

УДК 621.762

DOI: 10.30987/article\_5d6518cd3e1685.05045712

**А.П. Амосов**, д.ф.-м.н., **Ю.В. Титова**, к.т.н.

(Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244),

**А.А. Кузина**, старший преподаватель

(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34),

**Д.А. Захаров**, к.т.н.

(АО «ВОЛГАБУРМАШ», 443004, г. Самара, ул. Грозненская, 1)

E-mail: egundor@yandex.ru; zaharov.dmi@yandex.ru;

kuzinaantonina@mail.ru

## **Получение наноструктурного композиционного алюмоматричного материала Al–AlN методом порошковой металлургии**

*Согласно обзору жидкофазных и твердофазных методов получения алюмоматричных композиционных материалов (КМ), армированных керамическими наночастицами, жидкофазными методами можно получить литые КМ с содержанием армирующей фазы не более 5 % мас. Показана возможность изготовления нанокompозита Al–AlN со значительно большим содержанием (до 30 % мас.) наночастиц нитрида алюминия AlN твердофазным методом порошковой металлургии.*

**Ключевые слова:** порошок алюминия; нанопорошок нитрида алюминия; смешивание; прессование; спекание; алюмоматричный нанокompозит.

**A.P. Amosov**, Dr. Sc. Phys-Math, **Yu.V. Titova**, Can. Sc. Tech.

(Samara State Technical University, 244, Molodogvardeiskaya Str., Samara, 443100),

**A.A. Kuzina**, Senior Lecture

(Academician Korolyov National Research University of Samara, 34, Moskovskoye Highway, Samara, 443086),

**D.A. Zakharov**, Can. Sc. Tech.

(PC "VOLGABURMACH", 1, Groznenskaya Str., Samara, 443004)

## **Al–AlN nano-structural aluminum-matrix composite manufacturing by powder metallurgy method**

*According to the review of liquid-phase and solid-phase methods of manufacturing aluminum-matrix composites reinforced with ceramic nano-particles one can obtain cast composites having a reinforcing phase not more than 5% by weight. There is shown a possibility to manufacture Al–AlN nano-composite with considerably higher content (up to 30% by weight) AlN aluminum nitride nano-particles with the aid of a solid-phase method of powder metallurgy.*

**Keywords:** aluminum powder; nano-powder of aluminum nitride; mixture; pressing; fritting; aluminum-matrix nano-composite.

### **Введение**

Для изготовления современных изделий автомобильной, авиационной и аэрокосмической техники широкое применение нашли

дисперсно-упрочненные композиционные материалы (КМ) на алюминиевой основе, в первую очередь, армированные керамическими частицами оксида алюминия и карбида кремния микронных размеров от 1,0 до 50 мкм [1].

В последнее время большое внимание уделяется использованию наноразмерных (менее 0,1 мкм) армирующих частиц, введение которых в состав композитов обеспечивает высокие прочностные характеристики КМ при малом содержании армирующей фазы, что позволяет в определенной мере сохранить в КМ хорошую пластичность и обрабатываемость алюминиевой матрицы [2].

Такие композиты могут изготавливаться как твердофазными методами порошковой металлургии, так и жидкофазными методами литья. Жидкофазные методы привлекательны своей простотой и экономичностью из-за возможности использования существующего недорогого оборудования литейного производства и получения литых заготовок сравнительно больших габаритов и сложной формы, поэтому предпринимаются многочисленные попытки ввода в расплав алюминия наночастиц различных тугоплавких соединений [2 – 5].

Однако наночастицы являются очень активными, окисляются при сравнительно низких температурах, слипаются в прочные агломераты величиной до 3 мкм, плохо смачиваются жидким расплавом, что создает большие трудности для их ввода и равномерного распределения в алюминиевом расплаве. Чтобы преодолеть эти трудности, используют самые разнообразные приемы: механическое замешивание дисперсных частиц в расплав алюминиевого композита с помощью импеллера; ввод частиц струей инертного газа; использование твердожидкого состояния расплава; применение специальных методов физического воздействия на расплав, в том числе наложения ультразвуковых колебаний или центробежных сил; использование нанопорошковых псевдолигатур (смесей нанопорошков с порошками-носителями), чаще всего прессованных, и другие приемы. В итоге все эти жидкофазные методы позволяют ввести в состав алюмоматричного КМ и относительно равномерно распределить в матричной фазе сравнительно небольшое количество наноразмерной армирующей фазы – от долей процента до нескольких объемных или массовых процентов (до 5 % мас. согласно [5]).

Твердофазные методы получения дисперсно-упрочненных алюмоматричных КМ включают в себя методы порошковой металлургии, механического легирования, трения с перемешиванием, диффузионной сварки [2, 3, 6]. По сравнению с жидкофазными методами, они позволяют ввести большие объемы армирующей фазы, которая к тому же может быть пло-

хо смачиваема расплавом алюминия, избежать образования нежелательных хрупких фаз при реагировании наполнителя с расплавом, добиться равномерного распределения армирующих частиц в матрице, но применение твердофазных методов ограничено как высокой стоимостью из-за многостадийности и энергозатратности процесса получения заготовок из дисперсно-упрочненных алюмоматричных КМ на дорогом оборудовании, так и сравнительно небольшими габаритами и простыми формами этих заготовок.

