

## **Влияние масштабного фактора на формуемость, фазовый состав и микроструктуру материала на основе МАХ-фазы системы Ti – Al – C**

**С. Н. Галышев, Н. Г. Зарипов, П. М. Бажин, А. М. Столин**

---

Экспериментально исследовано влияние масштабного фактора исходного образца на формуемость материала на основе МАХ-фазы системы Ti – Al – C. В качестве критерия формуемости выбрана степень деформации материала — величина относительного изменения площади поперечного сечения деформированного образца, определяемая в условиях процесса свободного сжатия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Показано, что увеличение габаритов образца (размеров поперечного сечения и высоты) приводит к повышению способности материала к пластическому высокотемпературному деформированию. Изучена микроструктура и фазовый состав материала в зависимости от времени приложения внешней нагрузки после инициирования химической реакции.

**Ключевые слова:** СВС, свободное СВС-сжатие, пластическое высокотемпературное деформирование, система Ti – Al – C, МАХ-фаза.

---

### **Введение**

Одним из главных вопросов при разработке методов СВС-технологии получения изделий является оценка формуемости горячих продуктов синтеза, которая определяется комплексом их реологических, теплофизических и физико-механических свойств [1]. Способность этих продуктов горения к формированию находится в определенном температурном интервале переработки. Для большого числа СВС-материалов этот диапазон определяется разностью температур горения и живучести. Температура живучести является условной технологической характеристикой и соответствует температуре, выше которой материал обладает способностью к пластическому деформированию, а ниже — затвердевает.

Соединения на основе МАХ-фазы системы Ti – Al – C: Ti<sub>2</sub>AlC, Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> обладают весьма специфическими свойствами [2 – 4], сочетающими в себе достоинства керамических и металлических материалов, среди которых высокая электрическая и тепловая проводимость, высокая стойкость к тепловым ударам, превосходная жаростойкость и стойкостью к воздействию агрессивных сред [5, 6]. Рассмотрение кривых зависимости степени деформации от времени

задержки перед приложением внешней нагрузки позволяет дать рекомендации к решению проблем получения изделий методами СВС в условиях сочетания горения и высокотемпературного деформирования.

Общепринятого подхода к описанию процесса формирования изделий с использованием методов СВС не существует. Такое описание можно построить при анализе специфических технологических процессов, как это было сделано для процесса СВС-экструзии [7, 8]. Однако более важным представляется подход, основанный на изучении общих особенностей процесса формирования, не привязанный к конкретному технологическому оборудованию. Такой подход требует решения ряда методических вопросов, и, прежде всего, определения критерия формуемости материала.

Слово формуемость используется часто в очень широком смысле и существует большое разнообразие определений этого понятия. Следует различать понятие формуемости, как характеристики материала от формуемости, как характеристики процесса получения изделий. Так, например, формуемость порошка в холодном состоянии определяется как способность под давлением сжимающих усилий

образовывать заготовку заданной формы и размеров (ГОСТ 25280–82). С другой стороны, можно встретить определение формуемости как “меру скорости и простоты, с которой можно изготовить из данного материала изделие, удовлетворяющее определенным требованиям” [9]. Хотя в этом определении нет количественного критерия, но в нем есть понимание, что при получении изделий важно определить формуемость, как характеристику процесса.

При получении изделий из СВС-материалов объектами деформирования являются уже не порошки в холодном состоянии, а горячий продукт горения, который подвергается высокотемпературному сдвиговому деформированию. В работах [10, 11] в качестве подхода к определению формуемости предложен метод свободного СВС-сжатия. Сущность этого метода заключается в сдвиговом деформировании материала после синтеза под действием постоянного невысокого давления (~ 10–100 МПа) в условиях свободного одноосного сжатия. Основной характеристикой такого процесса является степень деформации (относительное изменение площади поперечного сечения деформированного образца). Существенное влияние на формуемость материала под действием постоянного давления в процессе СВС-сжатия играет масштабный фактор — размеры поперечного сечения и высоты исходного образца.

