УДК 621.74+669.018

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-2-47-54

СВС-металлургия литых материалов на основе МАХ-фазы Cr_2AlC © 2017 г. **В.А. Горшков, П.А. Милосердов, Н.В. Сачкова, М.А. Лугинина, В.И. Юхвид**Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН) РАН,
Московская обл., г. Черноголовка

Статья поступила в редакцию 12.02.16 г., доработана и подписана в печать 19.02.16 г.

Проведен обзор литературы по строению, свойствам, способам получения и областям применения материалов на основе МАХ-фазы Cr_2AlC . Отмечено, что наиболее перспективным методом получения таких материалов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), одним из направлений которого является СВС-металлургия. В исследованиях в качестве базовой шихты использовали смесь порошков оксидов хрома III и хрома VI квалификации ЧДА, алюминия марки АСД-1 и углерода. Выполнены расчеты адиабатической температуры горения и состава конечных продуктов с использованием специальной программы THERMO. Эксперименты проводили в СВС-реакторе объемом $V = 3 \text{ дм}^3$ при начальном давлении инертного газа (Ar) $P_0 = 5 \text{ МПа}$. В опытах изучено влияние соотношения исходных реагентов на параметры высокотемпературного синтеза (скорость горения, прирост давления, выход целевого продукта), состав и микроструктуру целевых продуктов. Разработан научный подход получения методом СВС-металлургии под давлением газа литых материалов в системе Cr–Al–C, состоящих из МАХ-фазы Cr_2AlC и фаз Cr_3C_2 , Cr_5Al_8 . Изучены структурно-фазовые состояния целевых продуктов. Экспериментально установлено, что, варьируя содержание исходных реагентов (алюминий и углерод) в шихте, можно существенным образом влиять на закономерности синтеза, состав и микроструктуру конечных продуктов. С ростом содержания углерода (выше стехиометрического) в исходной смеси происходят увеличение содержания МАХ-фазы Cr_2AlC в конечном продукте и уменьшение Cr_5Al_8 . Повышение содержания алюминия (выше стехиометрического) в исходной смеси приводит к увеличению содержания МАХ-фазы Cr_2AlC в конечном продукте и уменьшению содержания фазы Cr_3C_2 .

Ключевые слова: СВС-металлургия, СВС-реактор, давление газа, литые материалы, МАХ-фаза Cr_2AlC .

Горшков В.А. – докт. техн. наук, вед. науч. сотрудник лаборатории жидкофазных СВС-процессов и литых материалов ИСМАН (142432, Московская обл., Ногинский р-н, г. Черноголовка, ул. Акад. Осипяна, 8). E-mail: gorsh@ism.ac.ru.

Милосердов П.А. – канд. техн. наук, науч. сотрудник той же лаборатории. E-mail: yu_group@ism.ac.ru.

Сачкова Н.В. – науч. сотрудник лаборатории физического моделирования ИСМАН. E-mail: sem@ism.ac.ru.

Лугинина М.А. – аспирантка лаборатории рентгеноструктурных исследований ИСМАН. E-mail: luginina@ism.ac.ru.

Юхвид В.И. – докт. техн. наук, профессор, зав. лабораторией жидкофазных СВС-процессов и литых материалов ИСМАН. E-mail: yukh@ism.ac.ru.

Для цитирования: Горшков В.А., Милосердов П.А., Сачкова Н.В., Лугинина М.А., Юхвид В.И. СВС-металлургия литых материалов на основе МАХ-фазы Cr_2AlC // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 2. С. 47–54. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-2-47-54.

Gorshkov V.A., Miloserdov P.A., Sachkova N.V., Luginina M.A., Yukhvid V.I.

