

УДК 621.74

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-14-20

Получение литых материалов на основе МАХ-фазы Cr₂AlC методом СВС-металлургии с использованием химически сопряженных реакций

© 2019 г. В.А. Горшков, П.А. Милосердов, Н.Ю. Хоменко, Н.В. Сачкова

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (ИСМАН), г. Черноголовка

Статья поступила в редакцию 31.05.19 г., доработана 13.08.19 г., подписана в печать 16.08.19 г.

Известно, что материалы на основе МАХ-фаз обладают большим потенциалом для использования в аэрокосмической, автомобильной и индустриальной сферах, поскольку имеют уникальное сочетание особенностей как металлов, так и керамики с высокими механическими, химическими, тепловыми и электрическими свойствами. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты получения методом СВС-металлургии литых материалов в системе Cr–Al–C с различным соотношением между МАХ-фазой Cr₂AlC, карбидами и алюминиды хрома. Опыты проводили в СВС-реакторе объемом 3 л при начальном давлении инертного газа (аргона) 5 МПа. Процесс синтеза осуществляли на основе химически сопряженных реакций: слабо экзотермической (акцептор тепла) – Cr₂O₃/3Al/C и сильно экзотермической (донора тепла) – 3CaO₂/2Al. Полученные экспериментальные результаты имеют хорошую корреляцию с предварительно проведенными термодинамическими расчетами. Показано, что, варьируя состав исходных смесей, можно существенно влиять на расчетные и экспериментальные параметры синтеза, а также на фазовый состав и микроструктуру конечных продуктов. Установлены оптимальные условия синтеза материала, обеспечивающие максимальный выход МАХ-фазы Cr₂AlC в составе слитка. Определяющим фактором, влияющим на содержание Cr₂AlC в конечном продукте, является время существования жидкой фазы в условиях синтеза. Показано, что максимальное содержание МАХ-фазы Cr₂AlC и выход целевого продукта достигаются при 30 %-ном содержании сильно экзотермической добавки (3CaO₂/2Al) в исходной шихте.

Ключевые слова: МАХ-фаза Cr₂AlC, СВС-металлургия, СВС-реактор, давление газа, литые материалы.

Горшков В.А. – докт. техн. наук, вед. науч. сотр. лаборатории «Жидкофазные СВС-процессы и литые материалы» ИСМАН (142432, Московская обл., Ногинский р-н, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8). E-mail: gorsh@ism.ac.ru.

Милосердов П.А. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Жидкофазные СВС-процессы и литые материалы» ИСМАН. E-mail: yu_group@ism.ac.ru.

Хоменко Н.Ю. – мл. науч. сотр. лаборатории рентгеноструктурных исследований ИСМАН. E-mail: natashayrievna@gmail.com.

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

Для цитирования: Горшков В.А., Милосердов П.А., Хоменко Н.Ю., Сачкова Н.В. Получение литых материалов на основе МАХ-фазы Cr₂AlC методом СВС-металлургии с использованием химически сопряженных реакций. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2019. No. 4. С. 14–20. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-14-20.

Gorshkov V.A., Miloserdov P.A., Khomenko N.Yu., Sachkova N.V.

Production of cast materials based on Cr₂AlC MAX phase by SHS metallurgy using coupled chemical reactions

It is known that materials based on MAX phases have great potential for aerospace, automotive and industrial applications due to a unique combination of features offered by both metals and ceramics with high mechanical, chemical, thermal and electrical properties. This paper provides the results obtained by the SHS metallurgy of Cr–Al–C materials with different ratios between the MAX-Cr₂AlC phase, carbides and chromium aluminides. Experiments were carried out in a 3-liter SHS reactor at an initial pressure of inert gas (Ar) of 5 MPa. The synthesis process was carried out based on coupled chemical reactions: weakly exothermic (heat acceptor) – Cr₂O₃/3Al/C and strongly exothermic (heat donor) – 3CaO₂/2Al. The obtained experimental results have a good correlation with previously performed thermodynamic calculations. It is shown that varying the composition of the initial mixtures can significantly influence the calculated and experimental synthesis parameters as well as the phase composition and microstructure of final products. The paper establishes optimal conditions for material synthesis providing a maximum output of the Cr₂AlC MAX phase in the ingot composition. A determining factor influencing the Cr₂AlC content in the final product is the time of liquid phase presence under synthesis conditions. It is shown that the maximum content of the Cr₂AlC MAX phase and the target product yield is achieved at the highly exothermic additive (3CaO₂/2Al) content of 30 % in the initial mixture.