Литературные данные о влиянии масштабного фактора на формуемость СВС-материалов крайне ограничены. Представляется, что предложенный метод свободного СВС-сжатия может эффективно использоваться для изучения способности к формуемости некоторых распространенных классов СВС-материалов. Целесообразность и преимущества такого подхода к оценке формуемости материалов очевидна: он позволяет резко сократить объем экспериментальных исследований при обработке технологических режимов получения новых материалов методом СВС-экструзии, а также позволяет дать рекомендации и прогнозы по использованию новых вариантов экспериментальных схем получения крупногабаритных изделий.

Цель работы — исследование влияния масштабного фактора на формуемость материала на основе МАХ-фазы системы  $2\text{Ti} - \text{Al} - \text{C}$  методом свободного СВС-сжатия, изучение фазового состава и микроструктуры полученного материала.

#### Объекты исследования и методики эксперимента

Исходные образцы двух разных размеров ( $\varnothing 15 \times 15$  и  $\varnothing 30 \times 30$  мм) представляли собой таблетки цилиндрической формы из прессованной

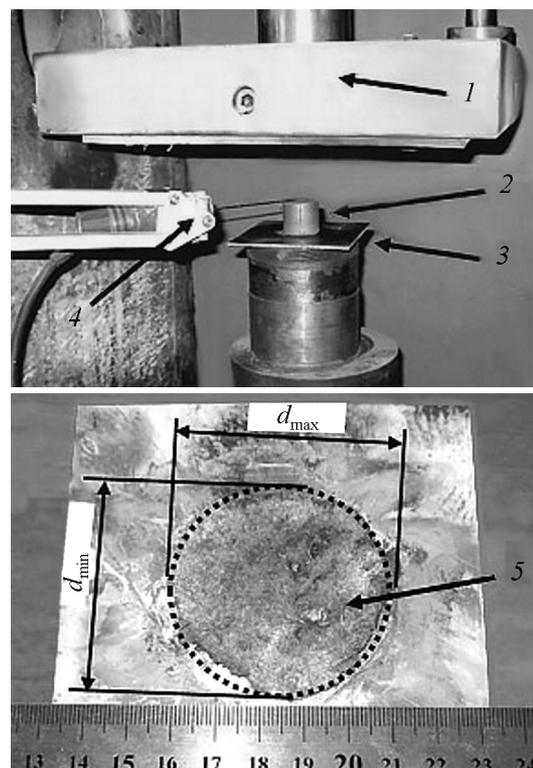


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — плунжер пресса, 2 — исходная заготовка, 3 — стальная подложка, 4 — инициирующее устройство, 5 — деформированный материал после синтеза.

шихты относительной плотностью 60 %, состоящей из смеси порошков титана (ПТМ), алюминия (АСД-4) и сажи. Состав шихты рассчитывали на стехиометрический состав МАХ-фазы  $\text{Ti}_2\text{AlC}$ .

Исследование формуемости материала проводили методом свободного СВС-сжатия [9, 10] при давлении на плунжере пресса 15 МПа. В соответствии с полученными ранее экспериментальными данными [10] значение времени задержки  $\tau_D$  было принято в диапазоне от 0 до 10 с. Материал находился под давлением в течение  $\tau_E = 30$  с. Эксперимент проводили следующим образом. В верхней части таблетки инициировалась волна горения в режиме СВС при помощи вольфрамовой спирали (рис. 1). Далее осуществлялось прессование с предварительным временем задержки  $\tau_D$  и последующей выдержкой  $\tau_E$  под давлением в течении 30 с.

