

Л. В. Судник¹, А. Р. Лученок¹, Ю. И. Козырева¹, В. С. Ткачук¹, Т. А. Прихна², А. В. Козырев²

¹Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством
Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
²Институт сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины, Киев,
Украина

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ ПОРОШКОВ

Аннотация. Материалы на основе МАХ-фаз имеют уникальную комбинацию свойств. Они объединяют лучшие свойства металлов и керамики. Такой набор полезных эксплуатационных параметров дает возможность широкого технического применения в различных отраслях промышленности. Однако несмотря на большое количество исследовательских работ, проведенных в данной области, получение плотного, однородного МАХ-материала остается нерешенным вопросом.

Изучались возможности метода импульсного компактирования бризантными взрывчатыми веществами для получения изделий из порошков МАХ-фаз. В качестве модельного материала для проведения исследований были использованы порошки МАХ-фаз на основе Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 , синтезированные свободным спеканием в вакууме.

Показано, что двукратное импульсное компактирование порошков на основе Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 позволяет снизить пористость прессовок с 22 % до 9 %, при этом фазовый состав материала практически не изменяется.

Испытание образцов, полученных методом импульсного компактирования, на стойкость к окислению показало, что метод ударно-волнового нагружения применим для получения конкурентоспособных материалов, реализующих потенциальные свойства МАХ-фаз. Отмечено, что для повышения жаростойкости необходимо стремиться к минимизации пористости материала. Существенное снижение пористости может быть достигнуто за счет многократного ударно-волнового нагружения материала.

Ключевые слова: МАХ-фазы, компактирование, ударно-волновое нагружение, наноматериалы, порошки, пористость, плотность, структура

Для цитирования. Ударно-волновое компактирование порошков / Л. В. Судник [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 20–26.

L. V. Sudnik¹, A. R. Luchenok¹, Yu. I. Kozyreva¹, V. S. Tkachuk¹, T. A. Prikhna², A. V. Kozyrev²

¹Research Institute of Pulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
²V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

SHOCK-WAVE COMPACTING OF POWDERS

Abstract. Materials based on MAX phases have a unique combination of properties. They combine the best properties of metals and ceramics. Such a set of useful operational parameters allows for wide technical application in various industries. However, despite the large number of research works carried out in this area, obtaining a dense, uniform MAX material remains an unresolved issue.

The possibilities of the pulsed compacting method with blasting explosives for obtaining products from MAX phase powders were investigated. As a model material for the research, powders of MAX phases based on Ti_2AlC and Ti_3AlC_2 synthesized by free sintering in vacuum were used.

It was shown that double pulse compacting powders based Ti_2AlC Ti_3AlC_2 and reducing compacts porosity from 22 % to 9 %, is practically unchanged while the phase composition of the material.

Test samples obtained by pulsed compaction in oxidation resistance showed that the method of the shock-wave loading applicable for competitive materials realizing potential properties of MAX phases. It is noted that to increase the heat resistance it is necessary to minimize the porosity of the material. Significant reduction in porosity can be achieved due to repeated shock-wave loading of the material.

Keywords: MAX phases, shock-wave loading, compacting, powders, porosity, nanomaterials, density, structure

For citation. Sudnik L. V., Luchenok A. R., Kozyreva Yu. I., Tkachuk V. S., Prikhna T. A., Kozyrev A. V. Shock-wave compacting of powders. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 20–26 (in Russian).

Введение. МАХ-фазы являются тройными соединениями переходных металлов с азотом и углеродом. Их общая формула $M_{n+1}AX_n$ (n принимает значения от 1 до 3) отображает слоистое строение, в котором слои карбида или нитрида (MX) чередуются со слоями интерметаллических соединений (МА) [1].

Слоистость на уровне кристаллической решетки обеспечивает материалам высокую прочность и трещиностойкость при комнатных и высоких температурах.

