0,2}(\text{Al}) = 4,5$ МПа, тому відмінність у їх концентрації мало позначається на міцності композиту Al-Sn. В результаті міцності композитів з різним вмістом олова виявляються близькими.

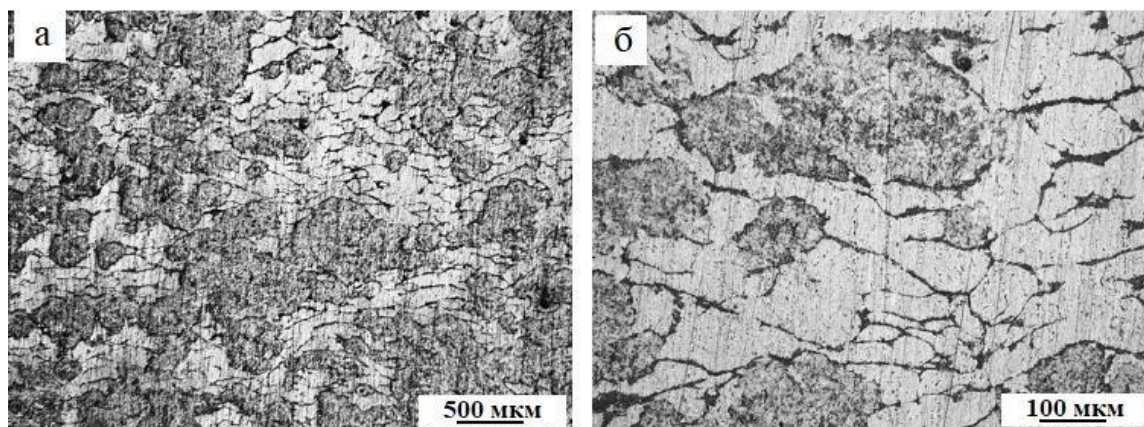


Рисунок 7 - Структура спеченого композиту Al-7Fe-38Sn після подальшого гарячого дозміцнення (250 °C) при різних збільшеннях. Режим спікання: 570 °C; 1год

Основна користь від гарячого доуцілювання спечених брикетів полягає в підвищенні пластичності матеріалу за рахунок усунення пір і поліпшення міжфазних адгезійних зв'язків. Це автоматично призводить до підвищення пластичності спечених зразків, що наочно можна побачити на рисунку 8, де представлені криві стиснення спечених і підданих подальшій допресовці композитів. З рисунка також видно, що криві стиснення спечених при 570 °C і при 620 °C зразків розташовуються приблизно на тій же висоті. Однак пластичність зразків тим краще, чим вище температура їх спікання. Це

призводить до того, що при осіданні зразків на 510% напруга спечених при низькій температурі зразків починає знижуватися через утворення в них тріщин.

Таку поведінку матеріалу можна було б пояснити наявністю більшої кількості часу в менш щільному матеріалі, але з рисунка 8 видно, що поведінка зразків при стисканні залишається таким же і у композитів. Тобто, пластичність спечених гібридних композитів Al-Fe-Sn при стисненні залежить в першу чергу не від пористості матеріалу, а від особливостей його структури, яка формується при спіканні. Зі збільшенням температури спікання до 620 °C алюмінієвий каркас стає більш міцним, що перешкоджає локалізації деформації і призводить до помітного зростання пластичності композитів Al-Fe-Sn.