В качестве критерия формуемости материалов была выбрана степень деформации, определяемая по формуле:

$$\psi = 1 - \frac{S_H}{S_K}$$

где  $\psi$  — степень деформации синтезированного материала,  $S_n$  — площадь горизонтального сечения исходной шихтовой заготовки,  $\text{мм}^2$ ;  $S_k$  — площадь горизонтального сечения деформированного синтезированного материала,  $\text{мм}^2$ . Учитывая, что после деформирования материал становится по сечению близок к окружности, то для расчета  $S_k$  берется его усредненное значение:

$$S_k = \frac{\pi(d_{\max} + d_{\min})^2}{16},$$

где  $d_{\max}$  — максимальный диаметр деформированного материала,  $d_{\min}$  — минимальный диаметр деформированного материала.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре ДРОН-3. Методом корундовых чисел проведен количественный фазовый анализ деформированного материала. Микроструктура образцов исследована на растровом электронном микроскопе LEO-1450.

### Результаты и обсуждение

Исследование формуемости синтезированного материала позволило выявить его способность к макропластическому течению при небольших давлениях (15 МПа). Температуру горения шихтовой смеси, соответствующей стехиометрическому составу конечного соединения  $\text{Ti}_2\text{AlC}$ , измеряли вольфрам-рениевой термопарой, она составила  $1837^\circ\text{C}$ , что выше температуры плавления отдельных исходных реагентов (Al, Ti) во время синтеза ( $T_{\text{пл Al}} = 660^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{пл Ti}} = 1677^\circ\text{C}$ ). Это приводит к тому, что при синтезе выбранного материала образуется промежуточная жидкая фаза, которая придает способность продуктам горения к пластическому высокотемпературному деформированию.

Одним из важнейших технологических параметров, определяющих способность материала к формованию, является время задержки (время от начала инициирования химической реакции до приложения давления к синтезированному материалу). Значение времени задержки  $\tau_D$  было принято в диапазоне от 0 до 10 с. В качестве критерия формуемости СВС-материалов была выбрана степень деформации, определяемая по формуле:

$$\psi = \frac{S_k - S_n}{S_k},$$

где  $S_k$  — площадь горизонтального сечения деформированного СВС-материала,

Пластичное состояние синтезированного материала (способность к формоизменению) напрямую

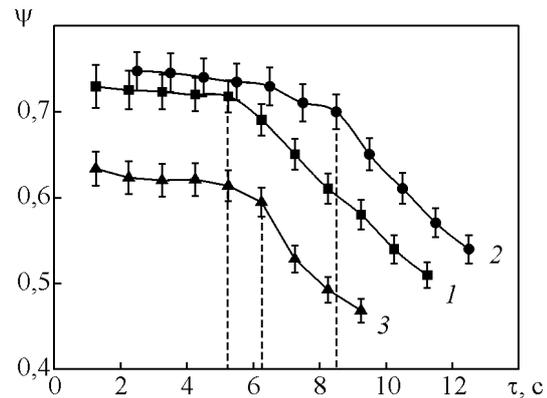


Рис. 2. Зависимости степени деформации материала от времени задержки для образцов размерами: 1 —  $\varnothing 15 \times 15$ , 2 —  $\varnothing 30 \times 15$ , 3 —  $\varnothing 30 \times 30$  мм.

зависит от времени задержки перед приложением к нему давления. Так же существенное влияние на формуемость материала в процессе СВС-сжатия оказывает масштабные факторы — диаметр поперечного сечения и высота исходного образца. В связи с этим была исследована зависимость степени деформации от времени задержки при приложении давления 15 МПа для трех типов образцов:  $\varnothing 15 \times 15$ ,  $\varnothing 30 \times 15$  и  $\varnothing 30 \times 30$  мм (рис. 2).

С увеличением времени задержки степень деформации синтезированного материала монотонно уменьшается. Кроме того, это приводит к росту теплопотерь, синтезированный материал остывает, в результате чего образуются малопластичные наружные слои, которые препятствуют процессу сдвигового деформирования материала.

Вне зависимости от размеров и формы образцов, все кривые имеют общий характер. На рис. 2 на кривых можно выделить два участка, которые разделены пунктирными линиями. На первом участке, при малых временах задержки способность материала к высокотемпературному деформированию максимальна и изменяется слабо. Степень деформации для всех кривых изменяется незначительно и не превышает 5% (0,72 – 0,73), то есть на этом временном интервале материал обладает максимальной технологичной пластичностью для формования. Если этот интервал узкий, то можно прогнозировать, что технологический процесс получения изделий будет “жестким”, поскольку трудно удовлетворить условию попадания времени задержки в этот интервал.

