

УДК 537.311.3;621.315.5

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-3-36-41

Температурная зависимость электросопротивления композиционного материала TiN/TiAl₃/Ti₂AlN

© 2019 г. А.А. Кондаков, А.В. Карпов, В.В. Грачев, А.Е. Сычев

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, Московская обл.

Статья поступила в редакцию 11.07.18 г., доработана 19.09.18 г., подписана в печать 29.09.18 г.

В режиме фильтрационного горения в азоте пористых образцов из консолидированного при термовакуумной обработке интерметаллидного порошка TiAl получен композиционный материал TiN/TiAl₃/Ti₂AlN. По данным рентгенофазового анализа продуктов горения было рассчитано массовое содержание каждой фазы, которое составило 42 % TiN, 35 % TiAl₃, 20 % Ti₂AlN и 3 % TiAl. Синтезированный композиционный материал, содержащий MAX-фазу Ti₂AlN, является хорошим электрическим проводником, демонстрирующим металлический характер проводимости. По стандартной 4-точечной методике при постоянном токе проведены измерения удельного электросопротивления синтезированного материала в диапазоне температур 300–1300 К в вакууме 2·10⁻³ Па. Выявлено, что с увеличением температуры удельное электросопротивление линейно возрастает от 0,35 до 1,25 мкОм·м. Повторные измерения этого показателя при последующих циклах нагрева–охлаждения продемонстрировали полное совпадение результатов, что свидетельствует о стабильности электрофизических свойств данного материала в исследованном диапазоне температур.

Ключевые слова: электросопротивление, композиционный материал, MAX-фаза, фильтрационное горение.

Кондаков А.А. – мл. науч. сотрудник лаборатории макрокинетики процессов CBC в реакторах ИСМАН (142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Акад. Осипяна, 8). E-mail: kondakov@ism.ac.ru.

Карпов А.В. – науч. сотрудник лаборатории физического материаловедения ИСМАН. E-mail: karpov_av@ism.ac.ru.

Грачев В.В. – канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе ИСМАН. E-mail: grachev@ism.ac.ru.

Сычев А.Е. – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, зав. лабораторией физического материаловедения ИСМАН. E-mail: sytshev@ism.ac.ru.

Для цитирования: Кондаков А.А., Карпов А.В., Грачев В.В., Сычев А.Е. Температурная зависимость электросопротивления композиционного материала TiN/TiAl₃/Ti₂AlN. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2019. No. 3. С. 36–41. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-3-36-41.

Kondakov A.A., Karpov A.V., Grachev V.V., Sytshev A.E.

Temperature dependence of TiN/TiAl₃/Ti₂AlN composite material electric resistivity

The TiN/TiAl₃/Ti₂AlN composite material was obtained by filtration combustion of the porous TiAl intermetallic samples in gaseous nitrogen. X-ray phase analysis of combustion products provided data to calculate the weight content of each phase as follows: 42 wt.% TiN, 35 wt.% TiAl₃, 20 wt.% Ti₂AlN and 3 wt.% TiAl. The synthesized composite material containing Ti₂AlN MAX phase features good electrical conductivity of a metallic nature. Specific electrical resistance of the synthesized material was measured by a standard 4-point procedure at constant current in the temperature range 300–1300 K in vacuum 2·10⁻³ Pa. It was found that specific electrical resistance grows linearly from 0.35 to 1.25 μΩ·m as temperature rises. Subsequent measurements of this indicator at the following heating/cooling cycles demonstrated full agreement of obtained results. This fact indicates that the material has stable electrophysical properties in the investigated temperature range.

Keywords: electrical resistivity, composite material, MAX phase, filtration combustion.

Kondakov A.A. – Research assistant, Laboratory of macrokinetics of SHS in reactors, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science (ISMAN), Russian Academy of Sciences (142432, Russia, Moscow reg., Chernogolovka, Academician Osipyan str., 8). E-mail: kondakov@ism.ac.ru.

Karpov A.V. – Research scientist, Materials science laboratory, ISMAN. E-mail: karpov_av@ism.ac.ru.

Grachev V.V. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Deputy director for scientific work, ISMAN. E-mail: grachev@ism.ac.ru.

Sytshev A.E. – Cand. Sci. (Tech.), Leading researcher, Head of Material science laboratory, ISMAN. E-mail: sytshev@ism.ac.ru.