Keywords: Cr₂AlC MAX phase, SHS metallurgy, SHS reactor, gas pressure, cast materials.

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

Miloserdov P.A. – Cand. Sci. (Tech.), senior researcher of Laboratory «SHS melts and cast materials», ISMAN. E-mail: yu_group@ism.ac.ru.

Khomenko N.Yu. – junior researcher of Laboratory of X-ray investigation, ISMAN. E-mail: natashayrievna@gmail.com.

Sachkova N.V. – researcher of Laboratory of materials science, ISMAN. E-mail: sem@ism.ac.ru.

Citation: Gorshkov V.A., Miloserdov P.A., Khomenko N.Yu., Sachkova N.V. Production of cast materials based on Cr₂AlC MAX phase by SHS metallurgy using coupled chemical reactions. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2019. No. 4. P. 14–20 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-14-20.

Введение

МАХ-фазы характеризуются гексагональной плотной упаковкой P_6/mmc и имеют слоистую кристаллическую структуру, в которой карбидные или нитридные блоки $[M_{n+1}X_n]$ разделены моно-слоями атомов элементов IIIA–VIA групп [1]. Интерес к подобным соединениям обусловлен необычной комбинацией физико-химических свойств, связанных со слоистостью на уровне кристаллической структуры. МАХ-фазы сочетают свойства керамики и металлов, что делает их перспективными материалами для использования в условиях высоких температур и окислительных сред [2–4]. Подобно металлам они характеризуются высокой электро- и теплопроводностью, легко обрабатываются, не чувствительны к термоударам. Подобно керамике они имеют низкую плотность, обладают высокими модулями упругости, жаростойкостью и жаропрочностью [5–7].

В литературе описаны способы получения МАХ-фазы Cr₂AlC методами горячего прессования, плазменно-искрового спекания, безпористого спекания (PLS) элементарных порошков с последующим плазменно-искровым спеканием (SPS) и т.д. [8–12]. Эти процессы проводят при высоких температурах (1400 °С), высоких давлениях прессования (до 20 МПа) и сложном оборудовании. Они малопроизводительны и энергозатратны. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является наиболее перспективным способом получения таких материалов в одну стадию. Этот метод практически не требует затрат электро-энергии, обладает высокой производительностью и экологической чистотой [13, 14].

Методом СВС из элементов были получены МАХ-фазы Ti₂AlC, Ti₃AlC₂, Ti₃SiC₂ [15–17]. Одним из направлений самораспространяющегося высокотемпературного синтеза является СВС-металлургия [18, 19]. В этом способе в качестве исходных

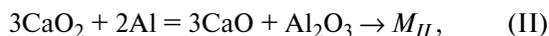
смесей используют шихты, состоящие из оксидов металлов, металла-восстановителя (алюминия) и неметалла (углерод, бор, кремний). Температуры горения таких смесей, как правило, превышают температуры плавления исходных реагентов и конечных продуктов, получаемых в волне горения в жидкофазном («литом») состоянии. Ранее авторы [20–22] при синтезе материалов с различным содержанием МАХ-фазы Cr₂AlC в исходных смесях применяли хромовый ангидрид (CrO₃), который имеет высокую гигроскопичность и термическую нестабильность, что ограничивает практическую реализацию метода. В настоящей работе для повышения температуры горения базовой смеси (Cr₂O₃/Al/C) использовали высокоэкзотермическую смесь на основе пероксида кальция (CaO₂), который имеет более высокую термическую стабильность и малую гигроскопичность по сравнению с CrO₃. Процесс синтеза проводили на основе химически сопряженных реакций: слабо экзотермической (акцептор тепла) — Cr₂O₃/3Al/C и сильно экзотермической (донора тепла) — 3CaO₂/2Al.

Целью работы являлось исследование закономерностей высокотемпературного синтеза литых материалов на основе МАХ-фазы Cr₂AlC с использованием исходных смесей из порошков пероксида кальция (CaO₂), оксида хрома (Cr₂O₃), алюминия и углерода.