При дальнейшем увеличении времени задержки на втором участке происходит резкое снижение степени деформации. Этому интервалу соответствует низкая воспроизводимость технологического процесса, поскольку малым изменениям времени за-

держки будут соответствовать сильные изменения способности к высокотемпературному деформированию. Увеличение диаметра исходной таблетки до 30 мм при неизменной высоте приводит к общему снижению степени деформации на 10 %. Это может быть связано со снижением истинной нагрузки на образец из-за роста площади приложения давления при прессовании.

Далее были исследованы образцы третьего типа —  $\varnothing 30 \times 30$  мм. Общее значение степени деформации образцов третьего типа по сравнению с образцами второго типа на 12 % больше. Это можно объяснить тем, что образцы третьего типа имеют больший объем материала, способного к деформированию и, как следствие, большую степень деформации. Увеличение диаметра образца приводит к снижению степени деформации, а увеличение высоты — к её росту. Таким образом, очевидно влияние масштабного фактора на количественные характеристики кривых.

Критическое время задержки для образцов второго типа увеличивается на 1 с, для образцов третьего типа — на 3 с. Это обусловлено тем, что образцы больших размеров имеют большую массу. Поэтому при их синтезе образуется большее количество тепла, образцы за счет конвективно-кондуктивного охлаждения медленнее остывают, и, как следствие, дольше остаются в температурном интервале формуемости.

Полученные результаты по исследованию формуемости следует рассматривать лишь как оценочные, на основе которых можно сделать прогноз для

конкретных технологических процессов (экструзии, прокатки или штамповки), полезным образом использующие способность материала к сдвиговому пластическому деформированию. Установленные особенности влияния на формуемость геометрических размеров и времени задержки были положены в основу при разработке метода СВС-экструзии для получения компактных электродов из материала на основе МАХ-фаз системы Ti – Al – C.

Для образцов  $\varnothing 30$  мм, полученных при временах задержки 2,5; 4,5; 6,5; 8,5; 10,5 и 12,5 с был проведен количественный рентгенофазовый анализ (рис. 3).

Анализ показал, что в синтезированном материале присутствуют 3 фазы:  $Ti_3AlC_2$ ,  $Ti_2AlC$  и TiC. Соотношение МАХ-фаз и карбида титана на всем интервале времени задержки принципиально не меняется (табл. 1): от 85:15 до 80:20, соответственно. Таким образом, можно утверждать, что время задержки перед деформированием практически не влияет на качественный и количественный фазовый состав синтезированного материала.

Таблица 1

Массовая доля фаз в образцах диаметром 30 мм в зависимости от времени задержки  $\tau_D$

Фаза	Массовая доля фаз, %, при $\tau_D$ , с					
	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5
$Ti_3AlC_2$	54	44	46	54	51	51
$Ti_2AlC$	31	42	34	27	31	32
TiC	15	14	20	19	18	17

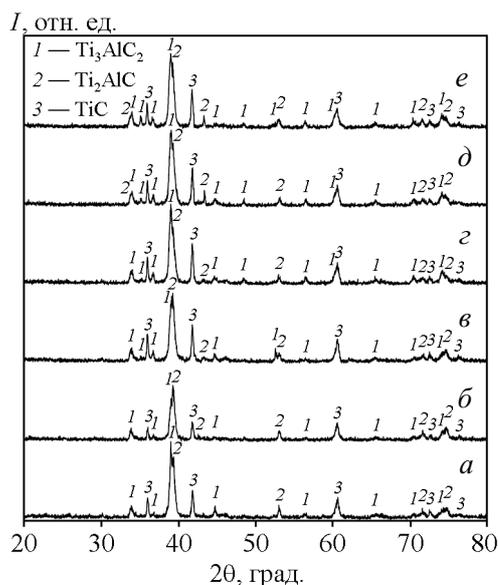


Рис. 3. Рентгенограммы образцов диаметром 30 мм полученных при разных временах задержки  $\tau_D$ , с: а — 2,5, б — 4,5, в — 6,5, г — 8,5, д — 10,5, е — 12,5.