Материалы на основе МАХ-фаз характеризуются одновременно высокой тепло- и электропроводностью, пластичностью при высоких температурах, устойчивостью к термоудару, стойкостью к окислению и коррозии, низкой плотностью, низким коэффициентом теплового расширения и высоким уровнем демпфирующих свойств [2]. Сочетания свойств керамики и металлов при малом удельном весе делают такие материалы перспективными для использования в различных отраслях промышленности. При этом требуется решение технологических задач по переработке материала в изделие.

В рамках данного экспериментального исследования изучались возможности метода импульсного прессования с использованием бризантных взрывчатых веществ для компактирования порошков, содержащих МАХ-фазы.

Методика проведения экспериментов. Метод ударно-волнового нагружения рассматривался как альтернативный способ уплотнения МАХ-материалов. Для определения возможности применения метода ударно-волнового нагружения для компактирования МАХ-фаз были использованы порошки на основе Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 , синтезированные свободным спеканием в вакууме при температуре $T = 1350$ °С и времени выдержки 30, 120 и 180 мин из смесей $TiC/TiH_2/Al$ с разным соотношением исходных компонентов (2/2/1,25 для Ti_2AlC и 2/1/1,25 для Ti_3AlC_2) при 25%-ном избытке алюминия с учетом испарения (табл. 1).

При синтезировании исходные компоненты сначала измельчались и смешивались в смесителе типа «пьяная бочка» в среде аргона, затем компактировались при давлении 20 МПа. Синтез материалов осуществлен в Институте сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины.

Состав, плотность, пористость и микротвёрдость образцов после синтеза приведены в табл. 2.

Импульсное компактирование порошков выполнялось по плоской схеме нагружения (Патент Республики Беларусь № 21555 от 12.01.2017 «Способ изготовления изделия из порошкового материала путем взрывного прессования», авторы – А. Р. Лученок, А. Ф. Ильющенко, Л. В. Судник, Г. В. Смирнов, А. А. Шевченко, Н. В. Киршина) с использованием бризантных взрывчатых веществ (аммонит № 6ЖВ) при скорости детонации 3800–4200 м/с.

Исследование фазового состава выполнялось на рентгеновском дифрактометре ULCIMA IV (Япония) в $CuK\alpha$ -излучении в диапазоне углов 2θ 18–88°.

Плотность и пористость компактов устанавливались методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 24409-80. Для расчета теоретической плотности в соответствии с правилом аддитивности использовались следующие значения плотности фаз ($г/см^3$): Ti_2AlC – 4,10; Ti_3AlC_2 – 4,24; Al_2O_3 – 3,98; TiC – 4,93. Измерения микротвёрдости проводили по ГОСТ 9450-76.

Давление, необходимое для уплотнения порошков импульсными методами и обеспечения достаточной прочности связей между частицами, рассчитано исходя из неравенства [3]

$$P \geq \omega H_{\mu}, \tag{1}$$

где H_{μ} – микротвёрдость материала, $\omega = 1-2$ – эмпирическая постоянная.

С учетом начальной плотности образца давление ударной волны составляет

$$P = \frac{\rho u^2}{\Pi} = \omega H_{\mu}, \tag{2}$$

где ρ – начальная плотность, Π – пористость, u – скорость ударной волны.

Рассчитанное по экспериментальным данным P составило 3–4 ГПа.

Т а б л и ц а 1. Состав образцов и режимы синтеза
T a b l e 1. Composition of samples and modes of synthesis

№ образца	Вещество	Продолжительность синтеза, мин
1	Ti_2AlC	30
2	Ti_2AlC	120
3–5	Ti_3AlC_2	30
6	Ti_3AlC_2	180