Citation: Kondakov A.A., Karpov A.V., Grachev V.V., Sytshev A.E. Temperature dependence of TiN/TiAl₃/Ti₂AlN composite material electric resistivity. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2019. No. 3. P. 36–41 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-3-36-41.

Введение

Электропроводящие композиционные материалы (КМ) широко применяются для получения проводящих покрытий тепловых и радиационных защитных экранов, электроконтактов, токосъемников и т.д. Электрофизические свойства КМ сильно зависят от фазового состава и определяют область и условия их использования. Тройные системы типа $Me-Me^I-N$ (Me и Me^I — металлы) проявляют уникальное сочетание свойств, характерных как для металлов, так и для керамики [1]. Такие материалы обладают малой плотностью, высокими значениями тепло- и электропроводности, прочности, пониженным модулем упругости, превосходной коррозионной стойкостью.

Соединения на основе Ti_2AlN относятся к так называемым МАХ-фазам, обладающим слоистой наноламинатной структурой с чередованием слоев TiN_x и Al . В общем виде эти фазы описываются формулой $M_{n+1}AX$, где M — переходной металл, A — элемент IIIA или IVA подгруппы Периодической системы, X — углерод или азот. МАХ-фазы классифицируют в соответствии со значениями их числа n : «211» для M_2AX ($n = 1$), «312» для M_3AX_2 ($n = 2$) и «413» для M_4AX_3 ($n = 3$). Они имеют слоистую гексагональную структуру с пространственной группой с двумя формульными единицами в элементарной ячейке [2]. Получение фазы Ti_2AlN может быть реализовано как из элементов (Ti , Al , N), так и их соединений TiN и AlN [2–4]. Поскольку связи $Ti-N$ являются ковалентными, а $Ti-Al$ — металлическими, фаза Ti_2AlN одновременно проявляет как металлические, так и керамические свойства [1–3].

К методам получения МАХ-фаз можно отнести реакционное спекание, горячее прессование, плазменно-искровое спекание, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) и механосинтез [5–8]. В синтезированных образцах обычно присутствуют вторичные фазы нитридов (TiN , AlN) и интерметаллидов ($TiAl_x$).

Ранее в работе [9] была показана принципиальная возможность получения МАХ-фазы в тройной системе $Ti-Al-N$ в режиме фильтрационного горения. В состав полученного материала помимо Ti_2AlN входили фазы TiN , AlN и $TiAl_3$. Также были определены оптимальные условия получения МАХ-фазы с ее максимальным содержанием в конечных продуктах горения. Наибольшее ее количество наблюдалось в образцах, прошедших предварительную термовакуумную обработку.

Материалы на основе МАХ-фаз являются хорошими электрическими проводниками с металлическим типом проводимости, в которых определяющими являются d -состояния электронных орбиталей переходного металла (титана). Электросопротивление КМ является структурно-чувствительным параметром и зависит от их фазового состава. В работе [10] показано, что Ti_2AlN оказывается лучшим проводником по сравнению с Ti_2AlC . Следует заметить, что Ti_2AlN также имеет близкий с $TiAl$ коэффициент термического расширения и, соответственно, находится в равновесии в матрице $TiAl$ [11], которая, благодаря своим физическим свойствам, сохраняющимся при высоких температурах, имеет широкое применение в традиционных высокотемпературных структурных материалах.

Авторами [12] на основе квазигармонической модели Дебая проведены расчеты термических свойств Ti_2AlN и Ti_2AlC . Установлено, что при нормальных условиях Ti_2AlN кристаллизуется в гексагональную структуру. Проведенные расчеты электронных свойств для Ti_2AlN и Ti_2AlC выявили их металлический характер проводимости [12, 13].

В работе [14] были экспериментально получены значения электрической проводимости в диапазоне $T = 5-300$ К для различных МАХ-фаз на основе $Ti-Al$. Также было показано, что в семействе тройных соединений Ti_2AlN и Ti_2AlC лучшей проводимостью обладает фаза Ti_2AlN . К сожалению, авторам данной статьи не удалось найти в литературе сведения о проводимости таких материалов при повышенных температурах.

В настоящей работе предпринята попытка синтезировать композиционный материал в тройной системе $Ti-Al-N$ в режиме фильтрационного горения интерметаллида $TiAl$ в азоте и исследовать его электрофизические свойства.