SHS metallurgy of Cr_2AlC MAX phase based cast materials

The paper reviews literature on the structure, properties, production processes, and fields of application of materials based on the MAX phase Cr_2AlC . It was noted that the most promising method for production of such materials was self-propagating high-temperature synthesis (SHS), with SHS metallurgy being one of its directions. A mixture of AR grade chromium III and chromium VI oxide powders, ASD-1 grade aluminum, and carbon was used as the base charge during studies. The adiabatic combustion temperature and the composition of final products were calculated using the special THERMO program. The experiments were carried out in the SHS reactor with a volume of $V = 3 \text{ дм}^3$ at the initial inert gas pressure (Ar) $P_0 = 5 \text{ МПа}$. The experiments focused on the influence of the starting reagent ratio on parameters of the high-temperature synthesis (burning rate, pressure gain, and yield of the target product), composition and microstructure of target products. The paper develops a scientific approach to the production of cast materials by SHS metallurgy under gas pressure in the Cr–Al–C system consisting of the Cr_2AlC MAX phase, and Cr_5Al_8 and Cr_3C_2 phases. The paper studies structural-phase states of target products. It was experimentally established that by varying the content of starting reagents (aluminum and carbon) in the charge, it was possible to produce a significant effect on synthesis regularities, the composition and microstructure of final products. As the carbon content in the base mixture increases (above the stoichiometric content), the content of the MAX phase Cr_2AlC in the final product increases as well and content of Cr_5Al_8 reduces. An increase in the aluminum content (above stoichiometric) in the base mixture leads to an increase in the MAX phase Cr_2AlC content in the final product and to a reduction in the Cr_3C_2 phase content.

Keywords: SHS metallurgy, SHS reactor, gas pressure, cast materials, Cr_2AlC MAX phase.

Gorshkov V.A. – Dr. Sci. (Tech.), Leading researcher, Laboratory «SHS melts and cast materials», Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS (ISMAN) (142432, Russia, Moscow region, Chernogolovka, Acad. Osipyan str., 8). E-mail: gorsh@ism.ac.ru.

Miloserdov P.A. – Cand. Sci., Junior researcher of the same Laboratory, ISMAN. E-mail: yu_group@ism.ac.ru.

Sachkova N.V. – Senior researcher, Laboratory «Materials Science», ISMAN. E-mail: sem@ism.ac.ru.

Luginina M.A. – Post-graduate student, Laboratory of the X-Ray investigation, ISMAN. E-mail: luginina@ism.ac.ru.

Yukhvid V.I. – Dr. Sci. (Tech.), Head of the Laboratory «SHS melts and cast materials», ISMAN. E-mail: yukh@ism.ac.ru.

Citation: Gorshkov V.A., Miloserdov P.A., Sachkova N.V., Luginina M.A., Yukhvid V.I. SVS-metallurgiya litykh materialov na osnove MAX-fazy Cr_2AlC . *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 2. С. 47–54.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-2-47-54.

Введение

В последнее время в России и за рубежом возник большой научный и практический интерес к МАХ-фазам карбидных и нитридных соединений. МАХ-фазы карбидных соединений описываются общей формулой $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$, где $n = 1, 2$ или 3 , M — переходный металл (как правило, хром или титан), A — преимущественно элемент IIIA и IVA подгрупп Периодической системы, X — углерод. Эти соединения имеют слоистую структуру, в которой слои M_{n+1}X_n чередуются с A . Атомы углерода занимают октаэдрические пустоты, образованные атомами M .

У МАХ-фаз не очень высокая твердость (2–8 ГПа), но они обладают повышенными тепло- и электропроводностью, стойкостью к агрессивным средам, термоударам и имеют низкий коэффициент термического расширения [1–4]. МАХ-фазы Cr_2AlC , полученные методами горячего прессования, имеют высокие механические свойства: плотность — $5,17 \text{ г/см}^3$, твердость по Виккерсу — 4,9 ГПа, прочность на изгиб — $469 \pm 27 \text{ МПа}$, модуль Юнга — 282 ГПа, предел прочности при сжатии — $949 \pm 22 \text{ МПа}$, и устойчивы до 1500°C в атмосфере аргона [5, 6].