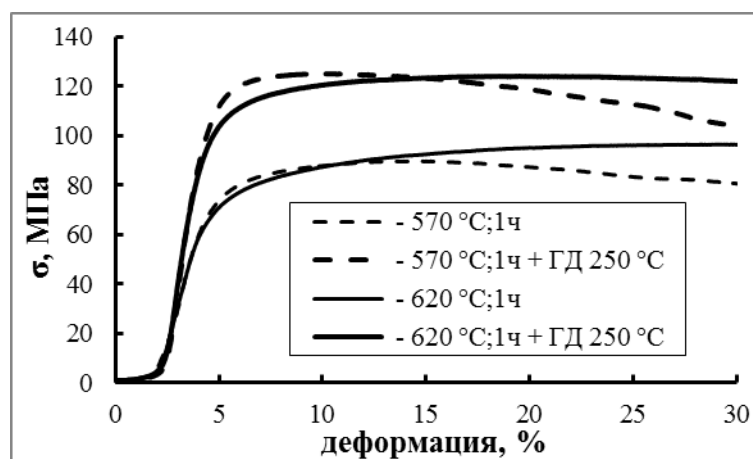


Рисунок 8 - Криві стиснення спечених і підданих подальшого гарячого доуцільнення композитів Al-7Fe-38Sn

4. Обґрунтування застосовності композитного матеріалу у вкладишах колінчастого вала двигуна внутрішнього згоряння

Колінчастий вал знаходиться під впливом зовнішніх сил и моментів від сил тиску газів и сил інерції, що є періодичною функцією кута повороту кривошипа.

Зміна поперечних перерізів окремих елементів кривошипа, а також характер розподілу діючих сил, призводять до нерівномірного розподілу напружень по довжині вала та його перетину. Нерівномірність навантаження посилюється

концентрацією напружень в галтелях щік і у країв масляних отворів шийок вала. У зв'язку з цим напруження можуть перевищувати номінальні.

Для проведення аналізу напружено-деформованого стану колінчастого вала на підставі його тривимірної моделі було сформована скінчено-елементна модель, показана на рисунку 9.

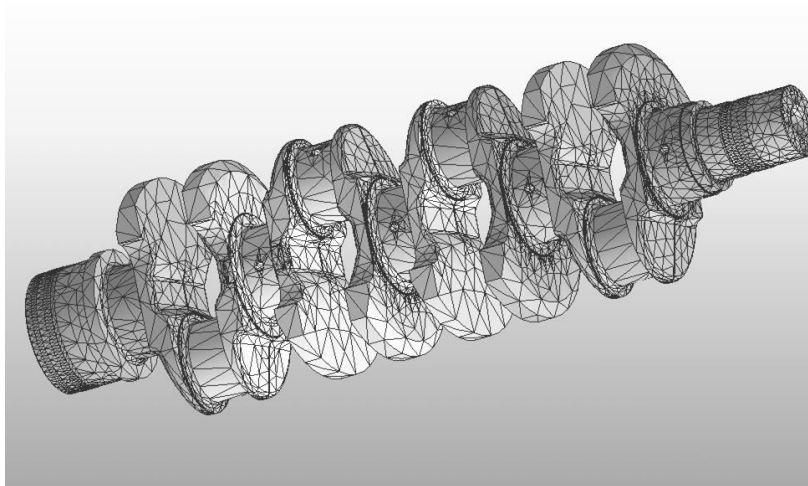


Рисунок 9 – Скінчено-елементна модель колінчастого вала

Матеріалом для колінчастого вала було прийнято сталь 40ХГНМ.

Таблиця навантажень шатунних шийок колінчастого вала при робочому ході поршня №4.

Таблиця 6 – Розрахункові навантаження на шийку колінчастого вала

номер шатунної шийки	Величина навантаження на шатунну шийку, Н	
	Проекція на вісь x	Проекція на вісь y
1	-781,303	16523,3
2	506,432	-10710,2
3	594,773	-12578,5
4	5934,22	-125499

В результаті моделювання методом скінчених елементів було отримано напруження, які виникають в колінчастому валі під дією прикладених навантажень. На рисунках 10 - 11 показані ізолінії пружного переміщення та еквівалентних напруг в колінчастому валі, що виникають під дією навантаження, що прикладені до шийок колінчастого валу.