Методики исследований

В опытах были использованы смеси порошков пероксида кальция марки ЧДА, оксида хрома (III) марки ОСЧ, алюминия АСД-1 и графита марки ГМЗ с размером частиц менее 100 мкм. Исходные смеси готовили в фарфоровой ступке. В экспериментах в качестве базовых применяли стехиоме-

трические смеси, состав которых рассчитывали из следующих химических реакций:



а также их комбинации в различных соотношениях $\alpha = [M_{II}/(M_I + M_{II})] \cdot 100\%$, где M_I , M_{II} — соответственно массы смесей *I* и *II*. Эти реакции можно рассматривать как химически сопряженные процессы. Термин «сопряженные реакции» используется для обозначения такой системы двух протекающих в одной среде реакций, из которых одна зависит в своем течении от другой. Следует отметить, что «чисто» химическое сопряжение осуществляется в изотермических условиях, когда перенос химической энергии от реакции, дающей эту энергию, к реакции, ее акцептирующую, возможен только при наличии общего промежуточного продукта. Применительно к СВС идея организации сопряженных процессов принадлежит акад. А.Г. Мержанову. Он дал следующее определение сопряженных СВС-процессов: «...это процессы, в которых основная слабо экзотермическая реакция (акцептор тепла) протекает одновременно с другой сильно экзотермической (донор тепла)» [23, 24].

Готовые шихты помещали в прозрачные кварцевые стаканчики диаметром 15–25 мм и высотой 50–60 мм. Масса смеси во всех экспериментах составляла 20 г. Синтезы проводили в СВС-реакторе объемом 3 л при начальном избыточном давлении аргона 5 МПа. В экспериментах определяли скорость горения $U = h/t$, прирост давления в реакторе $\Delta P = (P_K - P_H)/P_H$, относительный выход целевой фазы в слиток $\eta_1 = (M_{\text{сл}}/M_{\text{см}}) \cdot 100\%$, выход целевой фазы в слиток относительно расчетного значения $\eta_2 = (M_{\text{сл}}/M_{\text{сл}}^{\text{расч}}) \cdot 100\%$, потерю массы при горении $\eta_3 = (\Delta M/M_{\text{см}}) \cdot 100\%$, где h — высота слоя смеси в кварцевом стаканчике; t — время горения; P_H , P_K — соответственно начальное и конечное давление в реакторе; $M_{\text{сл}}$ — масса слитка целевого продукта; $M_{\text{сл}}^{\text{расч}}$ — расчетная масса слитка; $M_{\text{см}}$ — масса исходной смеси; ΔM — потеря (диспергирование) массы при горении.

Время горения смеси измеряли с помощью секундомера и по видеозаписи. Фазовый состав определяли методом рентгеновской дифрактометрии на установке ARL X'TRA (Thermo Scientific, Швейцария). Для идентификации фазового состава продуктов горения применяли банк данных Powder Diffraction File (PDF2). Регистрация

рентгенограмм велась в режиме пошагового сканирования в интервале углов $2\theta = 10 \div 90^\circ$ с шагом съемки $0,02^\circ$ и экспозицией 2 с. Количественное соотношение фаз определяли методом Ритвельда в программном пакете PDWin 6.0 с использованием известных структурных данных полученных фаз. Проводилось уточнение фона, профильных параметров дифракционных линий и параметров элементарной ячейки. Рассчитанные в процессе уточнения взвешенный и профильный R -факторы лежат в интервалах $R_w = 8 \div 10\%$, $R_p = 6 \div 7\%$. Для исследования микроструктуры, структурных составляющих продуктов синтеза применяли автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп сверхвысокого разрешения «Zeiss Ultra plus» на базе «Ultra 55» (Carl Zeiss, Германия) с приставкой рентгеновского микроанализа «INCA Energy 350 XT» (Oxford Instruments Co., Великобритания). Расчет адиабатической температуры горения и соотношения фаз конечных продуктов осуществляли с помощью программы THERMO [25].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Расчеты показали, что увеличение содержания (α) в шихте сильно экзотермической смеси *II* (донора тепла) от 0 до 100 % приводит к росту адиабатической температуры горения от 2320 до 4250 К (рис. 1). Установлено, что температура горения превышает температуры плавления конечных продуктов (Cr_2AlC и Al_2O_3) при $\alpha \geq 10\%$. На всем