Кристаллическая структура МАХ-фазы Cr_2AlC состоит из 6 плотноупакованных слоев, из них четыре — из атомов хрома, два — из атомов алюминия. Периоды решетки гексагональной фазы составляют $a = 2,866 \text{ \AA}$ и $c = 12,82 \text{ \AA}$.

В качестве практического использования МАХ-фаз наибольшее распространение получило их применение для нанесения защитных покрытий. Для получения тонких покрытий разработаны физические (PVD) и химические (CVD) способы осаждения [7]. Эти методы отличаются повышенной сложностью получения однофазных покрытий и необходимостью подогрева подложки. Для получения толстых покрытий на крупногабаритных деталях применяются газотермические мето-

ды [8, 9]. Однако в обоих случаях покрытия не обладают необходимой фазовой чистотой. Перспективной технологией нанесения защитных покрытий является метод электроискрового осаждения (ЭИО), основанный на переносе материала электрода (анода) на деталь (катод) при импульсных разрядах в газовой среде [10–12].

Из способов получения МАХ-фаз Cr_2AlC в литературе наиболее часто представлены методы горячего прессования и плазменного спекания [5, 6, 13–16]. При этом, как правило, процессы проводят при повышенных температурах (1400°C), высоких давлениях прессования (до 20 МПа) и с использованием сложного оборудования. Они малопроизводительны и энергозатратны.

Наиболее перспективным способом получения таких материалов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), одним из направлений которого является СВС-металлургия. В этом методе используют исходные смеси, состоящие из оксидов металлов, металла-восстановителя (алюминия) и неметалла (углерод, бор, кремний). Температуры горения таких смесей превышают, как правило, температуры плавления исходных реагентов и конечных продуктов, получаемых в волне горения в жидкофазном (литом) состоянии [17–20].

Цель данного исследования — разработка научного подхода синтеза методом СВС-металлургии литых материалов в системе $\text{Cr}-\text{Al}-\text{C}$ (МАХ-фазы Cr_2AlC , Cr_3C_2 и Cr_5Al_8) с различным заданным составом и изучение их структурно-фазовых состояний при различных условиях проведения процесса.

Материалы и методы исследования

В экспериментах использовали смеси порошков оксидов хрома III и хрома VI квалификации ЧДА, алюминия марки АСД-1 и углерода.

В экспериментах определяли скорость горения (U_r), прирост давления в реакторе (ΔP) и полноту выхода металлической фазы в слиток (η_1):

$$U_r = h/t,$$

$$\Delta P = P_k - P_0,$$

$$\eta_1 = m_{\text{сл}}/m_{\text{см}} \cdot 100 \%,$$

где h — высота слоя смеси в кварцевом стакане, t — время горения, P_0 и P_k — начальное и конечное давления в реакторе, $m_{\text{см}}$ — масса исходной смеси, $m_{\text{сл}}$ — масса металлической фазы (слитка).

Соотношения компонентов исходной смеси рассчитывали, используя следующую химическую реакцию:

При этом содержание каждого компонента определяли по формуле

$$a_i = m_i/M,$$

где m_i — молекулярный вес одного компонента, M — молекулярный вес всех компонентов смеси.

Перед проведением опытов все реагенты просушивали в сушильном шкафу марки СНОЛ в течение 3 ч при температуре 80 °С. Исходные смеси массой 40 и 100 г готовили вручную в фарфоровой ступке. При изучении закономерностей горения смесей и фазоразделения конечных продуктов образцы шихты сжигали в кварцевых стаканчиках диаметром 16–25 мм и высотой 50–60 мм. При исследовании процессов формирования состава и микроструктуры целевых продуктов исходные смеси ($m_{\text{см}} = 40$ и 100 г) сжигали в графитовых стаканчиках диаметром 30–40 мм и высотой 50–100 мм.