Методика эксперимента

Исходный порошок интерметаллида $TiAl$ (марки ПТ65Ю35) засыпали в кварцевые трубки диаметром 22 мм, отжигали в вакуумной печи СНВЭ-16/16 при температуре 1100 °С в течение 60 мин для удаления примесных газов. В результате отжига получили спеченные пористые образцы высотой 49 мм, диаметром 22 мм и массой 27 г. Их плотность составляла 1,45 г/см³, что соответствует относительной плотности 0,38.

Исходные образцы после отжига помещали в реактор объемом 3,5 л. Синтез продуктов проводили в режиме фильтрационного горения в атмосфере азота при давлении 2 МПа. В данных условиях горение пористого металлического образца из порошка интерметаллида TiAl протекало при фильтрации газового реагента (азота) в зону реакции. Процесс горения инициировали с помощью вольфрамовой спирали, нагреваемой электрическим током. Температуру горения измеряли при помощи термопар BP5/BP20, установленных на боковой поверхности образца.

Фазовый состав продуктов горения исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3М на медном излучении с монохроматором на вторичном пучке. Идентификацию фаз проводили с помощью следующих стандартов: TiN (CAS № 38-1420), TiAl (CAS № 5-678), Ti₃Al (CAS № 14-451), Ti₂AlN (PDF № 00-055-0434). Количественное соотношение фаз определяли методом Ритвельда в программном пакете «Буревестник» с использованием структурных данных фаз TiN, TiAl, Ti₃Al, Ti₂AlN. Микроструктуру синтезированных образцов и химический элементный состав исследовали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Ultra Plus («Carl Zeiss», Германия) на базе Ultra 55 с приставкой рентгеновского микроанализа INCA Energy 350 XT («Oxford Instruments», Великобритания).

Для проведения электрофизических экспериментов из синтезированных образцов вырезали прямоугольные заготовки размером 1,5×1,5×15,0 мм. Для снятия остаточных напряжений перед проведением измерений исследуемые образцы подвергали термообработке в вакууме в течение 30 мин при температуре 1300 К. Измерения удельного электросопротивления осуществляли в диапазоне температур 300–1300 К в вакууме 2·10⁻³ Па по стандартной 4-точечной методике [15] на постоянном токе. Скорость изменения температуры при цикле нагрев/охлаждение составляла 10 К/мин.

Результаты и их обсуждение

Максимальная измеренная температура в процессе горения составила 1873 К. Проведенный рентгенофазовый анализ (рис. 1) показал, что синтезированные продукты содержат в своем составе следующие фазы: МАХ-фазу Ti₂AlN (20 мас.%), нитридную TiN (42 мас.%), а также интерметал-

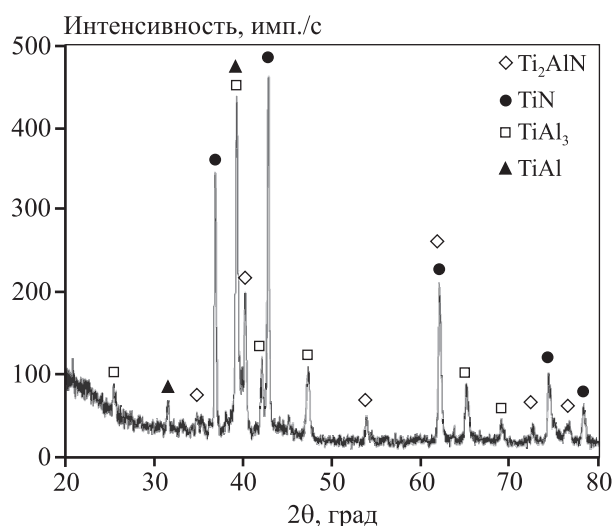


Рис. 1. Дифрактограмма синтезированных продуктов после фильтрационного горения

лидные TiAl₃ (35 мас.%) и TiAl (3 мас.%). Ошибка в определении их содержания составляет не более 2 %. Дифракционные линии, соответствующие МАХ-фазе Ti₂AlN, очень узкие (см. рис. 1), что указывает на высокую степень совершенства ее кристаллической решетки и однородность состава. Все обнаруженные фазы являются проводящими.