Среди дисперсно-армированных алюмоматричных КМ большой интерес представляют композиты Al–AlN, армированные наночастицами AlN, перспективные для применения в авиакосмической технике при высоких температурах до 400...550 °C [7]. Композиты Al–AlN изучены меньше, чем композиты Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al–SiC, и, в отличие от последних, они не имеют освоения технологий промышленного производства. Поэтому важное значение имеет исследование и разработка технологий получения нанокompозитов Al–AlN, перспективных в экономическом отношении для промышленного производства.

Обзор методов получения и свойств алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наночастицами нитрида алюминия AlN, представлен в работе [8]. Из обзора следует, что несомненный интерес для получения нанокompозитов Al–AlN представляет исследование возможности использования достижений простой энергосберегающей порошковой технологии на основе процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который называют также синтезом горения [9, 10].

Стоимость нанопорошков нитридов, полученных по азидной технологии СВС, для последующего их ввода в матричный расплав (ex-situ), примерно в 2–3 раза ниже стоимости аналогичных нанопорошков, полученных методом плазмохимического синтеза.

Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС–Az), использующая азид натрия NaN<sub>3</sub> в качестве твердого азотирующего реагента, позволяет получать при сжигании смеси порошков Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> + 3NaN<sub>3</sub> нанопорошок нитрида алюминия в виде коротких нановолокон со средним диаметром около 100 нм вместе с 35 % масс. побочной соли криолита Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, которая играет роль флюса при работе с расплавом алюминия и не остается в составе затвердевшего алюмоматричного композита [11].

В работах [8 – 12] представлены результаты предыдущих исследований авторов по жидкофазному ex-situ изготовлению нанокompозитов Al–AlN с использованием различных методов ввода в расплав алюминия (или его сплавов) нанопорошка марки СВС–Аз состава (AlN–35%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>).

Прямое замешивание нанопорошка AlN в насыпном виде в расплав алюминия не приводит к успеху из-за плохой смачиваемости нанопорошка жидким алюминием и слипания наночастиц в агломераты. Использование прессованного брикета нанопорошковой лигатуры Cu – 4%(AlN – 35%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) позволило получить литой композит расчетного состава Al–1,2%Cu–0,035%AlN (здесь и далее % масс.). С применением композиционной лигатуры, полученной сплавлением флюса карналлит KCl·MgCl<sub>2</sub> с нанопорошком (AlN–35%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>), удалось ввести до 1%AlN в матрицу сплава АМг6.

Композит с содержанием до 4%AlN был изготовлен путем замешивания нанопорошка (AlN–35%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) в сплав АМ5 в твердожидком состоянии. Применение экзотермической нанопорошковой лигатуры (AlN–35%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>)–(Ti+C) для реализации in-situ процесса СВС карбида титана в расплаве алюминия и обеспечения ex-situ усвоения заранее синтезированного нанопорошка нитрида алюминия расплавом позволило получить гибридный нанокompозит расчетного состава Al–7,7%AlN–19%TiC, т.е. увеличить содержа-

ние наноразмерной армирующей фазы AlN до 7,7 %.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности ex-situ изготовления нанокompозита Al–AlN со значительно большим содержанием (до 75 % масс.) наночастиц AlN твердофазным методом порошковой металлургии при использовании порошка алюминия и нанопорошка марки СВС–Аз состава (AlN–5%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>).

### Материалы и методы исследования

Технологическая схема приготовления такого алюмокомпозита, упрочненного наночастицами AlN, включала следующие операции порошковой металлургии: смешивание исходных порошков, одностороннее холодное прессование порошковой смеси и спекание в вакууме без нагрузки. В качестве исходных порошков применялись: порошок алюминия марки ПА-4 со средним размером частиц 70...80 мкм и нанопорошок марки СВС–Аз состава (AlN+5%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) в виде нановолокон AlN диаметром 100...300 нм и длиной до 3 мкм с примесью 5 % галоидной соли Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>. Этот нанопорошок был заранее синтезирован по азидной технологии СВС при сжигании смеси порошков 20Al + (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> + 6NaN<sub>3</sub> [13].

Свойства исходных порошков приведены в табл. 1.

1. Физико-технологические свойства исходных порошков

Порошок	Компактная плотность, г/см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Сыпучесть, г/с	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г
ПА-4	2,7	0,87	0	2,19
AlN-5%Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	3,05	0,9		18,29

Приготовление порошковых смесей Al–AlN осуществлялось механическим смешиванием исходных порошков с добавлением 1 % парафина (в качестве связующего) и без добавления парафина в планетарной центробежной мельнице «Пульверизетте-5» в течение 1,0 мин со скоростью вращения 250 об/мин твердосплавных размольных шаров диаметром 10 мм. Так были приготовлены порошковые смеси Al–AlN с содержанием дисперсной фазы AlN – 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 и 75 %. Однородность смешивания оценивали произвольно взятыми пробами. Шихту считали однородной, если не менее 95 % произвольно взятых проб имеют почти одинаковый гранулометрический состав [14].