Т а б л и ц а 2. Свойства исследуемых материалов

T a b l e 2. Properties of obtained materials

Номер образца	Стадия импульсного нагружения	Фазовый состав, мас.%					Плотность, г/см ³	Пористость, %	Микротвердость материала, МПа
		Ti ₂ AlC	Ti ₃ AlC ₂	TiC	Al ₂ O ₃	иные примеси			
1	до	86	–	11	–	(Ti ₄ N ₃) 3	3,55	15,8	–
	после	97	–	3	–	–	3,56	13,4	547
	повторное	90	3	7	–	–	3,75	9,9	–
2	до	97	–	3	–	–	3,57	13,6	–
	после	96	–	4	–	–	3,58	13,3	605
3	до	–	98	2	–	–	3,35	21,2	–
	после	17	79	3	1	–	3,67	13,3	619
	повторное	–	95	5	–	–	3,79	11,3	–
4	до	–	94	6	–	–	3,38	21,0	–
	после	–	92	6	2	–	3,68	13,8	605
5	до	–	96	4	–	–	3,36	21,2	–
	после	–	90	6	4	–	3,67	13,6	456
	повторное	32	64	4	–	–	3,83	9,3	–
6	до	–	64	36	–	–	3,15	29,5	–
	после	3	54	43	–	–	3,59	18,7	690
	повторное	–	70	30	–	–	3,89	12,1	–

Изменение внутренней энергии массы порошка за фронтом ударной волны соответствует приобретенной кинетической энергии:

$$C = \frac{u^2}{2} = \frac{\Pi \omega N_{\mu}}{2\rho} \quad (3)$$

Предполагая, что приращение внутренней энергии ΔE имеет тепловую природу, рост температуры при импульсном прессовании определяли по зависимости

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{C} = \frac{\Pi \omega N_{\mu}}{2\rho C}, \quad (4)$$

где C – теплоемкость материала.

В соответствии с этой оценкой для полученных компактных материалов температура в условиях ударно-волнового нагружения составила 200–300 °С. При этом остаточная температура образцов, зафиксированная экспериментально, практически не отличалась от рассчитанной, достигаемой на фронте ударной волны. Это связано с тем, что адиабатическая составляющая температуры при ударно-волновом сжатии пористых материалов невелика [4].

Результаты исследований. Основными факторами воздействия взрыва на материалы являются ударные волны и волны разрежения. Параметры ударной волны связаны между собой законами сохранения массы, импульса и энергии. Отличие процессов ударно-волнового нагружения сплошных и порошковых (пористых) тел в том, что при сжатии пористого тела приращение тепловой энергии больше, чем для компактного тела.

Для обеспечения заданных свойств порошкового материала важными показателями являются значения плотности и пористости.

Из табл. 2 следует, что полученные в результате синтеза и ударно-волнового нагружения компакты имеют плотность в диапазоне 3,56–3,68 г/см³, что соответствует пористости порядка 13 %, тогда как до ударно-волнового нагружения плотность синтезированных образцов составляла 3,153,57 г/см³, что соответствует пористости порядка 21 %. Таким образом, пористость в результате однократного компактирования снизилась с 21 до 13 %.

Для увеличения плотности материала было проведено повторное импульсное нагружение образцов при тех же технологических параметрах.

Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о незначительных изменениях фазового состава в ходе ударно-волновой обработки.

Исключение составил образец № 1, для которого после компактирования зафиксировано увеличение содержания МАХ-фаз от 86 до 97 мас.% при одновременном уменьшении доли карбида титана с 11 до 3 мас.%.

Уменьшение содержания МАХ-фазы имело место в образцах № 4 и 5 в пределах 2–6 мас.%. В образце № 3 содержание Ti_3AlC_2 снизилось с 98 до 79 мас.% и образовалось значительное количество Ti_2AlC – 17 мас.%.

Отмеченные особенности связаны в основном с составом исходных материалов. Так, образцы № 1 и 3 были компактированы из порошков, синтезированных из карбида титана дефицитного по углероду, поэтому фазовый состав образцов нестабилен, но количество МАХ-фазы осталось на уровне исходного материала.

Следует отметить, что в условиях ударно-волнового нагружения происходит активация частиц порошка, что в свою очередь вызывает перегруппировку атомов в узлах кристаллической решетки с достижением состава, более близкого к равновесному. В случае образца № 1 это имеет положительный эффект и сопровождается увеличением количества фазы Ti_2AlC на 4 мас.%.