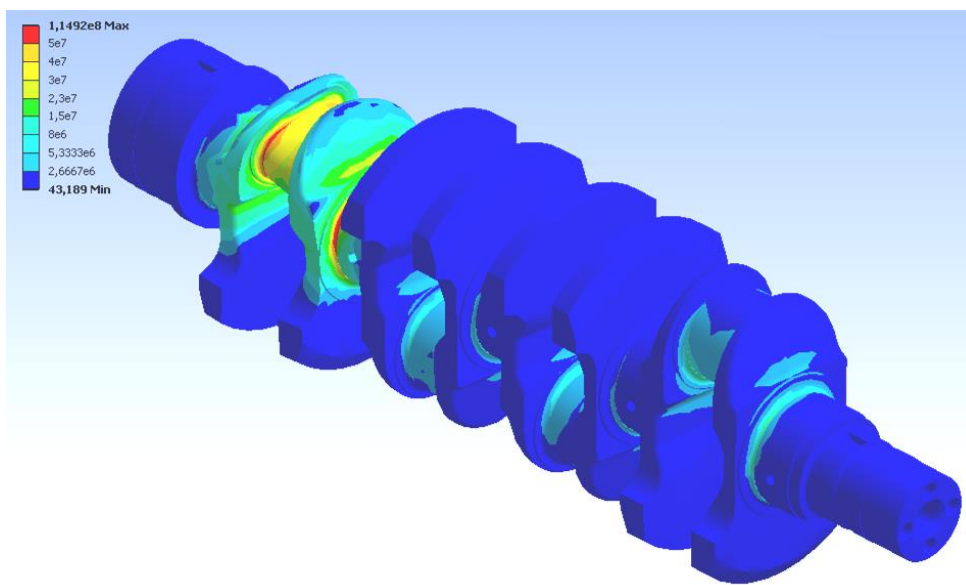


Рисунок 10 - Ізолінії переміщень при поєднанні навантажень, займання робочої суміші в циліндрі (1-й випадок навантаження)

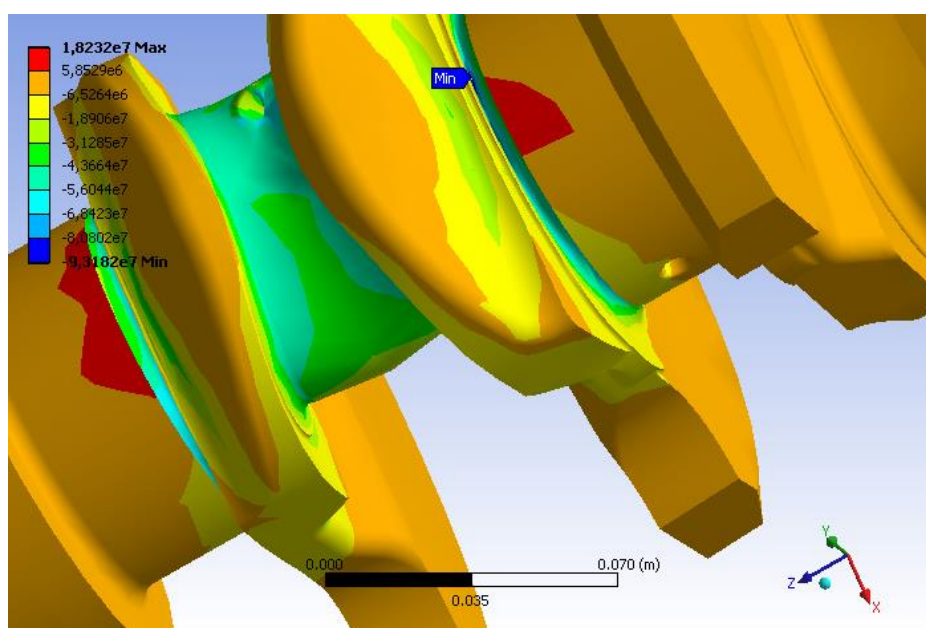


Рисунок 11 - Головні стискаючі напруги в колінчастому валі при запаленні робочої суміші в циліндрі (вип. 1)

Результати моделювання напружено-деформованого стану колінчастого вала дозволили крім інших (таблиця) з'ясувати величину головних стискаючих напружень.