Средний размер порошков определяли обработкой изображений на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega SB, химический состав порошков – с помощью приставки энергодисперсионного детектора микрорентгеноспектрального анализа INCAx-act на этом микроскопе; насыпную массу порошков – с помощью волномера; сыпучесть порошков – методом Холла; удельную поверхность порошков – с помощью анализатора удельной поверхности дисперсных и пористых материалов серии сорбтометр; фазовый состав – с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7.

Формование порошковых смесей Al–AlN осуществлялось на прессе ПСУ-50 одноосным

холодным прессованием с давлением 200 и 300 МПа в цилиндрической пресс-форме с внутренним диаметром 16,5 мм, высота брикетов составляла до 4 мм, масса – до 2,5 г.

Характеристики прессованных брикетов гетерогенной смеси порошков Al–AlN определяли по обычным формулам для порошковых материалов [15 – 16]:

– компактную теоретическую плотность,  $г/см^3$ :

$$\gamma_k = 100 / (c_{Al} / \gamma_{Al} + c_{AlN} / \gamma_{AlN}),$$

где  $c_{Al}$ ,  $c_{AlN}$  – массовые концентрации компонентов порошковой смеси, %;  $\gamma_{Al}$ ,  $\gamma_{AlN}$  – компактная плотность компонентов порошковой смеси,  $г/см^3$ ;

– относительную плотность, %:

$$\theta = (\gamma_{пр} / \gamma_k) 100\%,$$

где  $\gamma_{пр}$  – измеренная плотность прессовки,

$г/см^3$ ; пористость, %:  $\Pi = 100 - \theta$ .

Отметим, что в приведенных выше формулах не учитывалось наличие в порошковых прессовках примесей галоидной соли  $Na_3AlF_6$  и парафина, содержание которых не превышало 1,0...1,5 % от массы прессовок.

Спекание полученных брикетов проводилось в вакуумно-компрессионной печи модели VKPGr при температурах 580 и 650 °С, вакуум составил  $2 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст., время изотермической выдержки – 40 мин.

### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 представлены физико-технологические свойства полученных механоактивацией смесей порошков Al–AlN без добавления парафина.

2. Физико-технологические свойства смесей порошков Al–AlN без парафина

Смесь порошков	Средний размер частиц, мкм	Компактная плотность, $г/см^3$	Насыпная масса, $г/см^3$	Сыпучесть, г/с	Удельная поверхность, $м^2/г$
Al-5%AlN	30...70	2,72	0,749	0	4,26
Al-10%AlN	28...65	2,73	0,922		6,07
Al-15%AlN	25...60	2,75	0,928		6,93
Al-20%AlN	23...58	2,76	0,940		7,38
Al-25%AlN	21...56	2,78	0,970		8,28
Al-30%AlN	20...55	2,80	0,991		9,79
Al-50%AlN	18...53	2,86	0,993		10,57
Al-75%AlN	15...50	2,95	0,995		13,73

Согласно произвольно взятым пробам из смесей, представленных в табл. 2, порошковые компоненты почти равномерно распределены по объему полученных порошковых смесей. Максимальное уменьшение среднего размера порошковых частиц наблюдается в смесях Al–50%AlN и Al–75%AlN. Наибольшее значение плотности гетерогенной смеси порошков в компактном состоянии приходится на смеси Al–50%AlN и Al–75%AlN, что объясняется наибольшими значениями массовой доли более плотной фазы AlN в этих порошковых смесях. Этим фактором объясняются и максимальные значения насыпной массы и удельной поверхности порошковой смеси Al–75%AlN. Однако все полученные порошковые смеси Al–AlN не обладают сыпучестью, так как исходные порошки ПА-4 и (AlN+5% $Na_3AlF_6$ ) являются не сыпучими.

При формовании порошковых образцов Al–AlN без парафина пресс-инструмент (пуансон и матрица) предварительно смазывались вазелином (толщина смазки не превышала 1 мм). Выбор смазки при формовании ма-

териалов на алюминиевой основе более сложен, чем, например, в случае обработки медных, цинковых или стальных сплавов [15]. Применение смазки объясняется необходимостью снижения энергосиловых параметров прессования, а также предотвращением возможного приваривания и налипания алюминия на пресс-инструмент в процессе деформирования порошков, что приводит к задирам на поверхности прессованных образцов.

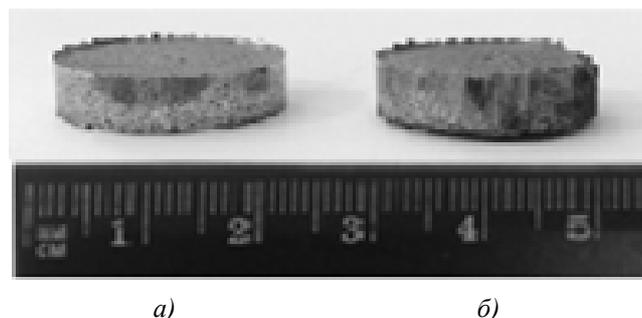


Рис. 1. Дефекты прессовок Al–AlN без добавления парафина: а – Al-5%AlN; б – Al-30%AlN

На поверхности прессовок Al–AlN без добавления парафина наблюдались задиры, что является дефектом обработки. На рис. 1 представлены такие дефекты у образцов Al–5%AlN и Al–30%AlN. С увеличением содержания упрочняющей фазы AlN в образцах, приготовленных без парафина, количество задиров повышалось, что приводило к короблению образцов.