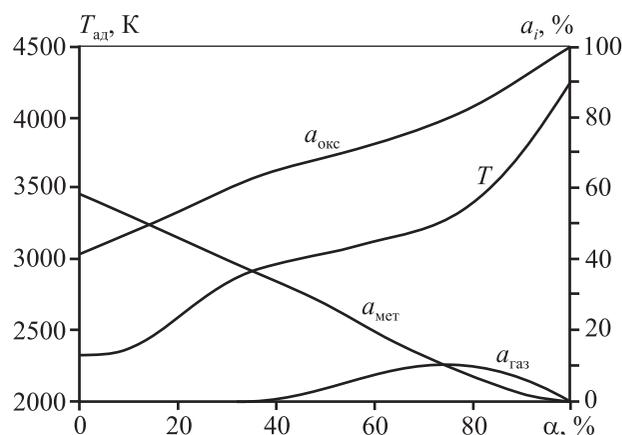


Рис. 1. Влияние соотношения реагентов (α) на расчетные параметры синтеза: адиабатическую температуру горения ($T_{\text{ад}}$), целевую ($a_{\text{мет}}$), оксидную ($a_{\text{окс}}$) и газообразную ($a_{\text{газ}}$) фазы конечных продуктов

интервале изменения α выход целевой фазы ($a_{мет}$) уменьшается, а оксидной ($a_{окс}$) — растет. При этом заметное количество газообразной фазы ($a_{газ}$) образуется при $\alpha > 40\%$, что может привести к увеличению диспергирования массы продуктов горения из реакционной формы.

Анализ результатов термодинамических расчетов показал, что для получения конечных продуктов в литом (жидкофазном) состоянии при незначительном разбросе массы оптимальным интервалом изменения α являются значения от 10 до 40 %.

На рис. 2 представлены зависимости скорости горения (U) и прироста давления (ΔP) в реакторе от α . Видно, что кривые этих зависимостей с увеличением α растут.

Влияние соотношения реагентов на выход целевого продукта относительно массы смеси (η_1), относительно расчетного значения (η_2) и на потерю массы при горении (η_3) показано на рис. 3. Рост кривых η_1 и η_2 наблюдается в интервале изменения α от 0 до 30 %, после чего происходит их спад. Диспергирование массы (η_3) при этом незначительное и не превышает 6 %.

Рентгенофазовый анализ целевых продуктов показал, что основой материала является МАХ-фаза Cr_2AlC , присутствуют также вторичные фазы — карбиды Cr_3C_2 , Cr_7C_3 и алюминид хрома Al_8Cr_5 (рис. 4). Наличие оксидов Al_2O_3 и CaO в продукте не обнаружено, что свидетельствует о полном фазоразделении «металлической» и оксидной составляющих слитка. Дифракционные линии фазы Cr_2AlC узкие, что указывает на высокую степень совершенства ее структуры, сформированной в условиях кристаллизации из жидкой фазы. Содержание фазы Cr_2AlC изменяется в пределах 53—66 мас.% и зависит от соотношения реагентов в исходной смеси, т.е. от параметра α (см. таблицу). При увеличении α от 10 до 30 % наблюдается рост содержания в материале МАХ-фазы Cr_2AlC . Максимальное ее количество достигается

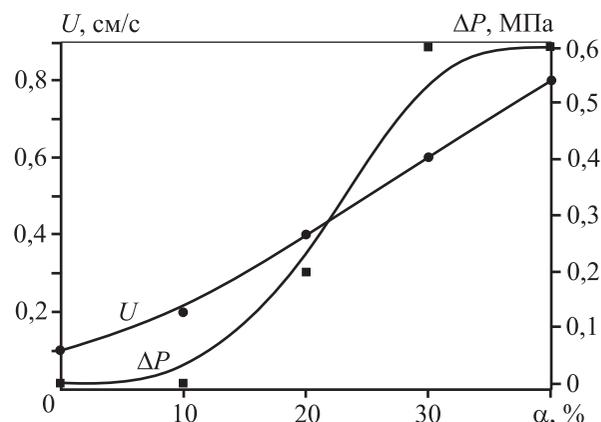


Рис. 2. Влияние соотношения реагентов (α) на скорость горения (U) и прирост давления (ΔP) в реакторе

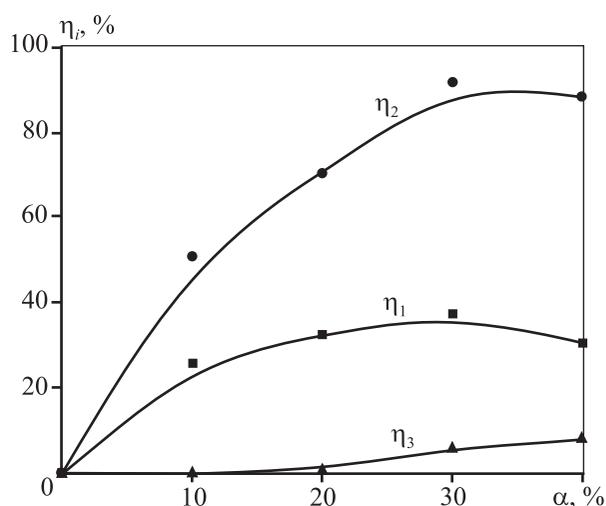


Рис. 3. Влияние соотношения реагентов (α) на выход целевого продукта относительно массы смеси (η_1), относительно расчетного значения (η_2) и на потерю массы (диспергирование) при горении (η_3)

при $\alpha = 30\%$, после чего происходит уменьшение (рис. 5).

