



УКРАЇНА

(19) UA (11) 96812 (13) C2

(51) МПК (2011.01)  
C22C 21/02 (2006.01)  
C22C 21/08 (2006.01)  
C22C 1/03 (2006.01)  
B22D 21/00  
C22F 1/05 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) ЛИВАРНИЙ СПЛАВ АЛЮМІНІЮ, ЩО МІСТИТЬ МАГНІЙ ТА КРЕМНІЙ

1

2

(21) а201000589

(22) 21.01.2010

(24) 12.12.2011

(46) 12.12.2011, Бюл.№ 23, 2011 р.

(72) МІЛЬМАН ЮЛІЙ ВІКТОРОВИЧ, БАРАБАШ  
ОЛЕГ МАРКОВИЧ, ЛЕГКА ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА,  
КОРЖОВА НАТАЛІЯ ПЕТРІВНА, ГРИНКЕВИЧ  
КОСТЯНТИН ЕДУАРДОВИЧ, ПОДРЕЗОВ ЮРІЙ  
МИКОЛАЙОВИЧ

(73) МІЛЬМАН ЮЛІЙ ВІКТОРОВИЧ, БАРАБАШ  
ОЛЕГ МАРКОВИЧ, ЛЕГКА ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА,  
КОРЖОВА НАТАЛІЯ ПЕТРІВНА, ГРИНКЕВИЧ  
КОСТЯНТИН ЕДУАРДОВИЧ, ПОДРЕЗОВ ЮРІЙ  
МИКОЛАЙОВИЧ

(56) UA 88857 C2, 25.11.2009

WO 9835068 A1, 13.08.1998

US 6004506 A, 21.12.1999

JP 2002206133 A, 26.07.2002

RU 2237097 C1, 27.09.2004

DE 202006006518 U1, 19.10.2006

WO 2009010264 A2, 22.01.2009

(57) 1. Ливарний сплав алюмінію, що містить магній та кремній, до складу якого входять, мас. %:

магній	4,0-16,0
кремній	2,0-9,0
марганець	0,05-1,5
скандій	0,01-0,6
цирконій	0,05-0,5

принаймні один або декілька елементів, вибраних з групи, що включає:

хром	0,05-0,5
мідь	0,1-2,0
нікель	0,05-1,0
гафній	0,01-0,6

та один або декілька елементів, вибраних з групи, що включає:

титан	0,05-0,6
бор	0,005-0,05
ітрій	0,01-0,85
германій	0,001-0,2
при 0,001%< (титан+бор+ітрій+германій)	<1,5%
алюміній	решта.

2. Сплав за п.1, що містить від 5,0 до 13,0 мас. % магнію та від 2,1 до 7,0 мас. % кремнію, переважно в межах від 6,0 до 12,0 мас. % магнію та від 2,2 до 6,0 мас. % кремнію.

3. Сплав за пп.1 або 2, що містить марганець від 0,08 до 1,2 мас. %, переважно в межах від 0,1 до 1,0 мас. %.

4. Сплав за будь-яким з пп.1-3, що містить скандій від 0,05 до 0,5 мас. %, переважно в межах від 0,1 до 0,4 мас. %.

5. Сплав за будь-яким з пп.1-4, що містить цирконій від 0,06 до 0,3 мас. %, переважно в межах від 0,08 до 0,2 мас. %.

6. Сплав за будь-яким з пп.1-5, що містить принаймні один або декілька елементів, вибраних з групи, що включає хром, мідь, нікель та гафній: хром від 0,05 до 0,2 мас. %, мідь від 0,3 до 1,0 мас. %, нікель від 0,1 до 0,4 мас. %, гафній від 0,3 до 0,6 мас. % та один або декілька елементів, вибраних з групи, що включає титан+бор+ітрій+германій при 0,001%< (титан+бор+ітрій+германій) <1,5%.

7. Сплав за будь-яким з пп.1-6, який в литому стані є переважно двофазним, містить первинні кристали  $Mg_2Si$  та/або первинні дендрити  $\alpha-Al$  і евтектику ( $\alpha-Al+Mg_2Si$ ), яку сформовано за механізмом парного росту в широкому інтервалі швидкостей кристалізації.