В образцах Al–AlN, приготовленных с добавлением парафина, минимальная пористость наблюдалась при давлении прессования

300 МПа. На рис. 2 представлена зависимость пористости этих образцов от содержания дисперсной фазы AlN. С увеличением содержания AlN пористость брикетов увеличивается. Максимальная пористость в прессованных образцах Al–AlN наблюдается при содержании нитрида алюминия 50 и 75 % и составляет 20 и 25 % соответственно, что приводит к повышенной хрупкости этих образцов, а, следовательно, осложняется их спекание из-за практически невозможного точного дозирования исходной шихты таких образцов.

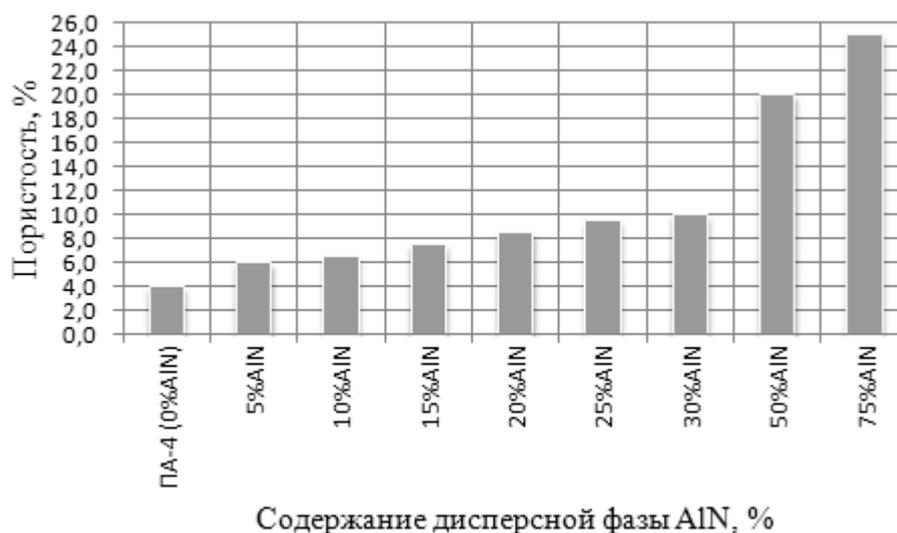


Рис. 2. Зависимость пористости образцов Al–AlN, приготовленных с добавлением парафина и спрессованных при давлении 300 МПа, от содержания дисперсной фазы AlN

После спекания в вакууме при температуре 650 °С практически у всех полученных образцов Al–AlN наблюдается искажение формы (коробление образцов). Максимальная пористость в полученных образцах Al–AlN наблюдается после спекания при температуре 650 °С при содержании нитрида алюминия 50 и 75 % и составляет 18 и 23 % соответственно, а после спекания при температуре 580 °С составляет 15 и 20 % соответственно. Из-за высокой пористости и, как следствие, хрупкости этих образцов, дальнейшие исследования проводились с компактными образцами Al–AlN при содержании нитрида алюминия до 30 %.

На рис. 3 представлен внешний вид образца Al–30%AlN, приготовленного с добавлением парафина и спрессованного при давлении 300 МПа, до и после спекания. Химический состав образцов Al–AlN с минимальным (5 %) и максимальным (30 %) содержанием дисперсной фазы нитрида алюминия до и после спекания при температуре 650 °С представлен в табл. 3.

Согласно рис. 3, внешних дефектов в образце Al – 30%AlN с парафином до спекания не наблюдается. Однако после спекания этого образца при температуре 650 °С видно незначительное коробление с выделением на боковой поверхности образца металлической капли. Химический состав (см. табл. 3) показывает, что это – капля алюминия со значительным содержанием оксида алюминия. Появление капли можно объяснить завышенной температурой спекания, приводящей к появлению жидкого алюминия и эксудации (выдавливанию) его из образца вследствие наличия в образце большого количества керамического нитрида алюминия, плохо смачиваемого жидким алюминием.

Согласно табл. 3, до спекания содержание кислорода в образце с 30%AlN заметно больше, чем в образце с 5%AlN. Вероятно, это кислород, адсорбированный на большой поверхности наночастиц AlN. В спеченных образцах Al–AlN содержание кислорода резко возрастает, а элемент азот не обнаруживается, что

свидетельствует об интенсивном окислении как алюминия, так и нитрида алюминия в этих условиях спекания. Содержание элементов примеси галоидной соли  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  практически

сохраняется, т.е. эта соль не удаляется при спекании. Сильное окисление и эксудация алюминия из образцов приводят к короблению образцов при температуре спекания  $650\text{ }^\circ\text{C}$ .