Для образцов  $\varnothing 30$  мм была исследована микроструктура деформированного материала. На рис. 4 приведены фотографии микроструктуры образцов полученных при временах задержки 2,5; 4,5; 6,5; 8,5; 10,5 и 12,5 с.

В микроструктуре полученных материалов присутствует 3 вида структурных составляющих: светлые глобулярные включения, включения вытянутой формы и темные области. Учитывая результаты РФА и результаты масс-спектрального анализа установлено, что светлые глобулярные включения представляют собой карбид титана, зерна вытянутой формы — МАХ-фазы  $Ti_2AlC$  и  $Ti_3AlC_2$ , а темные включения — это поры.

Установлено, что с ростом времени задержки происходит “огрубление” внутреннего строения материала, размеры частиц карбида титана увеличиваются более чем в 2 раза — с 0,85 по 2,35 мкм, ширина зерен МАХ-фаз возрастают более чем в 5 раз — с 0,59 по 3,31 мкм (табл. 2).

Подобная динамика изменения микроструктуры материала обусловлена различными тепловыми

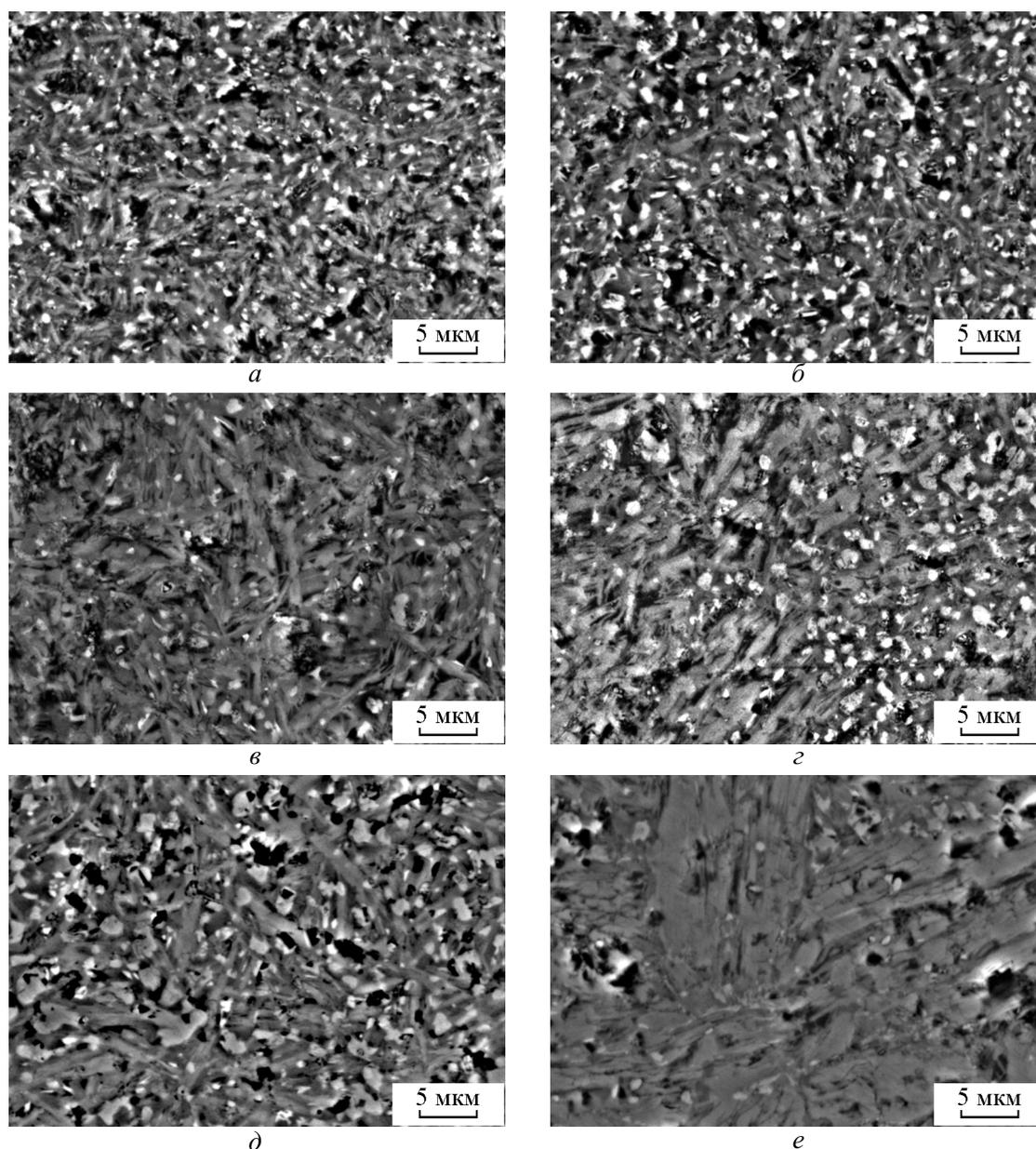


Рис. 4. СЭМ образцов диаметром 30 мм, полученных при временах задержки,  $\tau_D$ , с: а – 2,5, б – 4,5, в – 6,5, г – 8,5, д – 10,5, е – 12,5.

условиями её формирования. Несмотря на то, что тепловые условия практически не влияют на фазовый состав, интенсивность теплоотвода оказывает существ-

Таблица 2

Размеры структурных составляющих (TiC и MAX-фаз) в зависимости от времени задержки  $\tau_D$

Фаза	Размеры фаз, мкм, при $\tau_D$ , с					
	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5
TiC	0,85	1,14	1,56	1,81	2,13	2,35
MAX	0,59	0,74	1,57	2,14	2,63	3,31

венное влияние на формирование размера структурных составляющих синтезированного материала. При малых временах задержки формирование структуры материала происходит в условиях более интенсивного теплоотвода, так как взаимодействие синтезированного материала с поверхностью массивного плунжера прессы происходит ранее. При этом образованные зерна карбида титана и MAX-фаз не успевают вырасти до более крупных размеров. С увеличением времени задержки перед приложением внешнего давления, продукты синтеза находятся