Микроструктурный анализ синтезированных образцов (рис. 2) показал наличие особо крупных по размеру структурных составляющих в виде характерных ламинатных зерен Ti₂AlN длиной до 30 мкм и толщиной до 2 мкм. Энергодисперсионный анализ, проведенный на отдельных зернах, выявил структурные составляющие Ti—Al (серая фаза), Ti—Al—N (светлая) и Ti—N (черная). Соотношение элементов зерен на основе Ti—Al—N соответствует по составу МАХ-фазе Ti₂AlN.

Для подтверждения полученного результата было проведено картирование этих зерен, которое показало, что они состоят из трех элементов — Ti, Al и N. В структуре материала присутствуют также иглообразные и пластинчатые выделения интерметаллида TiAl₃ размером до 10 мкм. Размер зерен TiN составляет 1–2 мкм. Зерна TiAl₃ и TiAl заполняют объем, создавая интерметаллидную матрицу. Синтезированные образцы имеют незначительную остаточную пористость. Конечная плотность полученного материала составила 78 %.

Измерения удельного электросопротивления (ρ), проведенные на нескольких образцах, показали совпадение результатов в пределах точности эксперимента (2 %), что свидетельствует об одно-

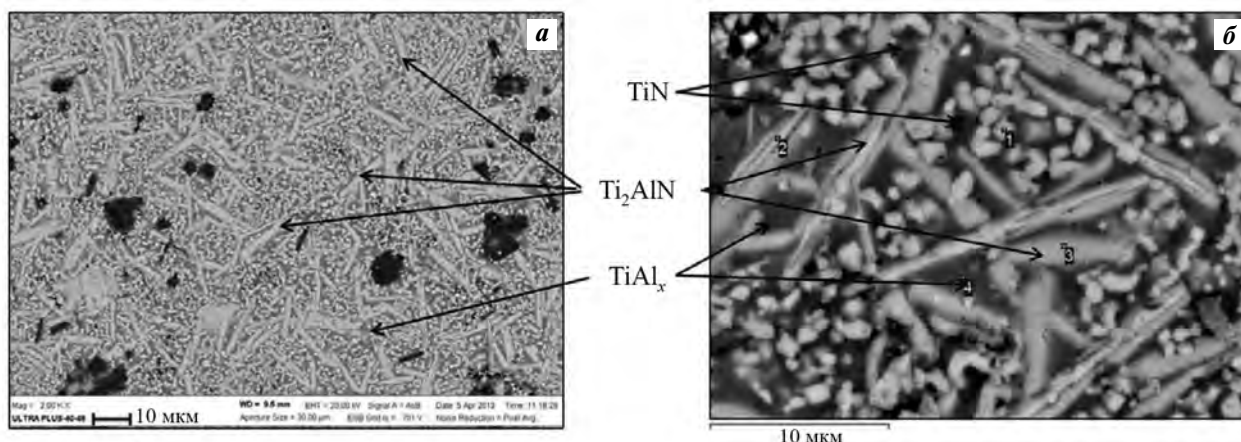


Рис. 2. Микроструктура синтезированного материала
а — общий вид, **б** — характерная морфология основных фаз

родности полученного КМ. Величина электропроводности композитов определяется вкладом границ раздела в сопротивление, наличием дефектов в кристаллической структуре фаз (Ti_2AlN , TiN , TiAl_3 и TiAl), а также межфазовым химическим взаимодействием. Для синтезированного материала значение ρ при комнатной температуре составило $0,35 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, что несколько превышает этот показатель для TiN ($0,25 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) и соответствует величине электросопротивления для Ti_2AlN [14].

Полученный КМ, содержащий МАХ-фазу Ti_2AlN , является хорошим электрическим проводником, демонстрирующим металлический характер проводимости. Поскольку измеренные зависимости удельного электросопротивления от температуры при нагреве и охлаждении совпадают, то на рис. 3 нанесены только точки, полученные в режиме нагрева образца. Повторные измерения ρ при последующих циклах нагрев/охлаждение продемонстрировали полное совпадение результатов, что свидетельствует о стабильности электрофизических свойств данного материала в исследованном диапазоне температур. Полученные значения удельного электросопротивления при комнатной температуре хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [14].