В экспериментах реакционную форму с шихтой помещали в СВС-реактор объемом $V = 3 \text{ дм}^3$, после чего его герметизировали, создавали избыточное давление 5 МПа инертного газа (Ar) и воспламеняли исходную смесь с помощью металлической (Mo, Ni, Cr) спирали путем подачи на нее напряжения $U = 30 \text{ В}$. Процесс горения изучали визуально, а также с помощью видеокамеры.

Фазовый состав продуктов синтеза изучали методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра ДРОН-3М на $\text{CuK}\alpha$ -излучении с монохроматором на вторичном пучке. Съемка велась в режиме пошагового сканирования в интервале углов $2\theta = 10\div 100^\circ$ с шагом съемки $0,02^\circ$ и экспозицией 2 с. Количественный анализ проводили методом Ритвельда. Микроструктуру и

элементный анализ образцов исследовали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) сверхвысокого разрешения ULTRA plus («Zeiss») с системой микроанализа INCA 350 («Oxford Instruments»).

Адиабатическую температуру горения и предполагаемый состав конечных продуктов рассчитывали на персональном компьютере по специальной программе THERMO.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Термодинамический расчет горения смеси, соотношение реагентов которой рассчитано по реакции (1), показал, что $T_r = 3180 \text{ К}$, а конечными продуктами являются $\text{Cr}_2\text{AlC}^{\text{к}}$, $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{к}}$, $\text{Cr}_7\text{C}_3^{\text{к}}$, $\text{Cr}_3\text{C}_2^{\text{к}}$, $\text{Cr}_5\text{Al}_8^{\text{к}}$, $\text{CO}^{\text{г}}$, $\text{CO}_2^{\text{г}}$, $\text{Al}^{\text{г}}$, $\text{AlO}^{\text{г}}$ и $\text{Al}_2\text{O}^{\text{г}}$ (индексы «к» и «г» обозначают конденсированные и газообразные продукты соответственно). При сжигании исходных смесей со стехиометрическим соотношением реагентов, рассчитанным по реакции (1), было обнаружено, что смеси горят в стационарном режиме с ровным фронтом. Скорость горения $U_r = 7,2 \text{ мм/с}$, разброс массы из реакционной формы $\eta_2 \sim 3 \%$.

Конечные продукты в волне горения получают в жидкофазном состоянии и из-за различного удельного веса под действием гравитации разделяются на два слоя: нижний — металлический (Cr—Al—C), верхний — оксидный (Al_2O_3). Выход целевого продукта в слиток $\eta_1 = 44 \%$.

По данным рентгенофазового (рис. 1) и локального микроструктурного (рис. 2) анализов целевой продукт состоит в основном из МАХ-фазы Cr_2AlC

Рис. 1. Дифрактограмма (фазовый состав) образца, полученного из стехиометрической смеси по реакции (1)

Spect.	C	Al	Cr	Фаза*
1	8,6	18,7	72,7	Cr_2AlC
2	8,4	18,4	73,2	Cr_2AlC
3	0,3	44,2	55,5	Cr_3Al_8
4	0,1	44,5	55,4	Cr_3Al_8
5	15,5	0,4	84,1	Cr_3C_2
6	14,9	0,3	84,8	Cr_3C_2

* Определение фаз проводили по результатам рентгенофазового и локального микроструктурного анализов. Все результаты приведены в мас. %

Рис. 2. Микроструктура, элементный и фазовый составы металлического слитка, полученного из стехиометрической смеси по реакции (1)

Рис. 3. Строение и микроструктура излома поверхности металлического образца, полученного из стехиометрической смеси (1)

и небольшого количества фаз Cr_7C_3 и Cr_5Al_8 . Дифракционные линии МАХ-фазы Cr_2AlC узкие (рис. 1), что свидетельствует о высокой степени совершенства ее кристаллической структуры. Параметры элементарной ячейки экспериментально полученной МАХ-фазы Cr_2AlC ($a = 0,286$, $c = 1,283$) практически совпадают с теоретическими данными ($a = 0,286$, $c = 1,282$) параметров ячейки соот-

ветствующей фазы кристаллографической базы данных PDF2. Количественный анализ, проведенный методом Ритвельда, показал, что содержание фазы Cr_2AlC составляет 86 %, а Cr_7C_3 — 14 %.

