

УДК 669.018.95

С.Б. Ломов<sup>1</sup>

**НОВЫЕ ПОКОЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА,  
АРМИРОВАННОГО НЕПРЕРЫВНЫМИ  
И ДИСКРЕТНЫМИ ВОЛОКНАМИ  $Al_2O_3$  (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-3-3

*Представлен обзор научно-технической литературы в области технологий получения перспективных металлических композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, армированных непрерывными или дискретными волокнами оксида алюминия. Показаны основные технологические приемы получения данного класса материалов, их преимущества и недостатки. Представлены данные по физико-механическим характеристикам металлических композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, армированных волокнами оксида алюминия. Разработкой металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного волокнами оксида алюминия, занимаются во всех ведущих странах мира. Основную заинтересованность в таких разработках проявляют космические и военные ведомства. Выявлены тенденции развития технологических подходов изготовления металлических композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, армированных волокнами оксида алюминия.*

**Ключевые слова:** композиционный материал, алюминий, непрерывные и дискретные волокна  $Al_2O_3$ .

*The paper provides an overview of scientific and technical literature in the field of advanced technologies for the production of metal matrix composite based on aluminum alloys reinforced with continuous or discontinuous alumina fibers. The main processing methods of receiving this class of materials, their advantages and shortcomings are shown. The paper provides on physical-mechanical properties of metal composite materials on the basis of aluminum alloys reinforced by aluminum oxide fibers. All leading countries in the world are engaged in development of metal matrix composite based on aluminum alloy reinforced with continuous and discontinuous fibers of  $Al_2O_3$ . Space and military agencies demonstrate a particular interest in such developments. Tendencies of development of technological approaches to production of metal matrix composite based on the aluminum alloys reinforced by aluminum oxide fibers are revealed.*

**Keywords:** composite material, aluminum, continuous and discrete fibers  $Al_2O_3$ .

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Развитие современной техники невозможно без использования материалов, обладающих особыми физическими, химическими, механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами, а также без совершенствования технологических процессов их производства. Немалая роль в создании новых материалов с комплексом таких ценных свойств, как высокая прочность, коррозионная стойкость, электропроводность, износостойкость, принадлежит металлическим композиционным материалам [1–3].

В настоящее время за рубежом разработан ряд металлических композиционных материалов (МКМ) на алюминиевых матрицах, армированных оксидом алюминия. Для

повышения свойств МКМ и расширения области их использования разработчики продолжают вести исследования, создают различные технологии их получения и используют новые технологии обработки материалов.

Разработкой МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными и дискретными волокнами  $Al_2O_3$ , занимаются во всех ведущих странах мира – прежде всего в США и Японии, Великобритании, Германии, Китае, а также во Франции и Канаде. Основную заинтересованность в таких разработках проявляют космические и военные ведомства [4–7].

Проведенный обзор по технологиям получения МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными и дискретными волокнами оксида алюминия выполнен в рамках реализации комплексного научного направления 12.1. «Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Существует несколько основных подходов к получению алюминиевого МКМ, армированного непрерывными и дискретными волокнами  $Al_2O_3$ :

- укладка волокнистых заготовок из непрерывных и дискретных волокон оксида алюминия или муллита в форму, соединение заготовки со связующим и последующая инфильтрация жидким алюминиевым сплавом под давлением [8–15];

- срезание непрерывных волокон оксида алюминия с катушки и смачивание их дистиллированной водой с последующей укладкой в форму и вакуумной инфильтрацией жидким сплавом пористой заготовки под высоким давлением [16];

- приготовление армирующих заготовок из порошка или дискретных волокон оксида алюминия с последующей их формовкой со связующим и пропиткой под давлением с предварительным азотированием волокон [17];

- укладка чередующихся слоев металлического волокна (проволоки) между армирующими волокнами с последующей их ультразвуковой консолидацией [18–21].