8. Спосіб одержання сплаву алюмінію, що містить магній та кремній, у відповідності із заявленим в будь-якому з пп.1-7 включає наступні етапи:

а) нагрів компонентів шихти сплаву до температури утворення розплаву при послідовності завантаження компонентів шихти, яка запобігає утворенню грубих кристалів інтерметалідних фаз;

б) використання флюсів або захисного середовища для запобігання окислення компонентів;

в) рафінування розплаву від неметалевих включень та газів;

г) охолодження розплаву зі швидкістю, достатньою для того, щоб легуючі елементи не виділялися з твердого розчину в процесі охолодження у вигляді грубих кристалів та забезпечили

(13) C2

(11) 96812

(19) UA

формування дисперсних частинок зміцнюючої  $L_{12}$  фази при наступній термічній обробці.

9. Спосіб термічної обробки сплаву за будь-яким з пп.1-7, виготовленого за п.8, при якому сплав відпалюють на повітрі в інтервалі температур 200-400 °C протягом 2-50 годин, переважно в інтервалі 250-350 °C протягом 2-10 годин, для формування дисперсних когерентних матриці твердого розчину  $\alpha$ -Al наночастинок фази зі структурою  $L_{12}$ , хімічна

природа яких відрізняється від хімічного складу фаз, що утворюють евтектику ( $\alpha$ -Al+Mg<sub>2</sub>Si).

10. Застосування сплаву алюмінію, що містить магній та кремній, заявленого в будь-якому з пп.1-7, виготовленого способом за п.8 та термічно обробленого за п.9, як сплаву з високими ливарними властивостями в поєднанні з підвищеними механічними і триботехнічними властивостями в температурному інтервалі 250-410 °C для виготовлення термічно навантажених литих деталей автомобільного двигуна зі змінними перерізами.

Винахід належить до кольорової металургії, зокрема до ливарних сплавів алюмінію, і може бути використаний при виготовленні деталей, які працюють при підвищених температурах.

В даний час в промисловості найбільше поширення отримали сплави алюмінію на основі евтектики бінарної системи Al-Si, додатково леговані Mg, Cu, Zn, Fe, Ni, Mn, Ti та іншими елементами. Вдосконалення цих сплавів продовжується по різних напрямках: вдосконалюються їх хімічний та фазовий склади; модернізуються існуючі та з'являються принципово нові технології лиття; вводяться спеціальні добавки для рафінування розплаву, модифікування структури та інш. Суттєвим недоліком сучасних ливарних сплавів алюмінію є зниження їх температури плавлення при збільшенні числа і кількості легуючих елементів. Це обмежує їх використання в сучасних двигунах внутрішнього згорання, які працюють при високих температурах.

У залежності від концентрації кремнію складнолеговані сплави на основі системи Al-Si можна розділити на 3 групи: доевтектичні з вмістом кремнію <12 мас. % (356.0, 360.0, AK7, AK9), евтектичні з вмістом кремнію 12-13 мас. % (AK12, AK12M2MnH, Mahle 124) та заевтектичні з вмістом кремнію 14-26 мас. % (390.0, Mahle 138, Mahle 244).

Значна кількість первинних кристалів кремнію в цих сплавах призводить до погіршення їх пластичних та технологічних характеристик, необхідності застосування дорогих технологій лиття.

Наприклад, відомий ливарний сплав на основі алюмінію (Україна, патент №22435A, C22C21/00, 1995), що містить, мас. %:

кремній	14,0-16,5
мідь	1,2-2,5
магній	0,8-1,5
марганець	0,5-1,3
титан	0,05-0,20
нікель	0,01-0,6
цинк	0,01-0,5
залізо	0,7-1,6
хром	0,01-0,2
цирконій	0,01-0,4
фосфор	0,03-0,1
алюміній	решта.

Недоліком відомого сплаву є нестабільність рівня механічних властивостей, яка обумовлена

наявністю первинних кристалів кремнію та легкоплавких потрійних евтектик за участі кремнію, а також забруднення домішками при виробництві сплаву та литті виливок з нього із-за наявності у складі сплаву фосфору.