На рис. 3 и рис. 4 представлены микроструктуры поверхности излома слитка. Видно, что материал имеет слоистую структуру. При этом наблюдается наноламинатная структура с толщиной слоев

Рис. 4. Строение и микроструктура поверхности излома образца в поровом пространстве, полученного из стехиометрической смеси по реакции (1)

от 3 до 20 нм (см. рис. 3, з). В поровом пространстве образца формируется гофрированная наноламинатная структура (см. рис. 4).

Наличие фаз карбидов и алюминидов хрома в конечном целевом продукте объясняется тем, что СВС-металлургия — это сложный и многостадийный процесс [18–20]. Во время горения исходной смеси (1) углерод и алюминий в волне горения образуют газообразные продукты (CO , CO_2 , Al , AlO , Al_2O) и удаляются из расплава, в результате чего в системе образуется их дефицит по сравнению со стехиометрическим содержанием, что приводит к образованию фаз Cr_5Al_8 , Cr_7C_3 и Cr_3C_2 .

В последующих экспериментах изучали влияние сверхстехиометрического содержания углерода (ΔC) на закономерности синтеза, формирование состава и структуры конечных продуктов. При этом содержание углерода рассчитывали по формуле

$$\Delta\text{C} = (M_{\text{C}} - M_{\text{C}}^{\text{стех}})/M_{\text{C}}^{\text{стех}} \cdot 100 \%,$$

где M_{C} — масса углерода в шихте, а $M_{\text{C}}^{\text{стех}}$ — в стехиометрической смеси (1).

По данным термодинамического расчета при увеличении ΔC от 0 до 50 % температура горения (T_{r}) падает с 3180 до 2920 К, и происходит снижение доли газообразных продуктов с 13 до 9 %.

Из результатов экспериментов следует (рис. 5), что с ростом содержания углерода в исходной смеси происходит снижение скорости горения, разброса реакционной массы и выхода целевого продукта в слиток, что объясняется падением температуры горения. С увеличением доли ΔC в конечных про-

Рис. 5. Влияние содержания избытка углерода (ΔC) в смеси на скорость горения (U_r), прирост давления (ΔP), выход целевого продукта в слиток (η_1) и разброс (η_2)

Рис. 6. Дифрактограмма (фазовый состав) образца, полученного из стехиометрической смеси (1) при $\Delta\text{C} = 20 \%$

дуктах растет содержание МАХ-фазы Cr_2AlC , а фаза Cr_7C_3 переходит в Cr_3C_2 (рис. 6).

На следующем этапе исследований изучали влияние сверхстехиометрического содержания алюминия (ΔAl) на закономерности синтеза, формирование состава и структуры конечных продуктов. При этом содержание алюминия в шихте рассчитывали по формуле

$$\Delta\text{Al} = (M_{\text{Al}} - M_{\text{Al}}^{\text{стех}})/M_{\text{Al}}^{\text{стех}} \cdot 100 \%,$$

где M_{Al} — масса алюминия в шихте, а $M_{\text{Al}}^{\text{стех}}$ — в стехиометрической смеси, полученной по реакции (1).

Термодинамический расчет показал, что при увеличении избытка алюминия (ΔAl) от 0 до 50 % величина T_{r} падает с 3180 до 3000 К, что, в свою очередь, обуславливает снижение доли газообразных продуктов.