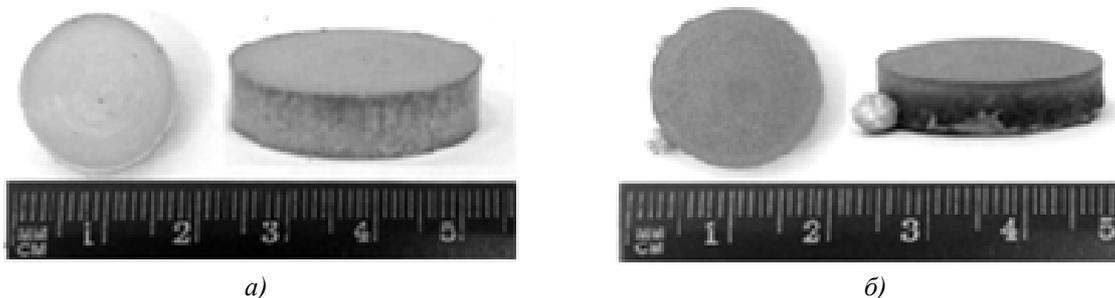


Рис. 3. Внешний вид образца Al – 30%AlN с добавлением парафина:  
а – до спекания; б – после спекания при температуре  $650\text{ }^\circ\text{C}$

### 3. Химический состав образцов Al-AlN до и после спекания при температуре $650\text{ }^\circ\text{C}$

Образец	Состав, % (мас.)												
	O	C	N	F	Na	Al	S	Fe	Ca	O	Al	S	Fe
	Таблетка									Выделившаяся капля			
	До спекания												
Al-5%AlN	3,1	19,8	-	1,2	-	75,8	-	-	-	-	-	-	-
Al-30%AlN	8,2	9,9	7,1	4,8	1,7	68,1	-	0,1	0,1	-	-	-	-
	После спекания												
Al-5%AlN	31,1	-	-	2,4	1,5	63,8	0,8	0,4	-	-	-	-	-
Al-30%AlN	34,6	-	-	4,9	3,5	56,5	-	0,2	0,3	35,4	63,5	0,2	0,9

После спекания образцов Al-AlN при меньшей температуре ( $580\text{ }^\circ\text{C}$ ) с добавлением парафина, полученных прессованием с давлением  $300\text{ МПа}$ , ярко выраженных внешних дефектов не наблюдается. На рис. 4 представ-

лен внешний вид образцов Al-5%AlN и Al-30%AlN с парафином после такого спекания. Видно отсутствие капель эксудированного алюминия.

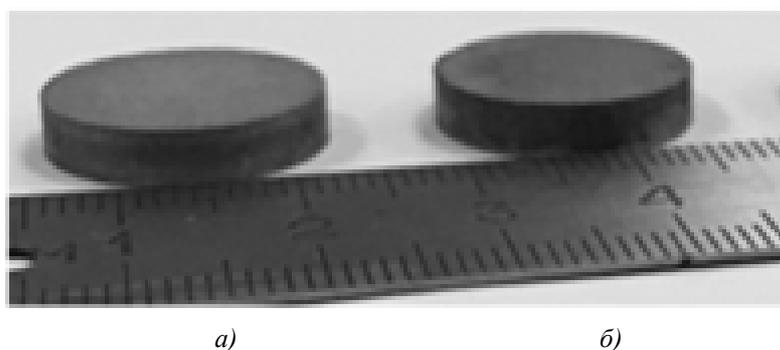


Рис. 4. Внешний вид образцов Al-AlN с парафином после спекания при  $580\text{ }^\circ\text{C}$ :  
а – Al-5%AlN; б – Al-30%AlN

Химический состав образцов Al–AlN с минимальным (5 %) и максимальным (30 %) содержанием дисперсной фазы нитрида алюминия после спекания при температуре 580 °C представлен в табл. 4.

Согласно табл. 4, в этих спеченных образцах Al–AlN содержание кислорода заметно меньше, чем в образцах, спеченных при 650 °C, а элемент азот обнаруживается в малых массовых долях. Такой результат можно объяснить тем, что при температуре 580 °C не появляется жидкая фаза алюминия, процессы окисления алюминия и нитрида алюминия протекают, но не так интенсивно, как при 650 °C, и в отсутствие жидкой фазы нет ее эксудации из образца. Элементы примеси соли Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> обнаруживаются в спеченных образцах Al–5%AlN и Al–30%AlN, однако элементы этой соли в образце Al–5%AlN видны в незначительном количестве из-за малого содержания этой соли в исследуемом образце.

**4. Химический состав образцов Al–AlN с парафином после спекания при температуре 580 °C**

Образец	Состав, % (масс.)					
	Al	N	C	O	F	Na
Al-5%AlN	73,24	0,04	9,39	14,64	2,30	0,39
Al-30%AlN	57,95	1,99	4,88	20,13	12,49	2,56

На рис. 5 представлены микроstructures образцов состава Al–5%AlN и Al–30%AlN, полученных после спекания при температуре 580 °C.

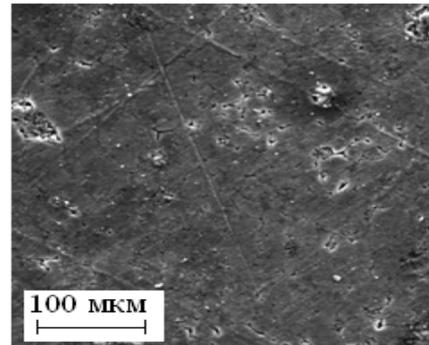
Согласно рис. 5, в полученных образцах наблюдаются поры, наличие которых подтверждается расчетными значениями пористости спеченных образцов, исследованными методом гидростатического взвешивания.