Поширені в промисловості доевтектичні та евтектичні сплави мають хороші ливарні властивості, є більш простими в технологічному аспекті, легше обробляються. Проте температура застосування цих сплавів не перевищує 200-230 °C.

Відомо ливарний сплав на основі алюмінію (Патент РФ №2237096, C22C21/04, 2004), до складу якого входить, мас. %:

кремній	5,0-10,0
мідь	2,0-5,0
магній	0,3-0,7
титан	0,05-0,4
цирконій	0,01-0,3
стібій	0,2-0,4
скандій	0,05-0,6
неодим	0,1-0,3
кальцій	0,3-2,0
алюміній	решта.

Недоліком відомого сплаву є недостатня високотемпературна міцність та зносостійкість.

Існують і інші способи підвищення механічних властивостей матеріалів, призначених для високотемпературного використання. Наприклад, зміцнення матриці алюмінію евтектичних сплавів волокнами або вусами  $Al_2O_3$ , SiC, C та інш. (так звані Metal Matrix Composites-MMCs), або використання технології Ceramic Matrix Composites (CMC). Однак витрати для реалізації технологій MMCs та CMC є суттєво вищими, ніж при виготовленні сплавів методом лиття, внаслідок чого вони не знайшли широкого використання в промислових масштабах.

Можливе інше рішення цих, на перший погляд, нерозв'язних проблем. Воно реалізується при заміні базової подвійної системи Al-Si потрійною системою Al-Mg-Si, яка містить квазібінарну евтектику, що дозволяє створити нові ливарні алюмінієві сплави з поліпшеними властивостями. Така евтектика утворена  $\alpha$ -Al і більш тугоплавкою та термодинамічно стабільною порівняно з кремнієм інтерметалідною фазою Mg<sub>2</sub>Si. Це забезпечує підвищення температури плавлення сплавів, що розробляються, зберігає її на високому рівні при введенні легуючих елементів, а також приводить

до зменшення дифузійно залежних процесів при високих температурах експлуатації.

Наприклад, відомо ALMGSI ливарний сплав (Патент US 6,623,570 B2, C22C21/08; C22C21/00, 2003), що містить (мас. %):

магній	3,0-7,0
кремній	1,7-3,0
марганець	0,2-0,48
залізо	0,15-0,35
титан	бажано макс. 0,2
нікель	0,1-0,4
алюміній	решта.

Недоліком відомого сплаву є недостатній рівень високотемпературної міцності та зносостійкості.

Відомо AL/MG/SI ливарний сплав на основі алюмінію, що містить скандій (Патент WO 2005/047554 A1, C22C21/08, 21/02, 2005), до складу якого входять, мас. %:

магній	1,0-8,0
кремній	>1,0-4,0
скандій	<0,01-0,5
титан	0,005-0,2
елемент або декілька елементів з групи, яка включає: цирконій, гафній, молибден, тербій, ніобій, гадоліній, ербій і ванадій	0-0,5
марганець	0-0,88
хром	0-0,3
мідь	0-1,0
цинк	0-0,1
залізо	0-0,6
берилій	0-0,004
алюміній	решта.

Сплав містить максимум 0,01 % кожної домішки при сумарному вмісті домішок не більше 0,5 %.

Недостатній вміст перехідних металів та міді у відомому сплаві не забезпечує міцність та зносостійкість при підвищених температурах, а легування такими елементами як тербій, гадоліній, ербій значно здорожує сплав.

Найбільш близьким за технічною суттю до того, що заявляється, є ливарний сплав на основі алюмінію (Україна, патент №83776, C22C21/00; C22C21/06, 2007), до складу якого входять, мас. %:

магній	3,0-22,0
кремній	2,8-10,0
цирконій	0,05-1,0
мідь	0,5-2,5
марганець	0,05-1,0
нікель	0,05-1,5
кобальт	0,05-1,5
титан	0,05-1,0
залізо	0,05-1,0
бор	0,05-1,0
вуглець	0,05-0,5
хром	0,05-1,0
молибден	0,05-0,3
вольфрам	0,05-0,5
скандій	0,01-0,6
алюміній	решта.