На рис. 6 представлена микроструктура целевого продукта, полученного при $\alpha = 30\%$. Видно, что продукт состоит из зерен МАХ-фазы Cr_2AlC

Содержание фаз, мас.%, в целевом продукте

$\alpha, \%$	Cr_2AlC P6 ₃ /mmc Card № 65-3492	Cr_3C_2 Pnma Card № 65-2427	Cr_7C_3 Pmcn Card № 36-1482	Al_8Cr_5 R3m:R Card № 29-0015
10	53	20	8	19
20	57	13	8	22
30	66	8	8	18
40	58	5	22	15

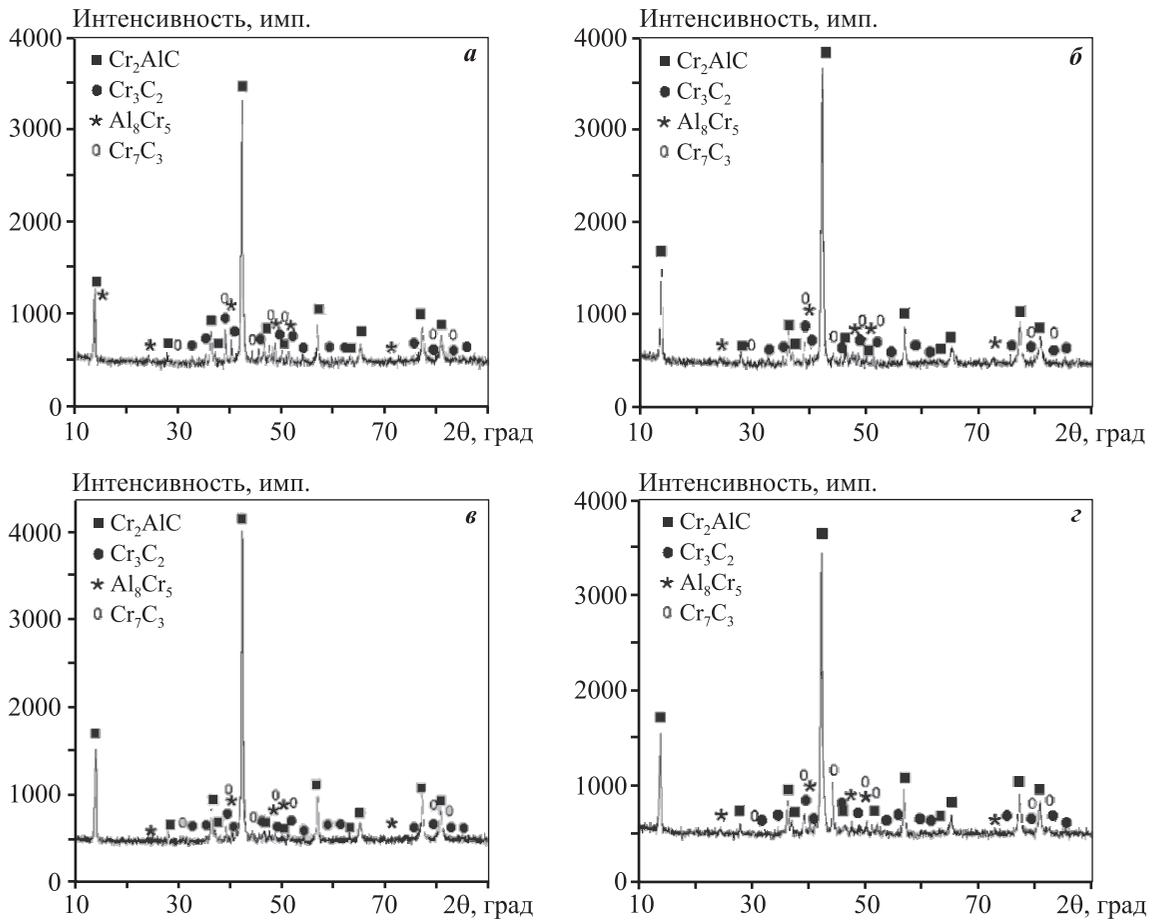


Рис. 4. Дифрактограммы образцов, полученных при различных значениях α
 α , %: а – 10, б – 20, в – 30, г – 40