На рис. 6 представлена зависимость пористости спеченных при температуре 580 °C образцов Al–AlN, приготовленных с добавлением парафина и спрессованных при давлении 300 МПа, от содержания дисперсной фазы AlN.

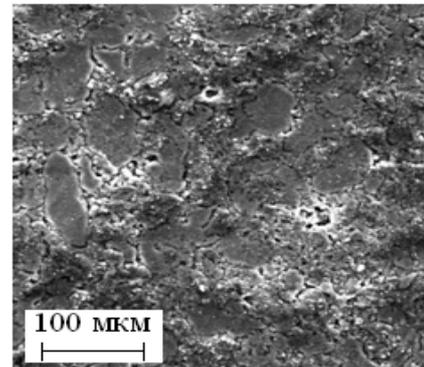
Согласно рис. 6, залечивание пор в спеченных образцах с увеличением содержания дисперсной фазы AlN ухудшается, что свидетельствует о необходимости повышения давления прессования при увеличении содержания дисперсной фазы AlN.

На рис. 7 и 8 представлены результаты рентгенофазового анализа спеченных при температуре 580 °C образцов, содержащих нитрид алюминия 5 и 30 %.

По рентгенограммам спеченных образцов Al–5%AlN и Al–30%AlN (см. рис. 7 и 8) методом корундовых чисел по нескольким одиночным пикам было определено количественное соотношение фаз в полученных образцах: Al – 86,06 % и AlN – 13,94 % (в образце Al–5%AlN); Al – 57,98 %, AlN – 24,72 % и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 17,3 % (в образце Al–30%AlN).



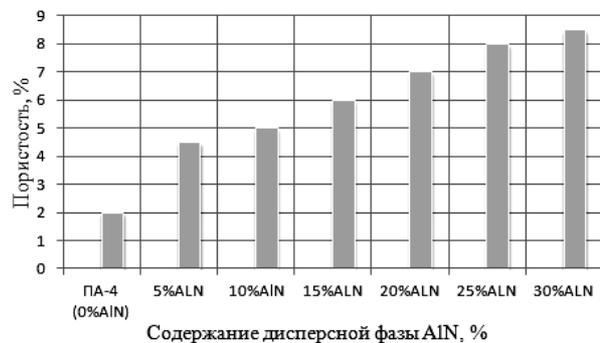
a)



б)

**Рис. 5. Микроstructures образцов Al–AlN после спекания при температуре 580 °C:**

a – Al–5%AlN; б – Al–30%AlN



**Рис. 6. Зависимость пористости спеченных при температуре 580 °C образцов Al–AlN, приготовленных с добавлением парафина и спрессованных при давлении 300 МПа, от содержания дисперсной фазы AlN**