Високий вміст легуючих тугоплавких елементів у відомому сплаві, необхідність значного перегріву

і тривалої витримки розплаву при температурах ~800 °C може призводити до зменшення вмісту магнію і скандію внаслідок їх випаровування та обумовленої цим нестабільності механічних властивостей.

Задачею даного винаходу є створення ливарного сплаву алюмінію для високотемпературного використання (при температурах вище 250 °C), що поєднує високі механічні та технологічні властивості.

Суть запропонованого винаходу полягає в застосуванні відомих компонентів у поєднанні з новими компонентами, що забезпечує високі механічні властивості сплаву при температурах вище 250 °C, а також високу зносостійкість і хороші ливарні характеристики, наприклад рідкоплинність.

Технічною задачею даного винаходу є вдосконалення складу ливарного сплаву на основі алюмінію шляхом зміни якісного та кількісного вмісту основних і легуючих елементів та додаткового легування германієм, гафнієм та ітрієм, що приводить до підвищення механічних характеристик при збереженні ливарних властивостей.

Технічна задача вирішується за рахунок того, що ливарний сплав алюмінію містить, мас. %:

магній	4,0-16,0
кремній	2,0-9,0
марганець	0,05-1,5
скандій	0,01-0,6
цирконій	0,05-0,5
принаймні один або декілька елементів, вибраних з групи, що включає:	
хром	0,05-0,5
мідь	0,1-2,0
нікель	0,05-1,0
гафній	0,01-0,6

та один або декілька елементів, вибраних з групи, що включає:

титан	0,05-0,6
бор	0,005-0,05
ітрій	0,01-0,85
германій	при 0,001 % < (ти-
тан+бор+ітрій+германій)	<1,5 %
алюміній	решта.

Суттєвими ознаками сплаву на основі алюмінію є наявність, мас. %:

магнію	4,0-16,0
кремнію	2,0-9,0
марганцю	0,05-1,5
скандію	0,01-0,6
цирконію	0,05-0,5.

Відмітною суттєвою ознакою є наявність у сплаві принаймні одного або декількох елементів, вибраних з групи, що включає, мас. %:

хром	0,05-0,5
мідь	0,1-2,0
нікель	0,05-1,0
гафній	0,01-0,6

та одного або декількох елементів, вибраних з групи, що включає (мас. %):

титан	0,05-0,6
бор	0,005-0,05
ітрій	0,01-0,85
германій	0,001-0,2

при  
 $0,001 \% < (\text{титан} + \text{бор} + \text{ітрій} + \text{германій}) < 1,5 \%$ .

Необхідність вмісту в сплаві компонентів у вищезазначених межах обумовлена наступним.

Магній сумісно з кремнієм формує в сплаві алюмінію евтектичну структуру, що забезпечує підвищену високотемпературну міцність, зносостійкість та високу рідкоплинність. Концентраційні значення верхньої і нижньої меж введення цих елементів обумовлені особливостями фазових рівноваг в потрійній системі Al-Mg-Si. В сукупності з іншими компонентами ці елементи визначають область існування складнолегованих подвійних евтектичних сплавів за участі  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Сплав характеризується наявністю тонко диференційованої структури, утвореної армуючою фазою ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ), яка розміщується в металічній матриці ( $\alpha\text{-Al}$ ) у вигляді волокон або пластин. Вміст магнію та кремнію в сплаві у вказаних межах забезпечує необхідний рівень властивостей. При вмісті магнію і кремнію в сплаві менше, відповідно, 4,0 мас. % та 2,0 мас. %, об'ємна частка евтектики за участі  $\text{Mg}_2\text{Si}$  є недостатньою для отримання високих механічних, триботехнічних та ливарних характеристик. При вмісті магнію і кремнію в сплаві, відповідно, більше 16,0 мас. % і 9,0 мас. % утворюється значна кількість крупних первинних кристалів  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , зменшується об'ємна частка евтектичної складової, що призводить до суттєвого окрихчування сплаву та погіршення його ливарних властивостей.