Композиты со смешанной проводимостью представляют как теоретический, так и практический интерес [15, 16]. МАХ-фазы в тройной системе Ti—Al—N : Ti_2AlN (211) и Ti_4AlN_3 (413), формируются в результате интеркаляции монослоев Al в матрицу TiN . Сильные связи Ti—N разрушаются и заменяются более слабыми связями Ti—Al . Таким образом, в МАХ-фазе Ti_2AlN каждый второй оди-

ночный монослой атомов азота в TiN заполняется слоем атомов Al , что фактически приводит к получению нестехиометрического TiN_x [17]. Синтезированный материал плотно упакован структурными составляющими и практически беспористый. Разноориентированные в объеме зерна МАХ-фазы Ti_2AlN , несмотря на явную анизотропию наноламинатов внутри каждого зерна, создают непрерывный каркас, находящийся в матрице на основе интерметаллидной фазы TiAl_3 с включениями TiN .

Многофазовый состав образцов существенно затрудняет анализ факторов, влияющих на проводимость полученного КМ, поскольку она определяется свойствами и концентрацией фазовых составляющих, наличием межфазных границ и

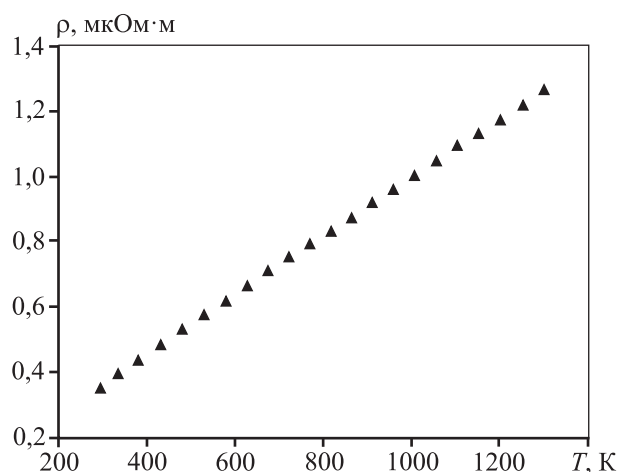


Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления от температуры при нагреве

Удельное электросопротивление отдельных фаз при комнатной температуре

Фаза	ρ , мкОм·м	Лит. источник
Ti ₂ AlN	0,31	[10]
	0,39	[18]
	0,25–0,31	[14]
TiN	0,13	[19]
	0,25	[20]
TiAl	0,31	[21]
TiAl ₃ (тонкая пленка)	0,10	[22]
TiN/TiAl ₃ /Ti ₂ AlN	0,35	Наст. работа

природой их контактов. В таблице представлены значения удельного электросопротивления отдельных фаз при комнатной температуре. Видно, что значение ρ композиционного материала TiN/TiAl₃/Ti₂AlN, исследованного в данной работе, близко к удельному электросопротивлению МАХ-фазы Ti₂AlN, измеренному в работах [10, 14, 18–22]. Этот результат указывает на определяющий вклад фазы Ti₂AlN в электросопротивление синтезированного КМ, что может быть связано с образованием в процессе синтеза цепочек из контактирующих наноламинатных зерен Ti₂AlN, создающих непрерывный каркас в объеме материала. Полученная величина удельного электросопротивления КМ (0,35 мкОм·м) на порядок превосходит таковую для Al (0,027 мкОм·м), но ниже, чем у Ti (0,58 мкОм·м) [23].

Заключение

Композиционный материал TiN/TiAl₃/Ti₂AlN был получен в режиме фильтрационного горения в азоте пористых образцов из предварительно прошедшего термовакuumную обработку порошка интерметаллида TiAl. Методом Ритвельда по данным рентгенофазового анализа продуктов горения было рассчитано массовое содержание каждой фазы: TiN — 42 %, TiAl₃ — 35 %, Ti₂AlN — 20 % и TiAl — 3 %.

Синтезированный КМ, содержащий МАХ-фазу Ti₂AlN, в диапазоне $T = 300\div 1300$ К показывает металлический характер проводимости. Его удельное электросопротивление линейно возрастает от 0,35 мкОм·м (при 290 К) до 1,25 мкОм·м (1300 К). Измерения удельного электросопротивления при нескольких циклах нагрева/охлаждения демон-

стрируют полное совпадение результатов, что свидетельствует о стабильности электрофизических свойств в исследуемом диапазоне температур.

Для выполнения исследований было привлечено оборудование распределенного Центра коллективного пользования ИСМАН.