Самыми распространенными способами изготовления подобных материалов являются инфильтрация расплавленной матрицы в волокнистую преформу, прессование фольги в виде матрицы и волокнистой заготовки и порошковая металлургия.

Большое число исследований по созданию МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными и дискретными волокнами  $Al_2O_3$ , принадлежит американской компании 3M Innovative Properties Company [9–14], которая предлагает способы изготовления МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными волокнами оксида алюминия, для сердечников высоковольтных воздушных линий электропередач, обладающих большей прочностью, стойкостью к высоким температурам и устойчивостью к провисанию по сравнению с существующими аналогами.

Одним из последних, предложенных данной фирмой способов получения МКМ для сердечников высоковольтных воздушных линий электропередач, является способ, обеспечивающий получение высоких механических характеристик [12]. Технология получения МКМ заключается в получении цилиндрического жгута, состоящего из волокон оксида алюминия марки NEXTEL610, который подвергается термической обработке в вакуумной печи при температуре  $1000^\circ C$ . Далее обработанные волокна погружают в ванну с расплавленным алюминием (99,94% Al) при температуре  $726^\circ C$  и проводят ультразвуковую пропитку. Далее происходит кристаллизация пропитанного жгута, которая может осуществляться как с использованием воздуха, так и азота. Схематично технологический процесс представлен на рис. 1, а.

Еще одна технология [9], предлагаемая фирмой 3M Innovative Properties Company, заключается в непрерывной пропитке жгутов из поликристаллического  $\alpha-Al_2O_3$  волокна (рис. 1, б). При погружении в расплавленный металл волоконный жгут

подвергается пропитке с помощью ультразвука, вырабатываемого ультразвуковым устройством, которое погружено в расплавленный металл (матрицу) в непосредственной близости от жгута. Ультразвуковое устройство содержит генератор и вибратор, имеющий преобразователь и ультразвуковой передатчик. Звуковой передатчик вибрирует в расплавленном матричном металле на частоте генератора. При этом металл матрицы тщательно пропитывает жгут волокна. После чего пропитанный жгут извлекают из расплавленной матрицы и наматывают на приемный барабан. Такой способ отличается отсутствием вакуумной камеры, в которой находится ванна с расплавленным алюминием. Следует отметить, что в изделии, полученном по данной технологии, присутствует большой процент непропитанных участков, что приводит к снижению механических характеристик и уменьшает процент выхода годного материала.