Марганець, маючи порівняно малу швидкість дифузії в алюмінії, позитивно впливає на міцність сплавів при високих температурах. Окрім того, він уповільнює швидкість дифузії міді в алюмінії, що також позитивно позначається на властивостях. При вмісті в сплаві марганцю менше 0,05 мас. % його вплив на високотемпературну міцність та зносостійкість сплаву є незначним, а при вмісті більше 1,5 мас. % в сплаві утворюються грубі складні інтерметаліди, які окрихчують сплав.

Однчасне введення Sc та Zr у вищезазначених межах сприяє покращенню міцності сплаву із-за формування нанорозмірних частинок фази зі структурою  $\text{L}_{12}$ . Ці частинки утворюються в результаті високотемпературної термічної обробки, вони є когерентними матриці евтектичного сплаву, не взаємодіють з евтектичними колоніями сплаву і сприяють підвищенню однорідності структури відливки, що в сукупності забезпечує стабільну роботу сплаву при високих температурах.

Позитивний вплив скандію на властивості сплаву виявляється також у збільшенні термічної стабільності структури, покращенні його зварюваності та зменшенні схильності до утворення гарячих тріщин. Для забезпечення необхідного рівня високотемпературної міцності вміст скандію повинен бути в межах 0,01-0,6 мас. %. При зниженні вмісту скандію в сплаві менше 0,01 мас. % об'ємна частка дисперсоїдів зміцнюючої фази за його участі є недостатньою для реалізації механізму дисперсійного зміцнення. При вмісті скандію в сплаві більше 0,6 мас. % утворюються крупні первинні кристали його алюмініду, що призводить до значного погіршення механічних властивостей сплаву.

Цирконій сумісно зі скандієм формує нанорозмірні частинки фази  $\text{Al}_3(\text{Sc}_{1-x}\text{Zr}_x)$ . Наявність цирконію приводить до зменшення схильності цих частинок до коагуляції, що забезпечує високу термічну стабільність структури та властивостей. При вмісті цирконію менше 0,05 мас. % його вплив на високотемпературну міцність та зносостійкість сплаву є незначним. При вмісті цирконію більше 1,0 мас. % в сплаві утворюються крупні кристали інтерметаліду  $\text{Al}_3\text{Zr}$ , що призводить до значного погіршення пластичних характеристик сплаву.

Введення в сплав принаймні одного або декількох елементів з групи, що включає хром, мідь, нікель, гафній у зазначених межах сприяє підвищенню міцності при температурах вище 250 °C. При зниженні вмісту хрому менше 0,05 мас. % його вплив на механічні властивості сплаву є незначним, а при вмісті хрому більше 0,5 мас. % на межах зерен утворюються легкоплавкі багатofазні евтектики, що призводить до зниження високотемпературної міцності сплаву.

Мідь та нікель, збільшуючи ступінь легуваності твердого розчину алюмінію, сприяють досягненню високої жароміцності сплаву при збереженні достатньої пластичності. Зміцнюючий ефект при введенні цих елементів досягається за рахунок легування твердого розчину на основі алюмінію, а також за рахунок появи в структурі метастабільних та стабільних фаз, які утворюються при частковому розпаді пересиченого твердого розчину при кристалізації або високотемпературному нагріванні. Ці елементи впливають на взаємну дифузійну рухливість атомів і підвищують високотемпературну міцність сплаву. Зміна концентраційних меж введення міді та нікелю в сплав обумовлена зміною концентраційно-температурних меж існування двофазної евтектичної рівноваги в багатокомпонентній системі при введенні додаткових елементів. При вмісті в сплаві міді менше 0,1 мас. % її позитивний вплив на високотемпературну міцність сплаву є незначним. Вміст міді в сплаві треба обмежити 2,0 мас. %, оскільки при її надлишку в сплаві утворюються багатofазні легкоплавкі евтектики та виділяються додаткові фази, що окрихчує сплав і зменшує його високотемпературну міцність.

При вмісті в сплаві нікелю менше 0,05 мас. % його вплив на високотемпературну міцність є незначним, а при вмісті більше 1,0 мас. % утворюються легкоплавкі евтектики, що погіршує високотемпературні властивості сплаву.