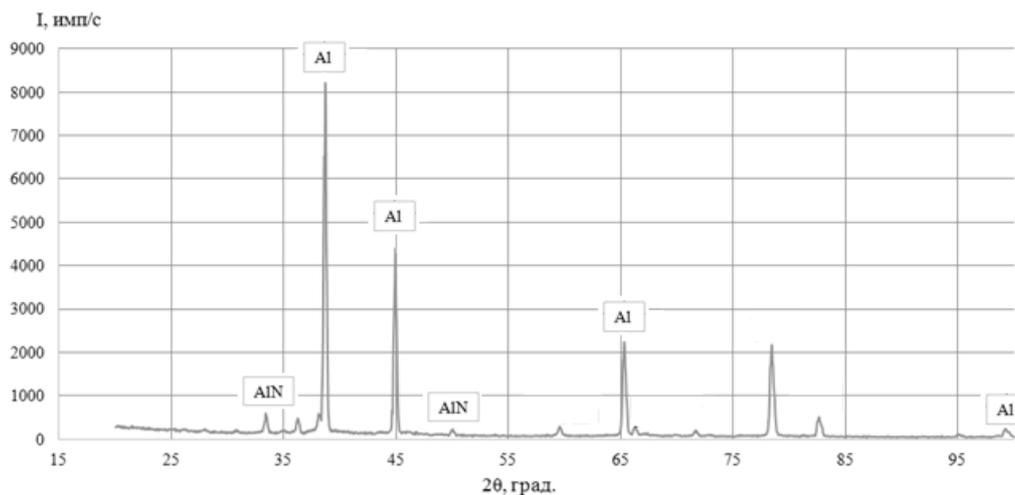


Рис. 7. Рентгенограмма спеченного образца Al-5%AlN

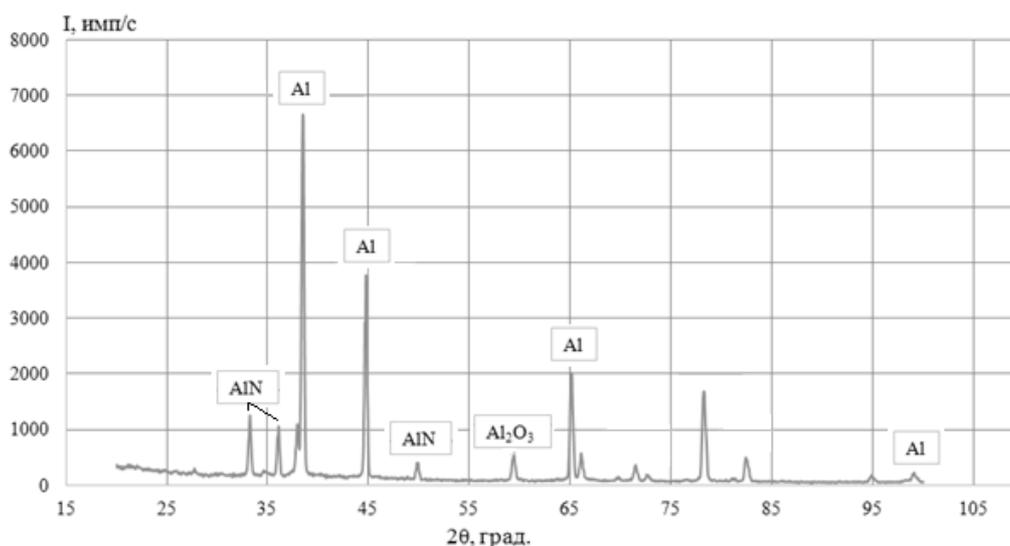


Рис. 8. Рентгенограмма спеченного образца Al-30%AlN

### Заключение

Применение твердофазной технологии порошковой металлургии позволило ввести до 30% мас. наночастиц AlN, полученных по азидной технологии СВС, в состав смеси с порошком алюминия, отпрессовать и спечь эту порошковую смесь, получив наноструктурный композиционный алюмоматричный материал с минимальной пористостью 4,5 % у образца Al-5%AlN, и максимальной пористостью 8,5 % – у образца Al-30%AlN. Спеченные образцы Al-AlN при содержании нитрида алюминия 50 и 75 % получились с высокой пористостью (15 и 20 % соответственно) и хрупкостью, следовательно, фактический ввод наночастиц AlN в этом количестве рассмотренным твердофазным методом порошковой металлургии не возможен.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курганова, Ю.А., Чернышова, Т.А., Кобелева, Л.И., Курганов, С.В. Эксплуатационные характеристики алюмоматричных дисперсно-упрочненных композиционных материалов и перспективы их использования на современном рынке конструкционных материалов // *Металлы*. – 2011. – № 4. – С. 71-75.
2. Casati, R. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles - A Review / R. Casati, M. Vedani. // *Metals*. – 2014. – No. 4. – P. 65-83.
3. Borgonovo, C. Manufacture of aluminum nanocomposites: a critical review / C. Borgonovo, D. Apelian // *Materials Science Forum*. – 2011. – Vol. 678. – P. 1-22.
4. Костиков, В.И., Агуреев, Л.Е., Еремеева, Ж.В. Разработка упрочненных наночастицами алюмокомпозитивов для ракетно-космической техники // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2014. – №1. – С. 35-38.
5. Витязь, П.А., Сеньют, В.Т., Хейфец, М.Л., Соболев, С.Ф., Колмаков, А.Г. Технологические основы синтеза композиционных наноструктурированных материалов на

основе алюминиевых сплавов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 8(62). – С. 3-12.

6. Rana, R.S. Review of recent studies in Al matrix composites / R.S. Rana, R. Purohit, S. Das // International Journal of Science & Engineering Research. – 2012. – Vol. 3. – No. 6. – P. 1-16.

7. Borgonovo, C. Aluminum nanocomposites for elevated temperature applications / C. Borgonovo, D. Apelian, M.M. Makhlof // JOM. – 2011. – Vol. 63. – No. 2. – P. 57-64.

8. Amosov, A.P. Fabrication of Al-AlN nanocomposites / A.P. Amosov, Y.V. Titova, I.Y. Timoshkin, A.A. Kuzina // Key Engineering Materials. - 2016. - Vol. 684. - P. 302-309.

9. Амосов, А.П., Никитин, В.И., Никитин, К.В., Рязанов, С.А., Ермошкин, А.А. Научно-технические основы применения процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для создания литых алюмоматричных композиционных сплавов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №8(26). – С. 3-9.

10. Амосов, А.П., Титова, Ю.В., Майдан, Д.А., Ермошкин, А.А., Тимошкин, И.Ю. О применении нанопорошковой продукции азидной технологии СВС для армирования и модифицирования алюминиевых сплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 68-74.

11. Titova, Y.V. Azide SHS of aluminium nitride nanopowder and its application for obtaining Al-Cu-AlN cast nanocomposite / Y.V. Titova, A.V. Sholomova, A.A. Kuzina, D.A. Maidan, A.P. Amosov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – No. 012037.

12. Титова, Ю.В., Амосов, А.П., Майдан, Д.А., Латухин, Е.И. Гибридное армирование с применением процесса СВС для получения композита Al-AlN-TiC в расплаве алюминия // Синтез и консолидация порошковых материалов: Сборник тезисов Международной конференции (23–26 октября 2018 г., Черноголовка). – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2018. – С. 672-678.