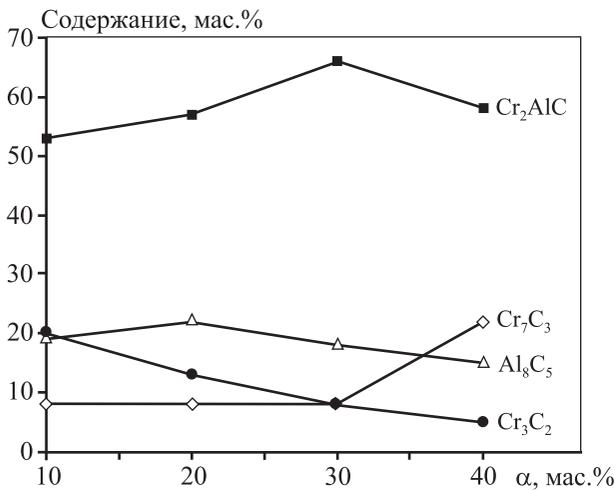


Рис. 5. Влияние α на соотношение фаз в конечных продуктах

(серый цвет), светло-серых зерен карбидов хрома (Cr₃C₂) и темно-серых зерен алюминидов хрома (Al₈Cr₅). Типичные микрофотографии поперечного сечения и разрушения образца

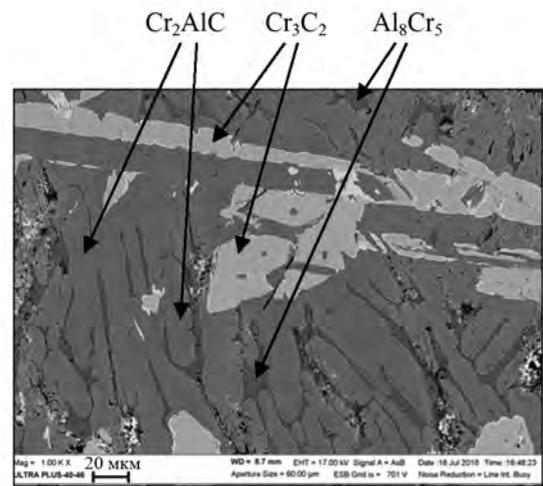


Рис. 6. Микроструктура целевого продукта, полученного при $\alpha = 30$ %

показаны на рис. 7. Видно, что материал имеет слоистую наноламинантную структуру, характерную для МАХ-фаз.

Анализ полученных результатов показал, что,

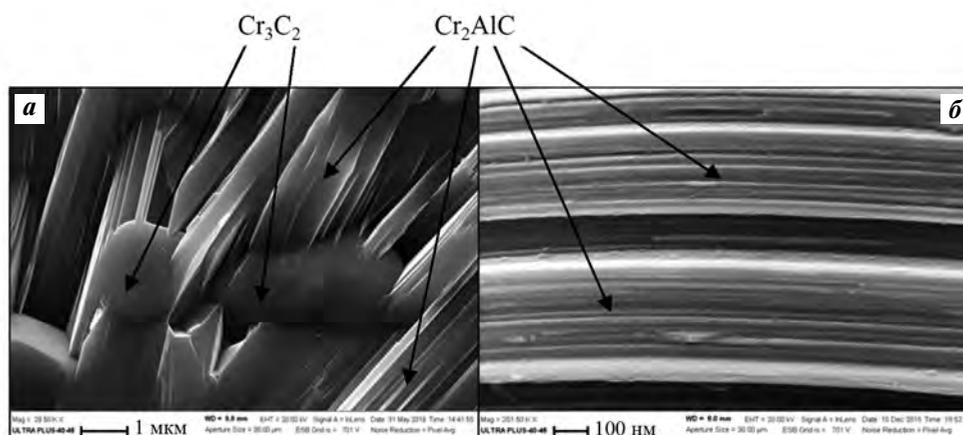


Рис. 7. Характерная микроструктура поверхности излома (а) и вид зерен МАХ-фазы Cr₂AlC (б)