более длительное время при высокой температуре до соприкосновения с плунжером прессы, что приводит к большему росту частиц карбида титана и МАХ-фазы.

### Заключение

Во всех вариантах изучения влияния масштабного фактора (варьирование геометрических размеров исходного образца при неизменных условиях деформирования) все кривые зависимостей степени деформации от времени задержки имеют общий характер. На полученных кривых можно выделить два участка. На первом участке, при малых временах задержки способность материала к высокотемпературному деформированию максимальна и изменяется слабо. Этот временной интервал наиболее благоприятен для получения изделий. При дальнейшем увеличении времени задержки на втором участке происходит резкое снижение степени деформации. При этом малым изменениям времени задержки будут соответствовать сильные изменения способности к высокотемпературному деформированию. Таким образом, рассмотрение этих кривых позволяет качественно подойти к решению проблем получения изделий в условиях сочетания процессов СВС и высокотемпературного деформирования синтезированного материала.

Масштабный фактор влияет на тепловые условия процессов формирования и структурообразования синтезированного материала на основе МАХ-фазы системы  $2\text{Ti} - \text{Al} - \text{C}$  при свободном СВС-сжатии. Формуемость образцов диаметром 30 мм выше, чем для образцов диаметром 15 мм на всем интервале времени задержки. Разница максимальных значений степени деформации, при этом, составляет 25 %. Кроме того, увеличение габаритных размеров исходного образца приводит к росту критического времени задержки более чем в 1,5 раза.