Литература/References

1. Ивановский А.Л. Тройные карбиды и нитриды на основе переходных металлов и элементов IIIB и IVB подгрупп: Электронное строение и химическая связь. *Успехи химии*. 1996. Т. 65. No. 6. С. 499–518. *Ivanovskii A.L. Ternary carbides and nitrides based on transition metals and subgroup IIIB, IVB elements: Electronic structure and chemical bonding. Russ. Chem. Rev.* 1996. Vol. 65. No. 6. P. 461–478. DOI: 10.1070/RC1996v065n06ABEH000299.
2. Barsoum M., Brodtkin D., El-Raghy T. Layered machinable ceramics for high temperature applications. *Scripta Mater.* 1997. Vol. 36. No. 5. P. 535–541. DOI: 10.1016/S1359-6462(96)00418-6.
3. Lin Z., Zhuo M., Li M., Wang J., Zhou Y. Synthesis and microstructure of layered-ternary Ti₂AlN ceramic. *Scripta Mater.* 2007. Vol. 56. No. 12. P. 1115–1118. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.01.049.
4. Low I.M., Sakka Y., Hu C.F. MAX phases and ultra-high temperature ceramics for extreme environments. USA: IGI Global, 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.1176.5601.
5. Ковалев Д.Ю., Лугинина М.А., Сычев А.Е. Реакционный синтез МАХ-фазы Ti₂AlN. *Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2016. No. 2. С. 41–46. DOI: 10.17073/1997-308X-2016-2-41-46. *Kovalev D.Yu., Luginina M.A., Sytshev A.E. Reaction synthesis of the Ti₂AlN MAX-phase. Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 3. P. 303–307. DOI: 10.3103/S1067821217030087.
6. Barsoum M., Ali M., El-Raghy T. Processing and characterization of Ti₂AlC, Ti₂AlN, and Ti₂AlC_{0.5}N_{0.5}. *Mater. Trans. A*. 2000. Vol. 31. No. 7. P. 1857–1865. DOI: 10.1007/s11661-006-0243-3.
7. Liu Y., Shi Z., Wang J., Qiao G., Jin Z., Shen Z. Reactive consolidation of layered-ternary Ti₂AlN ceramics by spark plasma sintering of a Ti/AlN powder mixture. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011. Vol. 31. No. 5. P. 863–868. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.11.018.
8. Yembadi Rajkumar, Bharat B. Panigrahi. Thermodynamic assessments and mechanically activated synthesis of ultrafine Cr₂AlC MAX phase powders. *Adv. Powder Technol.* 2017. Vol. 28. No. 3. P. 732–739. DOI: 10.1016/j.appt.2016.11.020.