Таблиця 7 – Результати моделювання напружено-деформованого стану

Максимальні переміщення (мм)	Напруги			
	макс. еквівалентні (МПа)	макс. головні розтягуючі (МПа)	головні стискаючі (МПа)	макс. дотичні (МПа)
1,7658E-2	114,92	95,139	93,182	66,313

На підставі аналізу можемо зробити висновок, що сплав Al-7Fe-38Sn дозволяє забезпечити запас міцності на стиск при його використанні в якості матеріалу вкладишів колінчастого вала.

З ростом температури крім підвищення показників міцності підвищується опір композитів зношуванню в відсутності мастила. Це пояснюється збільшенням пов'язаності алюмінієвого каркаса з підвищенням температури спікання, а також зниженням залишкової пористості матеріалу. Наприклад, якщо у зразків складу Al-7Fe-38Sn порівняти величину температури спікання при 570 і 620 °С, то можна помітити, що зазначена величина тим нижче, чим вище температура спікання композитів. Особливо помітна зазначена різниця при підвищених навантаженнях.

На рисунку 12 наведені зображення поверхонь тертя, спеченого при 570°C, а також підданого подальшому доущільненню композиту Al-7Fe-38Sn. Видно, що спечений зразок мав нижчу зносостійкість при високому тиску (5 МПа) через те, що його краї сильно руйнувалися в процесі тертя. Площа тертя при цьому скорочувалася, а фактичний тиск на його поверхні зростав. Тоді як доущільнений матеріал був уже не настільки крихким і демонстрував більш високу зносостійкість.

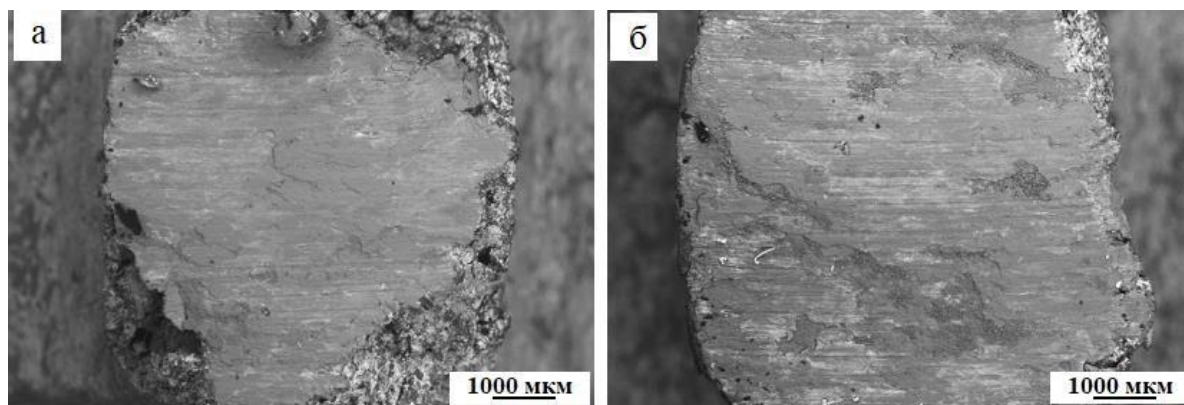


Рисунок 12 - Зображення поверхні тертя, спеченого (570 °C; 1 г) (а) і підданого подальшому гарячому доущільненню (б) композит Al-7Fe-38Sn після сухого тертя по сталі. Швидкість ковзання - 0,6 м/с; тиск на поверхню тертя – 5 МПа.

Аналіз дослідження антифрикційних алюмінієвих сплавів, що містять залізо показав, що в якості основного сплаву був обраний алюмінієвий сплав Al-6% Sn-5% Si-4% Cu (мас.%), в який вводили залізо (близько 1%), а також вісмут, свинець і марганець. Експериментальні зразки піддавалися нагріванню при температурі до 500 ° C з наступним охолодженням в різних режимах. Показано, що незалежно від режиму охолодження, відбувається сфероїдизація легкоплавкої фази (Sn-Pb-Bi) і кремнієвої фази (Al-Si). У разі швидкого охолодження (при загартуванні у воді) виявлена найкраща ефективність. Встановлено, що додавання заліза з марганцем (0,5%) призводить до формування сприятливих фаз Al₁₅(Fe, Mn) 3Si₂ скелетообразної форми. Проведені трибологічні випробування показали, що алюмінієвий залізовмісний сплав має підвищену твердість і зносостійкість, що може бути пов'язано з формуванням таких скелетообразних фаз. Результати даного дослідження показували можливість і перспективність застосування матеріалів, що містять залізо, для виробництва антифрикційних алюмінієвих сплавів.