13. Titova, Y.V. SHS of ultrafine and nanosized powder of aluminum nitride using sodium azide and halide salt (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> / Y.V. Titova, A.P. Amosov, D.A. Maidan, A.V. Sholomova, A.V. Bolotskaya // SHS 2017. XIV International Symposium on Self-propagating High-temperature Synthesis: Book of Abstracts (September 25-28, 2017, Tbilisi, Georgia). – P. 25-28.

14. Кузина, А.А. Получение нанопорошковых псевдолигатур Cu-(SiC+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) для модифицирования и армирования алюминиевых сплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – № 5. – С. 78-84.

15. Гопиенко, В.Г. Спеченные материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Беллавин. – М.: Металлургия, 1993. – 323 с.

16. Финдайзен, Б. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / Э. Фридрих, И. Калнинг, А. Мерц, К. Мюллер, Г. Рэбш, Х. Зауэр, В. Шарфе, В. Шатт. – М.: Металлургия, 1983. – 520 с.

## REFERENCES

1. Kurganova, Yu.A., Chernyshova, T.A., Kobeleva, L.I., Kurganov, S.V. Operation characteristics of aluminum-matrix dispersed-strengthened composites and prospects of their use in modern market of structural materials // Metals. – 2011. – No.4. – pp. 71-75.

2. Casati, R. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles - A Review / R. Casati, M. Vedani. // Metals. –

2014. – No. 4. – P. 65-83.

3. Borgonovo, C. Manufacture of aluminum nanocomposites: a critical review / C. Borgonovo, D. Apelian // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 678. – P. 1-22.

4. Kostikov, V.I., Agureev, L.E., Eremeeva, Zh.V. Development of aluminum composites strengthened by nanoparticles for rocket-space engineering // College Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings. – 2014. – No.1. – pp. 35-38.

5. Vityaz, P.A., Senyut, V.T., Heifets, M.L., Sobol, S.F., Kolmakov, A.G. Technological fundamentals of synthesis of nano-structural materials based on aluminum alloys // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2016. – No.8 (62). – pp. 3-12.

6. Rana, R.S. Review of recent studies in Al matrix composites / R.S. Rana, R. Purohit, S. Das // International Journal of Science & Engineering Research. – 2012. – Vol. 3. – No. 6. – P. 1-16.

7. Borgonovo, C. Aluminum nanocomposites for elevated temperature applications / C. Borgonovo, D. Apelian, M.M. Makhlof // JOM. – 2011. – Vol. 63. – No. 2. – P. 57-64.

8. Amosov, A.P. Fabrication of Al-AlN nanocomposites / A.P. Amosov, Y.V. Titova, I.Y. Timoshkin, A.A. Kuzina // Key Engineering Materials. - 2016. - Vol. 684. - P. 302-309.

9. Amosov, A.P., Nikitin, V.I., Nikitin, K.V., Ryazanov, S.A., Ermoshkin, A.A. Scientific technical fundamentals of self-propagating high-temperature synthesis for manufacturing cast aluminum-matrix composite alloys discretely reinforced by nano-dimensional ceramic particles // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2013. – No.8 (26). – pp. 3-9.

10. Amosov, A.P., Titova, Yu.V., Maidan, D.A., Ermoshkin, A.A., Timoshkin, I.Yu. On use of nano-powder produce of SHS azide technology for aluminum alloy reinforcement and modification // College Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy. – 2015. No.1. – pp. 68-74.

11. Titova, Y.V. Azide SHS of aluminium nitride nanopowder and its application for obtaining Al-Cu-AlN cast nanocomposite / Y.V. Titova, A.V. Sholomova, A.A. Kuzina, D.A. Maidan, A.P. Amosov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – No. 012037.

12. Titova, Yu.V., Amosov, A.P., Maidan, D.A., Latukhin, E.I. Hybrid reinforcement with SHS process application for manufacturing Al-AlN-TiC composite in aluminum melt // Synthesis and Consolidation of Powder Materials: Proceedings of the Inter. Conf. (October 23-26, 2018, Chernogolovka). – М.: TORUS PRESS, 2018. – pp. 672-678.

13. Titova, Y.V. SHS of ultrafine and nanosized powder of aluminum nitride using sodium azide and halide salt (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> / Y.V. Titova, A.P. Amosov, D.A. Maidan, A.V. Sholomova, A.V. Bolotskaya // SHS 2017. XIV International Symposium on Self-propagating High-temperature Synthesis: Book of Abstracts (September 25-28, 2017, Tbilisi, Georgia). – P. 25-28.

14. Kuzina, A.A. Manufacturing Cu-(SiC+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) nanopowder pseudo-ligatures for aluminum alloy modification and reinforcement // College Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy. – 2016. – No.5. – pp. 78-84.

15. Gopienko, V.G. Aluminum Powder Sintered Materials / V.G. Gopienko, M.E. Smagorinsky, A.A. Grigoriev, A.D. Bellavin. – М.: Металлургия, 1993. – pp. 323.

16. Findeisen, B. Powder Metallurgy. Sintered Materials and Composites / E. Friedrich, I. Kalning, A. Merz, K. Mueller, G. Rebsch, H. Sauer, W. Scharfe, W. Schatt. – Metallurgy, 1983. – pp. 520.

Рецензент д.т.н. В.С. Муратов