В образцах № 3 и 5 в ходе двукратного нагружения наблюдается колебание содержания МАХ-фазы в диапазоне 79–89 мас.%, что можно считать результатом разложения Ti_3AlC_2 до Ti_2AlC .

После повторного нагружения содержание Ti_2AlC в образце № 1 практически не изменилось и составило около 90 мас.%, однако отмечено снижение пористости образца с 15,8 до 9,9 %. Образец № 2 не подвергался повторному нагружению, и при высоком содержании МАХ-фазы (97 мас.%) пористость сохранилась выше 13 %. Имело место неравномерное уплотнение (в центре – до 3,58 г/см³, по краям – 3,40 г/см³). При этом фазовый состав материала остался прежним. Таким образом, для получения высокоплотного материала на основе Ti_2AlC компактирование следует проводить в несколько стадий.

В образце № 5 наблюдается повышение плотности относительно первоначального значения (от 3,36 до 3,83 г/см³) при снижении пористости до значения 9,3 %. В ходе повторного нагружения происходит разложение Ti_3AlC_2 до Ti_2AlC . Образец № 6 (с наименьшим содержанием МАХ-фазы) имеет при практически не меняющемся фазовом составе (70 мас.% Ti_3AlC_2) плотность 3,89 г/см³, пористость 12,1 % (при исходном значении пористости 29,5 %).

Чтобы проиллюстрировать целесообразность компактирования порошков МАХ-фаз методом ударно-волнового нагружения, проведены исследования по определению возможности использования полученных образцов в качестве интерконектов топливных ячеек взамен используемых сталей Crofer JDA (рис. 1). Необходимым условием для этого является стабильность свойств при работе в среде кислорода и водорода.

Для сравнительного анализа был подготовлен образец № 7, полученный методом горячего прессования под давлением 2 ГПа при температуре 1400 °С. После прессования образец имел пористость порядка 1 % и высокое содержание Ti_3AlC_2 (91 мас.%).

Результаты четырехстадийного теста для материалов на основе МАХ-фаз и стали Crofer JDA приведены на рис. 1. Кривая II на рис. 1, *b* соответствует поведению образца, предварительно окисленного 2 ч на воздухе при 1200 °С.

Структуры окисленных образцов показаны в правых верхних углах рис. 1, *a*, *b*.

Пористый материал на основе МАХ-фазы $TiAlC_2$ (пористость 22 %) окисляется очень быстро (рис. 1, *a*). В плотном материале стабилизация процесса окисления наблюдается после выдержки свыше 500 ч. Предварительное окисление при 1200 °С в течение 2 ч приводит к снижению количества оксидов (рис. 1, *b*, кривая II).

Прирост массы не превышает 0,05 мг/см². Структура и состав оксидного слоя этого материала приведены на рис. 2.

После нагрева на воздухе при 600 °С в течение 1000 ч приблизительный химический состав в отмеченных точках следующий:

S1, S4 и S5 – $SiC_{1.12}Ti_{0.04}O_{0.1}Mg_{0.01}$, $SiCTi_{0.01}$ и $SiC_{1.1}$ соответственно;

S3 (темные области) – $TiC_{5.2}Al_{0.4}O_{1.4}Na_{0.02}Mg_{0.1}Si_{0.05}$;

S3 (матрица) – $Ti_{2.2}AlC_2Si_{0.02}Fe_{0.09}$;