Гафній зменшує параметр розмірної невідповідності ґраток алюмінієвої матриці і  $\text{L}_{12}$  частинок, що сприяє підвищенню їх термічної стабільності. При вмісті гафнію менше 0,01 мас. % його вплив на високотемпературну міцність та зносостійкість сплаву є незначним. При вмісті гафнію більше 0,6 мас. % в сплаві утворюються крупні кристали інтерметалідів, що значно погіршує пластичність сплаву.

Введення одного або декількох елементів, вибраних з групи, що включає титан, бор, ітрій та германій при, мас. %,  $0,001 \% < (\text{титан} + \text{бор} + \text{ітрій} + \text{германій}) < 1,5 \%$  сприяє модифікуванню структури, підвищенню однорідно-

сті розподілення зміцнюючих фаз та обумовлено-му цим оптимальному співвідношенню характеристик міцності та пластичності. При зменшенні нижньої межі концентрацій цих елементів їх модифікуюча дія відсутня. Перевищення верхньої межі введення цих елементів недоцільно, оскільки призводить до утворення грубих кристалів складних інтерметалідів, що значно погіршує пластичні і ливарні характеристики сплаву. Крім того, титан сумісно з бором приводять до підвищення зносостійкості.

Виплавку дослідних зливок проводили в електричній печі опору або індукційній печі в тиглях з  $Al_2O_3$  на повітрі з використанням захисних флюсів ( $LiCl$  та  $LiF$ ) у співвідношенні, відповідно, 3:1 або в захисному середовищі ( $Ar$ ). Зливки виготовляли з чистих шихтових матеріалів та лігатур, виготовлених в індукційній печі, в печі опору або іншими методами. Послідовність завантаження компонентів шихти повинна попереджувати утворення грубих кристалів інтерметалідних фаз. Перед введенням кожного з компонентів розплав перемішували та витримували до повного розчинення попередніх компонентів. Температури плавлення та розливу зливок були в межах, відповідно,  $(700-750)^\circ C$  та  $(680-720)^\circ C$ . Після розчинення всіх компонентів розплав ретельно перемішували, рафінували інертним газом або спеціальними препаратами, знімали шлак та розливали в ливарні форми.

Для забезпечення дисперсійного зміцнення нанорозмірними частинками з структурою  $L1_2$  проводили термічну обробку зливок в печі опору в інтервалі температур  $200-400^\circ C$  протягом 2-50 годин. Після такої термічної обробки виготовляли зразки для визначення механічних властивостей на розтяг та проведення триботехнічних випробувань.

На кресленні показано зносостійкість сплаву алюмінію, що містить магній та кремній, в порівнянні з промисловими сплавами 356.0 і 390.0. Знос визначали при квазістаціонарному ( $I_s$ ) та динамічному ( $I_d$ ) режимах навантаження та при температурах  $180^\circ C$  та  $300^\circ C$ .

Приклади.

Приклад 1.

Для ілюстрації рівня механічних властивостей при підвищених температурах було виплавлено сплав алюмінію, що містить магній та кремній (мас. %):

магній	5,5-7,5
кремній	2,0-3,5
марганець	0,1-0,8
скандій	0,15-0,3
цирконій	0,08-0,15
хром	0,05-0,2
титан	0,05-0,2
бор	0,01-0,04
ітрій	0,03-0,4
алюміній	решта.

Виплавку зливка вагою 200г проводили в електричних печах опору в тиглях з  $Al_2O_3$  на повітрі з використанням захисного флюсу. Після виплавки зливки піддавали термічній обробці в інтервалі температур  $250-340^\circ C$  протягом 2-10 годин. Механічні випробування на розтяг проводили на

установці типу "INSTRON". Зразок витримували без навантаження 0,5 години (час стабілізації) при температурі випробування з наступним навантаженням його до руйнування. Швидкість навантаження складала  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , діаметр робочої частини зразка - 3мм, довжина його робочої частини - 18 мм.

Сплав має наступні властивості при температурі  $300^\circ C$ :

Межа міцності ( $\sigma_B$ ), МПа	150-200
Межа плинності ( $\sigma_{0,2}$ ), МПа	130-155
Відносне подовження ( $\delta$ ), %	3,0-6,0.