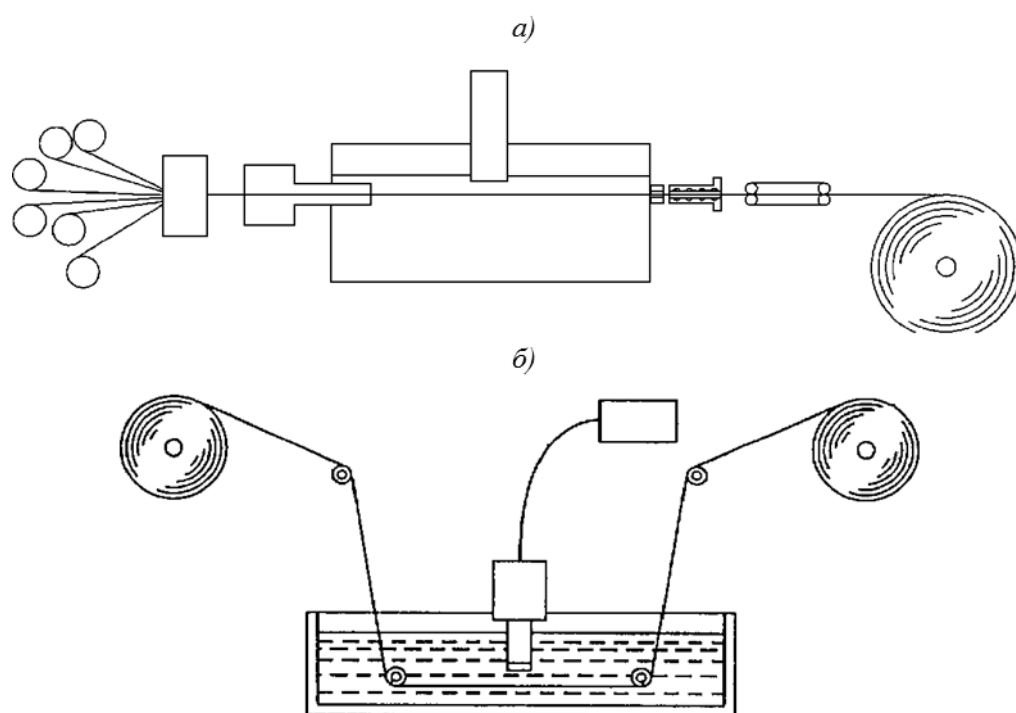


Рис. 1. Схемы технологического процесса получения МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными волокнами оксида алюминия, приведенные в работах [12] (а) и [9] (б)

Фирмой Canadian Space Agency разработана технология изготовления металлического композиционного материала методом литья под давлением *in situ* [15]. В качестве матричного сплава используется заэвтектический сплав Al-Si с содержанием кремния 30% (по массе). В качестве армирующего компонента использовали поликристаллические волокна 99%-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> диаметром 20 мкм фирмы «Дюпон», с модулем упругости 380 ГПа и пределом прочности 1700 МПа. Процесс изготовления материала включает следующие стадии: непрерывные волокна оксида алюминия срезали с катушки и смачивали дистиллированной водой для облегчения обработки и предотвращения обрыва волокна. Смоченные волокна помещали в форму так, чтобы они были ориентированы вдоль формы. Для закрепления волокон в форме использовали керамическую жидкость. Волокнистый композит Al-Si+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> изготавливали вакуумной инфльтрацией жидкого сплава с помощью пористой заготовки под высоким давлением. Заготовку и расплавленный заэвтектический алюминиевый сплав по отдельности нагревали до

температуры 950°C. Затем расплав выливали в форму и одновременно применяли вакуум и давление. Расплавленный металл проникал в заготовку под давлением 34 МПа. После этого образцы кристаллизовали. Свойства такого МКМ приведены в таблице.

**Свойства МКМ, полученного методом литья под давлением [15]**

Материал (содержание, % (объемн.))	Плотность $d$ , г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа, в направлении		$E/d$ , усл. ед., в направлении		Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B/d$ , усл. ед.
		продоль- ном	попереч- ном	продоль- ном	попереч- ном		
Сплав Al-30 Si+50 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	220	146	73	48	582	194
Сплав Al+50 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2	210	–	65	–	520	162
Сплав 6061 (Al)+50 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2	220	120	68	37	520	162
Сплав 6061 (Al)	2,7	70	–	25	–	295	109

*Продолжение*

Материал (содержание, % (объемн.))	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup> , в направлении		Демпфирующая способность
	продольном	поперечном	
Сплав Al-30 Si+50 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2	5,8	0,32
Сплав Al+50 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	0,30
Сплав 6061 (Al)+50 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	13	–
Сплав 6061 (Al)	25	25	0,06

Такой материал обладает высокой прочностью и жесткостью, низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), малой плотностью и высокой термостойкостью. Данный способ получения композита хорошо подходит для массового производства и является относительно простым и экономически эффективным, позволяющим изготавливать сложнопрофильные детали при минимальной механической обработке. Основное применение, по мнению разработчиков, такой материал может найти в автомобильной промышленности, а именно – в качестве поршней, гильз цилиндров, тормозных барабанов или блоков цилиндров.