варьируя состав исходных смесей, можно существенным образом влиять как на параметры синтеза (U , ΔP , η_1 , η_2 , η_3), так и на фазовый состав и микроструктуру целевых продуктов. Наблюдается корреляция экспериментальной зависимости скорости горения (U) и расчетной адиабатической температуры горения ($T_{ад}$) от α , что соответствует представлениям теории горения. Величина $T_{ад}$ растет при изменении α от 0 до 100 % (см. рис. 1), а повышение выхода целевого продукта в слиток (η_1 и η_2) наблюдается в интервале $\alpha = 0-30$ % (см. рис. 3). Следует отметить, что при увеличении α одновременно с температурой горения растет доля оксидной фазы в исходной смеси, что и приводит в дальнейшем (при $\alpha > 30$ %) к падению выхода целевого продукта. В результате максимальный выход целевого продукта из смеси и наибольшее содержание МАХ-фазы Cr₂AlC в конечном продукте получены при $\alpha = 30$ %.

Анализируя полученные результаты и литературные данные [12, 16], можно предположить, что МАХ-фаза Cr₂AlC образуется при взаимодействии расплава хрома с углеродом по известному механизму растворения первоначально образовавшегося карбида в окружающем расплаве. В результате происходит насыщение расплава углеродом и создаются концентрационные условия для кристаллизации фазы Cr₂AlC. Определяющим фактором является время существования жидкой фазы в условиях синтеза, которое влияет и на фазоразделение, и на содержание Cr₂AlC в конечном продукте. Очевидно, что чем выше температура синтеза, тем более длительное время материал находится в жидкофазном состоянии, приводя к большему выходу МАХ-фазы. На время «жизни» расплава также большое влияние оказывает геометрический

(масса смеси) фактор [21, 22]. Во всех экспериментах масса смеси составляла 20 г. В результате происходило быстрое охлаждение материала, приводящее к кристаллизации слитка, что не позволяло установиться равновесию в системе и образоваться монофазе Cr₂AlC. В итоге конечный продукт синтеза содержит набор фаз. Эксперименты показали, что шихты, состоящие из различного сочетания «горячей» (3CaO₂/2Al) и «холодной» (Cr₂O₃/3Al/C) смесей, горят в широком интервале соотношений реагентов.

Заключение

Показано, что, варьируя состав исходных смесей, можно существенным образом влиять на расчетные и экспериментальные параметры синтеза, а также на фазовый состав и микроструктуру конечных продуктов. Установлены оптимальные условия синтеза материала, обеспечивающие максимальный выход МАХ-фазы Cr₂AlC в составе слитка. Определяющим фактором, влияющим на содержание Cr₂AlC в конечном продукте, является время существования жидкой фазы в условиях синтеза. Показано, что максимальное содержание МАХ-фазы Cr₂AlC и выход целевого продукта достигаются при 30 %-ном содержании сильно экзотермической добавки (3CaO₂/2Al) в исходной шихте.

Литература/References

1. Barsoum M.W. MAX phases: Properties of machinable ternary carbides and nitrides. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013.
2. Radovic M., Barsoum M.W. MAX phases: Bridging the gap