Приклад 2 (мас. %):

магній	7,0-10,0
кремній	3,0-5,0
марганець	0,1-0,8
скандій	0,15-0,3
цирконій	0,08-0,15
хром	0,05-0,2
мідь	0,3-0,7
нікель	0,1-0,3
гафній	0,01-0,6
титан	0,05-0,2
бор	0,01-0,04
германій	0,01-0,05
алюміній	решта.

Сплав, який було виготовлено як в Прикладі 1, має наступні властивості при температурі  $400^\circ C$ :

Межа міцності ( $\sigma_B$ ), МПа	110-120
Межа плинності ( $\sigma_{0,2}$ ), МПа	105-111
Відносне подовження ( $\delta$ ), %	1,2-2,0.

Наведені властивості перевищують властивості сплавів патентів UA 83776 та US 6,399,020 B1.

Приклад 3.

Для ілюстрації рівня зносостійкості сплаву алюмінію, що містить магній та кремній, було виготовлено, як в Прикладі 1, сплав (мас. %):

магній	8,4-10,0
кремній	3,0-5,0
марганець	0,1-0,8
скандій	0,15-0,3
цирконій	0,08-0,15
хром	0,05-0,2
титан	0,05-0,2
бор	0,01-0,04.

Триботологічні випробування здійснювали за схемою контактування сфера-площина в умовах зворотно-поступального ковзання сферичного індентора по плоскому зразку при визначених температурах на оригінальній установці АТКД [Зенкин Н.А. Гринкевич К.Э. Контроль. Диагностика 6 (2002) 49]. Випробування проводили при постійному навантаженні (квазістаціонарний режим), а також з накладанням змінного навантаження (динамічний режим) [K.E. Grinkevych. Friction and Wear, Vol.24, № 3 (2003) 344].

Динамічну модульовану складову сили нормального тиску  $AP$  задавали у вигляді цугу коливань, що додається одночасно до статичної сили  $P_0$ ; величина динамічної складової навантаження складає 10 % від статичного навантаження та визначається за формулою:

$$\Delta P = \frac{A}{2} \left( 1 - \sin \frac{2\pi t}{T} \right),$$

де  $A$  - амплітуда навантаження,  $T$  - період,  $t$  - час.

Модульовану складову навантаження приклали так, щоб загальне навантаження було  $P=P_0+\Delta P$ .  $\Delta P$  змінюється від 0 до  $A$ .

При цьому на одній половині доріжки тертя як правило здійснюється квазістаціонарний силовий вплив, на другій - динамічний. Критерієм оцінки зношування є глибина доріжок тертя на ділянках, відповідно, квазістаціонарного та динамічного навантаження ( $I_s$ ,  $I_d$ ).

Умови випробування: температура 180 °C та 300 °C, навантаження  $P_0=22H$ ,  $AP_{max}=A=5H$ , частота 25Гц, час випробування 10 хвилин, контртіло - сферичний індентор  $R=8mm$  з  $Si_3N_4$ , мастильне середовище - силіконове мастило. Результати випробувань наведені на Фіг.

Приклад 4.

Для ілюстрації рідкоплинності сплаву алюмінію, що містить магній та кремній було

виготовлено, як в Прикладі 1, сплав (мас. %):

магній	7,0-10,0
кремній	3,0-5,0
марганець	0,1-0,8

скандій	0,15-0,3
цирконій	0,08-0,15
хром	0,05-0,2
титан	0,05-0,2
бор	0,01-0,04
алюміній	решта.

Рідкоплинність визначали за методикою, що передбачає використання комплексної U-подібної проби Нехендзі-Купцова. Порцію розплавленого металу масою 350 г заливали в пробу при температурах, що перевищує температуру ліквідусу на 40C.

Сплав, який було виготовлено як в Прикладі 1, та промисловий сплав 356.0 мають рідкоплинність, відповідно, 385мм та 283мм.

Наведені приклади показують, що запропонований у винаході ливарний сплав алюмінію, який містить магній та кремній, має високу міцність та зносостійкість при температурах вище 250 °C у поєднанні з високою рідкоплинністю та за сукупністю цих характеристик перевищує відомі ливарні сплави алюмінію. Сплав може бути виготовлений як в лабораторних, так і в промислових умовах.