Немецкой фирмой VAW Aluminium AG опубликованы сведения о способе изготовления волокнистой заготовки из длинных и дискретных волокон оксида алюминия применительно к алюминиевым отливкам [16]. В качестве армирующего материала могут быть использованы короткие и длинные волокна оксида алюминия или муллита, карбида кремния, углерода. Разработчики фирмы считают, что короткие волокна являются подходящими для изготовления армированных волокном отливок металла для применения их в сильно нагруженных деталях машин, таких как шатуны, поршневые головки, кольца или головки цилиндров для двигателей внутреннего сгорания, поскольку заготовки из короткого волокна обладают хорошей теплоемкостью, однородной пористостью для проникновения расплава матрицы. В случае преформ из длинных волокон они располагаются однонаправлено (параллельно), максимальная прочность материала определяется в направлении волокон. Передача напряжения от матрицы на волокна осуществляется за счет сил сдвига по границе раздела «волокно–матрица», поэтому свойства МКМ зависят от расположения волокон в матрице. Длинные волокна не должны быть в контакте друг с другом по всей их длине, а допускается только локальное соприкосновение, чтобы расплав матрицы мог проникнуть в волокнистую заготовку. Средняя длина коротких волокон – от 50 до 100 мкм, длинных волокон – от 1 до 5 мм. На волокна также наносят покрытие или частично покрывают слоем клея перед внедрением их в матрицу. Существенным преимуществом этого метода является регулировка объемного содержания при нанесении покрытия (которое может быть металлом матрицы).

Технология получения МКМ заключается в том, что форму заполняют слоем из суспензии коротких волокон, воды и связующей смеси. Затем укладывают длинные волокна вместе с соединительным волокном, и одновременно отводят воду из формы через отверстие. Для равномерного распределения длинного волокна применяют вибратор, который может быть присоединен к пресс-форме. Дополнительный слой из суспензии коротких волокон наносят на слой из длинных волокон. Это повторяется, пока форма не будет полностью заполнена.

Заготовка состоит из различных слоев волокон, прижатых пластиной, с одновременным удалением остаточной воды. Сушку механически обезвоженной волокнистой заготовки проводили при температуре  $\sim 110^{\circ}\text{C}$  в течение 12–24 ч. Необходимую прочность достигали за счет органического связующего, дополнительно влияющего на необработанную заготовку до конца операции обжига.

Спекание различных волокон для образования гомогенной пористой волокнистой заготовки осуществляют при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$ , и путем спекания между неорганическим связующим и волокнами достигалась технологическая прочность волокнистой заготовки. Содержание связующего составляет от 2 до 10% (по массе) относительно общего содержания волокна. Если количество связующего  $>10\%$  (по массе), то существует риск того, что однородная общая пористость будет недостижимой, так что инфильтрация расплава будет неравномерной, в частности – неполной. Само связующее состоит из органического компонента (например, крахмала) и неорганического компонента с  $\text{SiO}_2$  или на базе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Затем проводят инфильтрацию алюминиевым сплавом под давлением. Схема технологического процесса представлена на рис. 2.

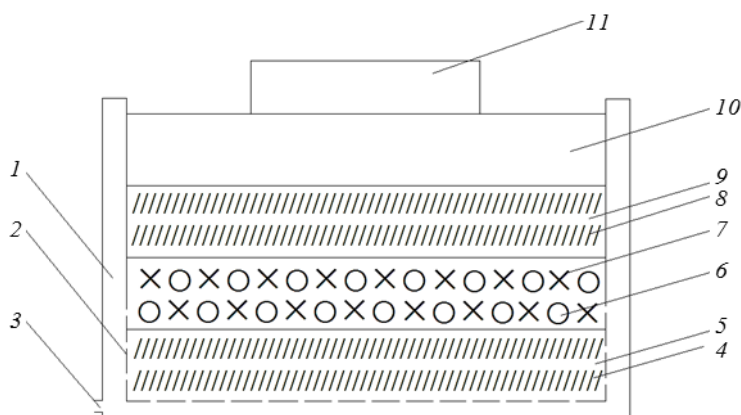


Рис. 2. Схема технологического процесса получения МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного дискретными и непрерывными волокнами оксида алюминия [16]:

1 – форма; 2 – отверстия в форме; 3 – отверстие для удаления остаточной воды; 4, 8 – короткие волокна; 5, 9 – суспензия; 6 – непрерывные волокна; 7 – соединительные волокна; 10 – прижимная пластина; 11 – вибратор

Металлический композиционный материал, полученный таким способом, характеризуется высокой плотностью в сочетании с низкой пористостью, а также очень хорошей термостойкостью, в частности в продольном направлении длинных волокон, и повышенной прочностью в поперечном направлении.

В работе [18] показана технология получения МКМ, где в качестве матрицы предлагается использовать сплавы алюминия, титана и др., в качестве армирующей фазы – волокна бора, карбида кремния, стекла, оксида алюминия и др. Авторы [18] утверждают, что при способе укладки «фольга–волокно–фольга» трудно достичь

равномерности распределения волокон в матрице. По их мнению, одним из путей решения этой проблемы является расположение металлических волокон между армирующими волокнами. Металлические волокна представляют собой металлическую матрицу с составом, одинаковым с составом фольги. Монолит получают путем ультразвуковой консолидации.

Китайские ученые из университета Jiangsu University опубликовали сведения по способу получения легкого высокопрочного металлического композиционного материала [19, 20]. Способ получения включает следующие стадии:

– для укрепления и измельчения зерна матрицу системы Al–Zn–Mg–Cu микролегируют элементами Er, Y и т. п.;

– при действии импульсного магнитного поля и импульсного тока с помощью реакции соединения *in situ* получают керамическое зерно субмикронной или нанометровой величины;

– изготовление композита литьем с формированием композита под действием электромагнитного поля;

– проведение гомогенизации сплава, экструдирование части заготовки, а затем проведение обработки и т. п. с получением легкого, высокопрочного МКМ.

Композиционный материал, полученный данным методом, – однороден, бездефектен, имеет хорошую дисперсность зерен, очищен от вредных примесей.

Опубликованы исследования китайских ученых в журнале Transactions of Nonferrous Metals Society of China [21], где описывается влияние количества меди на твердость композита за счет образования фаз  $\text{CuAl}_2$ . Данные сведения являются ценными, поскольку они описывают процессы, протекающие на границе раздела «волоконно–матрица» и непосредственно в самой матрице. В качестве матрицы выбраны сплавы системы Al–Cu с содержанием меди 1; 3; 5 и 7%. Матрица армирована дискретными волокнами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Изготовление композита осуществляли методом литья. Эксперимент заключался в следующем: композит системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al–Cu}$  подвергают старению и проводят измерение твердости образцов при различных температурах и времени старения. Результаты исследований показывают, что твердость материала системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al–Cu}$ , содержащего 7% Cu, намного превышает твердость материала с матрицей, содержащей 1–5% Cu, из-за большого количества  $\text{CuAl}_2$ , выпавшего в осадок в материале системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al–Cu}$ . С увеличением содержания меди с 1 до 7% время, необходимое для появления пикового значения твердости, сокращается, что указывает на то, что добавление Cu может ускорить кинетику выпадения фазы  $\text{CuAl}_2$  в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al–Cu}$ . Металлический композиционный материал  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al–Cu}$ , содержащий 7% Cu, показывает самый высокий прирост твердости при старении. Поэтому для того, чтобы получить более высокий пик твердости в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al–Cu}$ , нужно больше Cu, по сравнению с неармированным Al–Cu сплавом.