Рис. 7. Влияние содержания избытка алюминия (ΔAl) в смеси на скорость горения (U_r), прирост давления (ΔP), выход целевого продукта в слиток (η_1) и разброс (η_2)

Рис. 8. Дифрактограмма (фазовый состав) образца, полученного из стехиометрической смеси (1) при $\Delta Al = 20 \%$

Таким образом, из результатов экспериментов следует (рис. 7), что с увеличением ΔAl в исходной смеси происходит падение скорости горения и разброса реакционной массы при росте выхода целевого продукта в слиток. Конечные продукты при этом состоят из МАХ-фазы Cr_2AlC и фазы Cr_3Al_8 (рис. 8).

Заключение

Таким образом, в работе показано, что методом СВС-металлургии в условиях избыточного давления газа из смеси со стехиометрическим соотношением компонентов согласно (1) получены литые материалы, состоящие из МАХ-фазы Cr_2AlC , а также фаз Cr_3C_2 и Cr_3Al_8 . Присутствие карбида и алюминиды хрома в конечном продукте связано, по-видимому, с дефицитом углерода и алюминия

из-за их участия в окислительно-восстановительной реакции с образованием газообразных оксидов и субоксидов (CO^r , CO_2^r , Al^r , AlO^r и Al_2O^r), улетучивающихся из расплава.

Анализ результатов данного исследования и полученных в предыдущих работах по СВС-металлургии [17–20] свидетельствует о стадийности протекания химических превращений в волне горения. В зоне прогрева, после плавления исходного оксида, образуется сплошная среда, в которой распределены капли алюминия и частицы углерода. В начале зоны химического превращения они взаимодействуют с исходным оксидом независимо друг от друга:

Затем, после образования между ними «мостика» из Al_2O_3 , протекают обменные реакции и происходит карбидизация металла, восстановленного по реакции (2):

Таким образом, в рамках рассмотренной схемы формируются два конденсированных продукта $Me-Al-C$ и Al_2O_3 , а также газ CO . Реально, согласно термодинамическим данным, образуются и другие газы — пары металлов и субоксиды (CO^r , CO_2^r , Al^r , AlO^r и Al_2O^r).

Экспериментально установлено, что, варьируя количество исходных реагентов (алюминий и углерод) в шихте, можно существенным образом влиять на закономерности синтеза, состав и микроструктуру конечных целевых продуктов. С повышением содержания (выше стехиометрического) углерода в исходной смеси происходит увеличение концентрации МАХ-фазы Cr_2AlC в конечном продукте и уменьшение доли фазы Cr_3Al_8 . Повышение содержания (выше стехиометрического) алюминия в исходной смеси приводит к росту количества МАХ-фазы Cr_2AlC в конечном продукте и снижению содержания Cr_3C_2 .

Из анализа результатов проведенных исследований следует, что методом СВС-металлургии можно синтезировать литые материалы, состоящие из МАХ-фазы Cr_2AlC и фаз Cr_3C_2 , Cr_3Al_8 с различным их содержанием.

Авторы выражают благодарность и.о. заведующего лабораторией №8 ИСМАН, канд. техн. наук А.Е. Сычеву за участие в подготовке материала статьи.