Як було вже сказано в попередньому розділі в якості альтернативної заміни твердим частинкам в алюмінієвих сплавах можуть виступати, наприклад, інтерметаліди, і перш за все містять алюміній, оскільки його наявність у складі з'єднань забезпечує їх хорошу адгезію з алюмінієвою матрицею і міцні міжфазні границі. Зазначеним умовам можуть задовольняють композити системи Al-Fe-Sn, при синтезі яких можуть утворюватися тугоплавкі і тверді інтерметаліди типу FeAl_3 , а також сполуки заліза з оловом.

Висновок

За результатами аналізу технології виготовлення та моделювання напружено-деформованого стану шийок колінчастого валу встановлено граничні навантаження, які сприймаються вкладишами із композитного антифрикційного матеріалу.

Застосування Al-7Fe-38Sn спеченого композиту у якості матеріалу виготовлення вкладишів колінчастого валу може забезпечити підвищення антифрикційні властивості та, відповідно, ресурс двигуна. Зменшення тертя є шляхом підвищення екологічності роботи двигунів внутрішнього згорання, покращення паливної економічності та збільшення ефективної потужності.

Список літератури

1. Свирская, С.Н. Строение и классификация полимеров: метод. Пособие // С.Н. Свирская, И.Л. Трубников. – Ростов: Издво. Южного федерального университета, 2007. – 22 с.
2. Энциклопедия полимеров. В 3 т. – М. : БСЭ, 1977. – Т. 1 – 3.
3. С.С. Затуловский Концепция развития литых композиционных материалов / Процессы литья, 1997.– №4. – С. 9 – 10
4. Cioffi F., Ibáñez J., Fernández R., González-Doncel G. The effect of lateral off-set on the tensile strength and fracture of dissimilar friction stir welds, 2024Al alloy and 17% SiC / 2124 Al composite // Materials & Design. 2015. V. 65. Pp. 438–446.

5. Matthews F., Rawlings R. Composite Materials: Engineering and Science. Second edition. // Chapman & Hall, Oxford. 1995. Pp. 79.
6. Karayannis V., Moutsatsou A. Fabrication of MMCs from metal and alloy powders produced from scrap // Journal of Materials Processing Technology. 2006. V. 171. Pp. 295–300.
7. Bae J., Jung K., Yoo S., Chang S., Kim M., Lim T. Design and fabrication of a metalcomposite hybrid wheel with a friction damping layer for enhancement of ride comfort // Composite Structures. 2015. V. 133. Pp. 576-584.
8. Sarada B.N., Srinivasa M.P.L., Ugrasen G. Hardness and Wear Characteristics of Hybrid Aluminium Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting Technique // Materials Today: Proceedings. 2015. V. 2. Pp. 2878–2885.
9. Hu Q., Zhao H., Ge J. Microstructure and mechanical properties of (B₄C+Al₃Ti) / Al hybrid composites fabricated by a two-step stir casting process. // Mater. Sci. Eng. A. 2016. V. 650. Pp. 478-482.
10. Lai J., Zhang Z., Chen X.-G. Precipitation strengthening of Al–B₄C metal matrix composites alloyed with Sc and Zr // Journal of Alloys and Compounds. 2016. V. 552. Pp. 227-235.
11. Jiang J., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of the semisolid slurries and rheoformed component of nano-sized SiC / 7075 aluminum matrix composite prepared by ultrasonic-assisted semisolid stirring // Mater. Sci. Eng. A. 2015. V. 639. Pp. 350-358.