### Заключение

Разработкой МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными и дискретными волокнами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , занимаются во всех ведущих странах мира. В этой области также активно сотрудничают научные и образовательные центры. Основные технологические подходы получения такого композиционного материала заключаются в пропитке предварительно подготовленных волокнистых заготовок, которые могут представлять как непрерывные волокна, так и смесь дискретных волокон с непрерывными. Возможно также получение МКМ путем укладки чередующихся слоев металлического волокна (проволоки) между армирующими волокнами с последующей их ультразвуковой консолидацией.

Обзор литературы показал следующие тенденции развития технологий создания МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными и дискретными волокнами:

- повышение механических характеристик металлического композиционного материала благодаря применению пропитки с помощью ультразвука, использования специального связующего, микролегирования элементами Er, Y, термообработки;
- снижение пористости МКМ на основе алюминиевого сплава путем пропитки под давлением или с помощью ультразвука;
- снижение энергозатрат за счет пропитки без давления, сокращения механической обработки деталей.

По техническому уровню выявлены следующие характеристики:

- объемное содержание волокна в МКМ в основном составляет от 45 до 55%;
- в качестве матричного сплава используется целый ряд различных алюминиевых сплавов, материалы систем Al–Si, Al–Cu и др.;
- плотность получаемых МКМ – не более 3,2–3,3 г/см<sup>3</sup>;
- модуль упругости МКМ составляет 215–220 ГПа;
- предел прочности при изгибе у зарубежных МКМ в охранных документах в основном не указывается; предел прочности при растяжении у зарубежных МКМ составляет 1200 (материал фирмы 3M Innovative Properties Company) и 582 МПа (материал фирмы Canadian Space Agency).

Таким образом, армирование алюминиевой матрицы оксидом алюминия в виде непрерывных или дискретных волокон позволит получать материал с повышенными механическими и удельными характеристиками, определяемыми объемной долей наполнителя.

#### ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2011. №SP2. С. 13–19.
5. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 5–6.
6. Сорокин О.Ю., Гращенков Д.В., Солнцев С.Ст., Евдокимов С.А. Керамические композиционные материалы с высокой окислительной стойкостью для перспективных летательных аппаратов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8.
7. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 373–380.
8. Method of making fiber reinforced aluminum matrix composite: pat. 6460597 US; publ. 08.10.02. 13 p.
9. Metal matrix composite wires, cables, and method: pat. 6344270 US; publ. 05.02.02. 15 p.
10. Metal matrix composites, and methods for making the same: pat. 2006021729 US; publ. 02.02.06. 11 p.
11. Method of making metal matrix composites: pat. 6485796 US; publ. 26.11.02. 20 p.
12. Method for making metal clad metal matrix composite wire: pat. 7131308 US. publ. 07.11.06. 20 p.

13. Aluminum matrix composite wire: pat. 6913838 US; publ. 05.07.05. 22 p.
14. Fiber reinforced aluminum matrix composite with improved interfacial bonding: pat. 5435374 US; publ. 25.07.95. 8 p.
15. In-situ strengthened metal matrix composite: pat. 2219169 CA; publ. 25.04.98. 8 p.
16. Methods of fabricating nozzle plates 2006026328 WO; publ. 09.03.2006. 10 p.
17. Faserformkoerper and process for its manufacture and use of formkoerpers to manufacture faserverstaerkter aluminum castings: pat. 4123677 DE; publ. 21.01.93. 8 p.
18. Preparation of yogurt containing confectionery pieces and product thereof: pat. 2006165844 US; publ. 27.07.06. 8 p.
19. Preparation method for light high-strength and high-tenacity aluminum-matrix composite material: pat. 102168214B CN; publ. 17.07.13. 13 p.
20. Brake facing made of magnesium borate crystal whisker and ceramic particle reinforced aluminum base composite material and its preparation process: pat. 1414132 CN; publ. 30.04.03. 11 p.
21. Lin GENG, Hong-yu XU, Kuai YU, Hong-lin WANG. Aging behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber reinforced Al–Cu alloy composites // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2007. V. 17. Issue 5. P. 1018–1021.