Литература

1. Barsoum M.W., E-Raghy T. The MAX phases: Unique new carbide and nitride materials // *Amer. Sci.* 2001. Vol. 89. No. 4. P. 336—345.
2. Tzenov N.V., Barsoum M.W. Synthesis and characterization of $Ti_3AlC_{1.8}$ // *J. Amer. Ceram. Soc.* 2000. Vol. 83. No. 4. P. 825—832.
3. Barsoum M.W., Radovic M. Elastic and mechanical properties of the MAX phases // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2011. Vol. 41. P. 195—227.
4. Li H., Li S., Zhou Y. Cyclic thermal shock behavior of a Cr_2AlC ceramic // *Mater. Sci. Eng. A.* 2014. Vol. 607. P. 525—529.
5. Ying G., He X., Li M. Du S., Han W., He F. Synthesis and mechanical properties of high-purity Cr_2AlC ceramic // *Mater. Sci. Eng. A.* 2011. Vol. 528. P. 2635—2640.
6. Xiao Li.O., Li S.B., Song G., Sloof W.G. Synthesis and thermal stability of Cr_2AlC // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011. Vol. 31. P. 1497—1502.
7. Eklund P., Beckers M., Jansson U. Högborg H., Hultman L. The $M_{n+1}AX_n$ phases: Materials science and thin-film processing // *Thin Solid Films.* 2010. Vol. 518(8). P. 1851—1878.
8. Frodelius J., Sonestedt M., Bjorklund S. Palmquist, J., Stiller K., Högborg, H., Hultman L. Ti_2AlC coatings deposited by high velocity oxy-fuel spraying // *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 5976—5981.
9. Pasumarthi V., Chen Y., Bakchi S.R. Agarwal A. Reaction synthesis of Ti_3SiC_2 phase in plasma sprayed coating // *J. Alloy. Compd.* 2009. Vol. 484. P. 113—117.
10. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М.: Наука, 1988.
11. Замулаева Е.И., Левашов А.Е., Свиридова Т.А., Швындина Н.В., Петржик М.И. Электроискровое осаждение защитных покрытий на основе МАХ-фаз // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2013. No. 3. С. 73—81.
12. Гутлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985.
13. Li S.B., Yu W.B., Zhai H.X., Song G.M., Sloof W.G., Zwaag S. Mechanical properties of low temperature synthesized dense and fine-grained Cr_2AlC ceramics // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011. No. 31. P. 217—224.
14. Zhou W.B., Mei B.C., Zhu J.Q. On the synthesis and properties of bulk ternary Cr_2AlC ceramics // *Mater. Sci.-Pol.* 2009. Vol. 27. No. 4/1. P. 973—980.
15. Zhu J., Jiang H., Wang F., Yang C., Xiao D. Synthesis, microstructure and mechanical properties of Cr_2AlC // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014. Vol. 34. P. 4137—4144.
16. Duan X., Shen L., Jia D., Zhou Y., Zwaag S., Sloof W.G. Synthesis of high-purity, isotropic or textured Cr_2AlC bulk ceramics by spark plasma sintering of pressure-less sintered powders // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. P. 1393—1400.
17. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Физическая химия. Современные проблемы. М.: Химия, 1983.
18. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В., Максимов Ю.М., Юхвид В.И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: МИСиС, 2011.
19. Горшков В.А., Качин А.Р., Юхвид В.И. СВС-металлургия литого композиционного материала Cr_3C_2 —NiAl и защитные покрытия на его основе // *Перспект. матер.* 2014. No. 10. С. 60—67.
20. Miloserdov P.A., Gorshkov V.A., Yuxhvid V.I. High-temperature synthesis of cast Cr_2AlC at an inert gas overpressure // *Inorg. Mater.* 2013. Vol. 49. No. 8. P. 781—785.

References

1. Barsoum M.W., E-Raghy T. The MAX phases: Unique new carbide and nitride materials. *Amer. Sci.* 2001. Vol. 89. No. 4. P. 336—345.
2. Tzenov N.V., Barsoum M.W. Synthesis and characterization of $Ti_3AlC_{1.8}$. *J. Amer. Ceram. Soc.* 2000. Vol. 83. No. 4. P. 825—832.
3. Barsoum M.W., Radovic M. Elastic and mechanical properties of the MAX phases. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2011. Vol. 41. P. 195—227.
4. Li H., Li S., Zhou Y. Cyclic thermal shock behavior of a Cr_2AlC ceramic. *Mater. Sci. Eng. A.* 2014. Vol. 607. P. 525—529.
5. Ying G., He X., Li M. Du S., Han W., He F. Synthesis and mechanical properties of high-purity Cr_2AlC ceramic. *Mater. Sci. Eng. A.* 2011. Vol. 528. P. 2635—2640.
6. Xiao Li.O., Li S.B., Song G., Sloof W.G. Synthesis and thermal stability of Cr_2AlC . *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011. Vol. 31. P. 1497—1502.
7. Eklund P., Beckers M., Jansson U. Högborg H., Hultman L. The $M_{n+1}AX_n$ phases: Materials science and thin-film processing. *Thin Solid Films.* 2010. Vol. 518(8). P. 1851—1878.
8. Frodelius J., Sonestedt M., Bjorklund S. Palmquist, J., Stiller K., Högborg, H., Hultman L. Ti_2AlC coatings deposited by high velocity oxy-fuel spraying. *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 5976—5981.