9. Колесников С.И., Кондаков А.А., Милосердов П.А., Новицкий И.М., Бардин М.А. Определение оптимальных условий синтеза в тройной системе Ti—Al—N для получения продуктов, содержащих наибольшее количество MAX-фаз. *Башкир. хим. журн.* 2012. Т. 19. No. 4. С. 162—165.
Kolesnikov S.I., Kondakov A.A., Miloserdov P.A., Novitsky I.M., Bardin M.A. Optimization of synthesis conditions in Ti—Al—N ternary system to obtain products with the most containment of MAX-phases. *Bashkir. khimicheskiy zhurnal*. 2012. Vol. 19. No. 4. P. 162—165 (In Russ.).
10. Haddad N., Garcia-Caurel E., Hultman L., Barsoum M.W., Hug G. Dielectric properties of Ti₂AlC and Ti₂AlN MAX phases: The conductivity anisotropy. *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 104. No. 023531. DOI: 10.1063/1.2960340.
11. Dongli Sun, Tao Sun, Qing Wang, Xiuli Han, Qiang Guo, Gaohui Wu. Fabrication of in situ Ti₂AlN/TiAl composites by reaction hot pressing and their properties. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci.* 2014. Vol. 29. Iss. 1. P.126—130. DOI: 10.1007/s11595-014-0879-6.
12. Djedid A., Mecabih S., Abbes O., Abba B. Theoretical investigations of structural, electronic and thermal properties of Ti₂AlX (X = C, N). *Physica B: Condensed Mater.* 2009. Vol. 404. No. 20. P. 3475—3482. DOI: 10.1016/j.physb.2009.05.048.
13. Borysiewicz M.A., Kaminska E., Piotrowska A., Pasternak I., Jakiela R., Dynowska E. Ti—Al—N MAX phase, a candidate for ohmic contacts to n-GaN. *Acta Phys. Polonica A*. 2008. Vol. 114. No. 5. P. 1061—1066. DOI: 10.12693/APhysPolA.114.1061.
14. Scabarozzi T., Ganguly A., Hettinger J.D., Lofland S.E., Amini S., Finkel P., El-Raghy T., Barsoum M.W. Electronic and thermal properties of Ti₃Al(C_{0.5}N_{0.5})₂, Ti₃Al(C_{0.5}N_{0.5})₂, Ti₂Al(C_{0.5}N_{0.5}), Ti₂Al(C_{0.5}N_{0.5}) and Ti₂AlN. *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 104. No. 073713. DOI: 10.1063/1.2979326.
15. Карпов А.В., Морозов Ю.Г., Бунин В.А., Боровинская И.П. Влияние оксида иттрия на электропроводность нитридной СВС-керамики. *Неорган. матер.* 2002. Т. 38. No. 6. С. 762—766.
Karpov A.V., Morozov Yu.G., Bunin V.A., Borovinskaya I.P. Effect of yttrium oxide on electric conductivity of SHS nitrogen ceramics. *Neorganicheskie materialy*. 2002. Vol. 38. No. 6. P. 762—766 (In Russ.).
16. Borovinskaya I.P., Bunin V.A., Vishnyakova G.A., Karpov A.V. Some specific features of synthesis and characteristics of (TiB₂—AlN—BN)-based ceramic materials. *Int. J. SHS*. 1999. Vol. 8. No. 4. P. 451—457.
17. Liu Wulong, Qiu Changjun, Zhou Jie, Ding Zhihui, Zhou Xiaobing, Du Shiyu, Han Young-Hwan, Huang Qing. Fabrication of Ti₂AlN ceramics with orientation growth behavior by the microwave sintering method. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. No. 5. P. 1385—1391. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.11.020.
18. Joelsson T., Horling A., Birch J., Hultman L. Single-crystal Ti₂AlN thin films. *Appl. Phys.* 2005. Vol. 86. No. 111913. DOI: 10.1063/1.1882752.
19. Sundgren J.E., Johansson B.O., Rockett A., Barnett S.A., Greene J.E. Physics and chemistry of protective coatings. *AIP Conf. Proc.* (New York). 1986. No. 149. P. 95.
20. Андриевский Р.А., Калинин Г.В., Кобелев Н.П., Со́йфер Я.М., Штанский Д.В. Структура и физико-механические свойства наноструктурных боронитридных пленок. *ФТТ*. 1997. Т. 39. No. 10. С. 1859—1864.
Andrievsky R.A., Kalinnikov G.V., Kobelev N.P., Soyfer Ya.M., Shtansky D.V. Structure and physicomechanical properties of boron nitride nanostructured films. *Fizika tverdogo tela*. 1997. Vol. 39. No. 10. P. 1859—1864 (In Russ.).
21. Veeraraghavan D., Pilchowski U., Natarajan B., Vasudevan V.K. Phase equilibria and transformations in Ti—(25—52) at.% Al alloys studied by electrical resistivity measurements. *Acta Mater.* 1998. Vol. 46. No. 2. P. 405—421. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00274-7.
22. Григорян А.Э., Елистратов Н.Г., Ковалев Д.Ю., Мерзханов А.Г., Носырев А.Н., Пономарев В.И., Рогачев А.С., Хвесьюк В.И., Цыганков П.А. Автоволновое распространение экзотермических реакций в тонких многослойных пленках системы Ti—Al. *Докл. АН*. 2001. Т. 381. No. 3. С. 368—372.
Grigoryan A.E., Elistratov N.G., Kovalev D. Yu., Merzhanov A.G., Nosyrev A.N., Ponomarev V.I., Rogachev A.S., Khvetsyuk V.I., Tsygankov P.A. Autowave propagation of exothermic reactions in the thin multilayer films of Ti—Al system. *Doklady AN*. 2001. Vol. 381. No. 3. P. 368—372 (In Russ.).
23. Bel'skaya E.A., Kulyamina E.Y. Electrical resistivity of titanium in the temperature range from 290 to 1800 K. *High Temp.* 2007. Vol. 45. No. 785. DOI: 10.1134/S0018151X07060090.