Время задержки перед деформированием синтезированного материала оказывает влияние на формирование его структуры. Размер структурных составляющих с увеличением времени задержки повышается более чем в 2 раза для карбида титана и более чем в 5 раз для МАХ-фаз.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4078.2014.8.*

### Литература

1. Stolin A.M. Methods and techniques for measuring rheological properties of shs materials. International journal of self-propagating high-temperature synthesis, 1997, v. 6, no. 3, p. 327 – 332.
2. Tomoshige R., Tanaka H. Thermal properties of various Ti – Al – C composites prepared by hot shock compaction utilizing combustion synthesis. Archives of metallurgy and materials, 2014, v. 59, no. 4, p. 1575 – 1578.
3. Prikhna T.A., Dub S.N., Starostina A.V. et al. Mechanical properties of materials based on MAX phases of the Ti – Al – C system. Journal of superhard materials, 2012, v. 34, no. 2, p. 102 – 109.
4. Starostina A.V., Prikhna T.A., Karpets M.V. et al. Synthesis of ternary compounds of the Ti – Al – C system at high pressures and temperatures. Journal of super hard materials, 2011, v. 33, no. 5, p. 307 – 314.
5. Новиков А.С., Пайкин А.Г., Шулов В.А. Получение, свойства и перспективы применения МАХ-материалов на основе титана. Упрочняющие технологии и покрытия, 2006, № 11, с. 24 – 34.
6. Barsoum M.W., El-Raghy T. The MAX phases: unique new carbide and nitride materials. The Scientific Research Soc. American Scientist, 2001, v. 89, p. 334 – 343.
7. Столин А.М., Бажин П.М. Получение изделий многофункционального назначения из композитных и керамических материалов в режиме горения и высокотемпературного деформирования (СВС-экструзия). Теоретические основы химической технологии, 2014, т. 48, № 6, с. 1 – 13.
8. Stolin A.M., Bazhin P.M. SHS extrusion: an overview. International Journal of self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2014, v. 23, no. 2, p. 65 – 73.
9. Бернхардт Э.Н. Переработка термопластичных материалов. М.: Химия, 1965, 747 с.
10. Stolin A.M., Vrel D., Galyshev S.N., Hendaoui A., Bazhin P.M., Sytschev A.E. Hot forging of MAX compounds SHS-produced in the Ti – Al – C system. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2009, v. 18, no. 3, p. 194 – 199.
11. Галышев С.Н., Бажин П.М., Столин А.М., Сычев А.Е. Синтез металлокерамики на основе Ti – Al – C в условиях свободного СВС-сжатия. Перспективные материалы, 2010, № 2, с. 81 – 86.

### References

1. Stolin A.M. Methods and techniques for measuring rheological properties of shs materials. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 1997, vol. 6, no. 3, pp. 327 – 332.
2. Tomoshige R., Tanaka H. Thermal properties of various Ti-Al-C composites prepared by hot shock compaction utilizing combustion synthesis. Archives of metallurgy and materials, 2014, vol. 59, no. 4, pp. 1575 – 1578.
3. Prikhna T. A., Dub S.N., Starostina A.V. et al. Mechanical properties of materials based on MAX phases of the Ti –