9. Pasumarthi V., Chen Y., Bakchi S.R., Agarwal A. Reaction synthesis of Ti_3SiC_2 phase in plasma sprayed coating. *J. Alloy. Compd.* 2009. Vol. 484. P. 113—117.
10. Verhoturov A.D., Podchernyaeva I.A., Pryadko L.F., Egorov F.F. Elektroodnye materialy dlya elektroiskrovogo legirovaniya [Electrode materials for spark alloying]. Moscow: Nauka, 1988.
11. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Sviridova T.A., Shvyndina N.V., Petrzhek M.I. Elektroiskrovoe osazhdenie zaschitnykh pokrytii na osnove MAX-faz [Electrospark sedimentation of protective coatings on the basis of MAX-phases]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2013. No. 3. C. 73—81.
12. Gitlevich A.E., Mihailov V.V., Parkanskii N.Ya., Revutskii V.M. Elektroiskrovoe legirovanie metallicheskih pokrytii [Electric spark doping of metal surfaces]. Kishinev: Shtinitsa, 1985.
13. Li S.B., Yu W.B., Zhai H.X., Song G.M., Sloof W.G., Zwaag S. Mechanical properties of low temperature synthesized dense and fine-grained Cr_2AlC ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011. No. 31. P. 217—224.
14. Zhou W.B., Mei B.C., Zhu J.Q. On the synthesis and properties of bulk ternary Cr_2AlC ceramics. *Mater. Sci.-Pol.* 2009. Vol. 27. No. 4/1. P. 973—980.
15. Zhu J., Jiang H., Wang F., Yang C., Xiao D. Synthesis, microstructure and mechanical properties of Cr_2AlC . *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014. Vol. 34. P. 4137—4144.
16. Duan X., Shen L., Jia D., Zhou Y., Zwaag S., Sloof W.G. Synthesis of high-purity, isotropic or textured Cr_2AlC bulk ceramics by spark plasma sintering of pressure-less sintered powders. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. P. 1393—1400.
17. Merzhanov A.G. Samorasprostranyayuschiysya vysokotemperaturnyi sintez. Fizicheskaya khimiya. Sovremennye problemy [Self-propagating high-temperature synthesis. Physical chemistry. Modern problems]. Moscow: Khimiya, 1983.
18. Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V., Maksimov Yu.M., Yukhvid V.I. Perspektivnye materialy i tekhnologii samorasprostranyayuschegosya vysokotemperaturnogo sinteza [Advanced materials and technology of Self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow: MISIS, 2011.
19. Gorshkov V.A., Kachin A.R., Yukhvid V.I. SVS—metallurgiya litogo kompozitsionnogo materiala Cr_3C_2 —NiAl i zaschitnye pokrytiya na ego osnove [SHS metallurgy cast Cr_3C_2 —NiAl composite material and protective coatings based on it]. *Persp. Mat.* 2014. No 10. P. 60—67.
20. Miloserdov P.A., Gorshkov V.A., Yukhvid V.I. High-temperature synthesis of cast Cr_2AlC at an inert gas overpressure. *Inorg. Mater.* 2013. Vol. 49. No. 8. P. 781—785.