- between metals and ceramics. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 2013. Vol. 92. No. 3. P. 20–27.
3. Barsoum M.W., Radovic M. Elastic and mechanical properties of the MAX phases. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2011. Vol. 41. No. 1. P. 195–227.
 4. Barsoum M., El-Raghy T. The MAX phases: Unique new carbide and nitride materials. *Am. Sci.* 2001. Vol. 89. No. 4. P. 336–345.
 5. Poon B., Ponson L., Zhao J., Ravichandran G. Damage accumulation and hysteretic behavior of MAX phase materials. *J. Mech. Phys. Solids.* 2011. Vol. 59. No. 10. P. 2238–2257.
 6. Atikur Rahman M. Study on structural, electronic, optical and mechanical properties of MAX phase compounds and applications: Review. *Am. J. Mod. Phys.* 2015. Vol. 4. No. 2. P. 75–91.
 7. Li H., Li S., Zhou Y. Cyclic thermal shock behaviour of a Cr₂AlC ceramic. *Mater. Sci. Eng. A.* 2014. Vol. 607. P. 525–529.
 8. Tian W.B., Wang P.L., Kan Y.M., Zhang G.J., Li Y.X., Yan D.S. Phase formation sequence of Cr₂AlC ceramics starting from Cr–Al–C powders. *Mater. Sci. Eng. A.* 2007. Vol. 443. No. 1–2. P. 229–234.
 9. Xiao L.O., Li S.B., Song G., Sloof W.G. Synthesis and thermal stability of Cr₂AlC. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011. Vol. 31. No. 8. P. 1497–1502.
 10. Duan X., Shen L., Jia D., Zhou Y., van der Zwaag S., Sloof W.G. Synthesis of high-purity, isotropic or textured Cr₂AlC bulk ceramics by spark plasma sintering of pressure-less sintered powders. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. No. 5. P. 1393–1400.
 11. Panigrahi B.B., Chu M.C., Kim Y. Il, Cho S.J., Gracio J.J. Reaction synthesis and pressureless sintering of Cr₂AlC powder. *J. Am. Ceram. Soc.* 2010. Vol. 93. No. 6. P. 1530–1533.
 12. Tian W., Vanmeensel K., Wang P., Zhang G., Li Y., Vleugels J., Van der Biest O. Synthesis and characterization of Cr₂AlC ceramics prepared by spark plasma sintering. *Mater. Lett.* 2007. Vol. 61. No. 22. P. 4442–4445.
 13. Merzhanov A.G. The chemistry of self-propagating high-temperature synthesis. *J. Mater. Chem.* 2004. Vol. 14. No. 12. P. 1779–1786.
 14. Levashov E.A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Shtansky D.V. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *Int. Mater. Rev.* 2017. Vol. 62. No. 4. P. 203–239.
 15. Łopaciński M., Puszynski J., Lis J. Synthesis of ternary titanium aluminum carbides using self-propagating high-temperature synthesis technique. *J. Am. Ceram. Soc.* 2001. Vol. 84. No. 12. P. 3051–3053.
 16. Zhu C.-C., Zhu J., Wu H., Lin H. Synthesis of Ti₃AlC₂ by SHS and thermodynamic calculation based on first principles. *Rare Met.* 2015. Vol. 34. No. 2. P. 107–110.
 17. Konovalikhin S.V., Kovalev D.Y., Sytshev A.E., Vadchenko S.G., Shchukin A.S. Formation of nanolaminate structures in the Ti–Si–C system: A crystallochemical study. *Int. J. SHS.* 2014. Vol. 23. No. 4. P. 217–221.
 18. Юхвид В.И. Высокотемпературные жидкофазные СВС-процессы: Новые направления и задачи. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2006. No. 5. С. 62–78.
 19. 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.
 20. Горшков В.А., Милосердов П.А., Лугинина М.А., Сачкова Н.В., Беликова А.Ф. Высокотемпературный синтез литого материала с максимальным содержанием МАХ-фазы Cr₂AlC. *Неорган. материалы.* 2017. Т. 53. No. 3. С. 260–266.
 21. Горшков В.А., Милосердов П.А., Сачкова Н.В., Лугинина М.А., Юхвид В.И. High-temperature synthesis of a cast material with a maximum content of the MAX phase Cr₂AlC. *Inorg. Mater.* 2017. Vol. 53. No. 3. P. 271–277.
 22. Горшков В.А., Милосердов П.А., Сачкова Н.В., Лугинина М.А., Юхвид В.И. SHS Metallurgy of Cr₂AlC MAX Phase-based cast materials. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2018. Vol. 59. No. 5. P. 570–575.
 23. Горшков В.А., Милосердов П.А., Карпов А.В., Щукин А.С., Сычев А.Е. Исследование состава и свойств материала на основе МАХ-фазы Cr₂AlC, полученного методом СВС-металлургии. *Физика металлов и металловедение.* 2019. Т. 120. No. 5. С. 512–517.
 24. Горшков В.А., Милосердов П.А., Карпов А.В., Шчукин А.С., Сычев А.Е. Investigation of the composition and properties of a Cr₂AlC MAX phase-based material prepared by metallothermic SHS. *Phys. Met. Metallogr.* 2019. Vol. 120. No. 5. P. 471–475.
 25. Merzhanov A.G., Khaikin B.I. Theory of combustion waves in homogeneous media. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1988. Vol. 14. No. 1. P. 1–98.
 26. Merzhanov A.G. Thermally coupled processes of self-propagating high-temperature synthesis. *Dokl. Phys. Chem.* 2010. Vol. 434. No. 2. P. 159–162.
 27. Shiryaev A. Thermodynamics of SHS processes: An advanced approach. *Int. J. SHS.* 1995. Vol. 4. No. 4. P. 351–362.