- Al – C system. Journal of superhard materials, 2012, vol. 34, no. 2, pp. 102 – 109.
- Starostina A.V., Prikhna T.A., Karpets M.V. et al. Synthesis of ternary compounds of the Ti-Al-C system at high pressures and temperatures. Journal of superhard materials, 2011, vol. 33, no. 5, pp. 307 – 314.
  - Novikov A.S., Paikin A.G., Shulov V.A. Poluchenie, svoistva i perspective pimeneniya MAX-materialov na osnove titana [Preparation, properties and application MAX-titanium-based materials]. *Uprochnyaushie tehnologii i pokritia - Hardening and coating technology* (in Rus), 2006, no. 11, pp. 24 – 34.
  - Barsoum M.W., El-Raghy T. The MAX phases: unique new carbide and nitride materials. The Scientific Research Soc. American Scientist, 2001, vol. 89, pp. 334 – 343.
  - Stolin A.M., Bazhin P.M. Manufacture of multipurpose composite and ceramic materials in the combustion regime and high-temperature deformation (SHS Extrusion). Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 751 – 763.
  - Stolin A.M. and Bazhin P.M. SHS Extrusion: An overview. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 65 – 73.
  - Bernhardt E.N. *Pererabotka termoplastichnih materialov* [Processing thermoplastics]. Moscow, Chemistry Publ., 1965, 747 p.
  - Stolin A. M., Vrel D., Galyshev S. N., Hendaoui A., Bazhin P.M., Sytshev A.E. Hot Forging of MAX Compounds SHS-Produced in the Ti – Al – C System. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2009, vol. 18, no. 3, pp. 194 – 199.
  - Galyshev S.N., Bazhin P.M., Stolin A.M., Sychev A.E. Sintez metallokeramiki na osnove Ti – Al – C v usloviyah svobodnogo sgiatia [Synthesis of cermet based on Ti – Al – C in free SHS compression]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials* (in Rus), 2010, no. 2, pp. 81 – 86.

*Статья поступила в редакцию 30.06.2015 г.*

**Галышев Сергей Николаевич** — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Уфимский государственный авиационный технический университет” (ул. Карла Маркса, 12, Уфа, Респ. Башкортостан, 450000), инженер, специалист в области материаловедения. E-mail: galyshev@gmail.com.

**Зарипов Наиль Гарифьянович** — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Уфимский государственный авиационный технический университет” (ул. Карла Маркса, 12, Уфа, Респ. Башкортостан, 450000), доктор физико-математических наук, проректор, заведующий кафедрой, специалист в области материаловедения и физики металлов. E-mail: nzaripov@mail.ru.

**Столин Александр Моисеевич** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (ИСМАН) (Институтская ул., 8, г. Черноголовка, Московская обл., 142432), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области высокотемпературного деформирования, структурной макрокинетики и реологии полимерных и неорганических материалов. E-mail: amstolin@ism.ac.ru.

**Бажин Павел Михайлович** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (Институтская ул., 8, г. Черноголовка, Московская обл., 142432), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области высокоэффективных процессов обработки материалов. E-mail: olimp@ism.ac.ru.

## **Influence of scale factor on formability, phase composition and microstructure of the material based on MAX-phase of Ti – Al – C system**

**S. N. Galyshev, N. G. Zaripov, P. M. Bazhin, A. M. Stolin**

Experimental investigation results of influence of scale factor on formability, phase composition and microstructure of the material based on MAX-phase of Ti – Al – C system are shown. The degree of material deformation, i.e. a value of relative change of the cross section area of the deformed material, is chosen as a formability criterion. The value is defined within the process of free SHS compaction. It is shown that an increase in the sample dimensions (height and cross section) results in an increase of the material ability to high-temperature plastic deformation. The material microstructure and phase composition are studied in dependence on the time of external loading application after the reaction initiation.

**Key words:** SHS, free SHS compaction, high-temperature plastic deformation, system of Ti – Al – C, MAX-phase.

---

**Galushev Sergei** — Ufa State Aviation Technical University (K. Marx Street 12, Ufa, The Republic of Bashkortostan, Russian Federation, 450008), engineer. Specialist expert in the field of materials science. E-mail: galyshev@gmail.com.

**Zaripov Nail** — Ufa State Aviation Technical University (K. Marx Street 12, Ufa, The Republic of Bashkortostan, Russian Federation, 450008), Dr Sci (Phys-Math), head of department. specialist expert in the field of materials science. E-mail: nzaripov@mail.ru.

**Stolin Alexander** — Russian Academy of Sciences Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS (Academician Osipyan str., 8 Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), professor, head of laboratory. Specialists in the field of high-temperature deformation, structural macrokinetics and rheology of polymeric and inorganic materials. E-mail: amstolin@ism.ac.ru.

**Bazhin Pavel** — Russian Academy of Sciences Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS (Academician Osipyan str., 8 Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), Ph.D., senior researcher. Specialist in high-performance material processing. E-mail: olimp@ism.ac.ru.