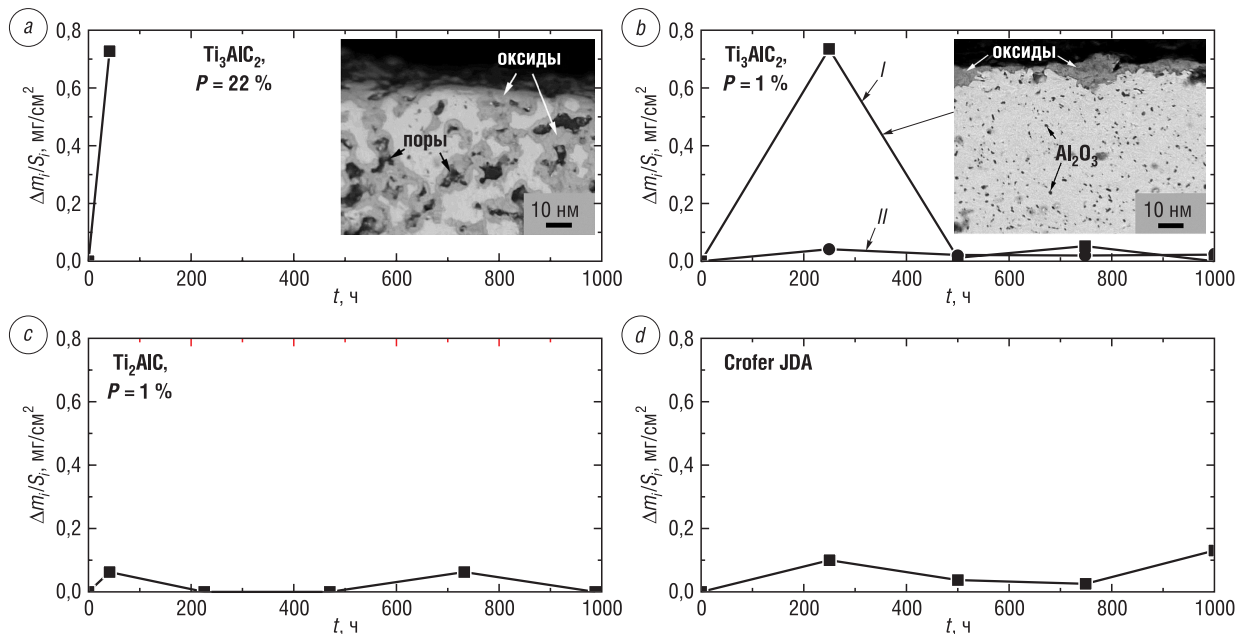


Рис. 1. Результаты исследования стойкости к длительному окислению на воздухе: *a, b, c* – MAX-фаза; *d* – сталь Crofer JDA

Fig. 1. Results of the research of resistance to long-term oxidation in air: *a, b, c* – MAX phase; *d* – steel Crofer JDA

- S6 – $\text{TiC}_{60}\text{O}_{14}\text{Na}_{1.2}\text{Mg}_{0.08}\text{Si}_{0.2}\text{C}$;
- S7, S11 – $\text{Ti}_2\text{Al}_{0.6-1}\text{C}_{0.6-1}\text{O}_{6-7}$ (основная составляющая пленки);
- S8 – $\text{ZrO}_2\text{CTi}_{0.03}$;
- S9 – $\text{C}_{107}\text{TiAl}_2\text{O}_{12}\text{Mg}_{0.1}\text{Si}_{2.3}$;
- S10 – $\text{AlC}_{0.6}\text{O}_6\text{Si}_{1.1}\text{Na}_{0.02}$;
- S01 – $\text{TiC}_{1.12}\text{O}_{3.1}$;
- S02 – $\text{TiAl}_{1.16}\text{C}_{2.3}\text{Nb}_{0.04}\text{O}_{10.4}$;
- S03 – $\text{TiAl}_{1.8}\text{C}_4\text{O}_{8.2}\text{Mo}_{0.05}\text{Si}_{0.17}$;
- S04 – $\text{Ti}_{3.1}\text{AlC}_{2.9}\text{Nb}_{0.11}\text{O}_{0.37}$;
- S05 – $\text{Ti}_{2.7}\text{AlC}_{4.3}\text{Nb}_{0.13}\text{O}_{0.8}$;
- S06 – $\text{Ti}_{1.8}\text{AlC}_{1.7}\text{Nb}_{0.05}\text{O}_{1.9}\text{Mg}_{0.1}$;
- S07 – $\text{Ti}_{2.7}\text{AlC}_{2.3}\text{Nb}_{0.08}\text{O}_{0.3}$;
- S08 – $\text{Al}_2\text{O}_4\text{Ti}_{0.16}\text{C}_{0.4}$.

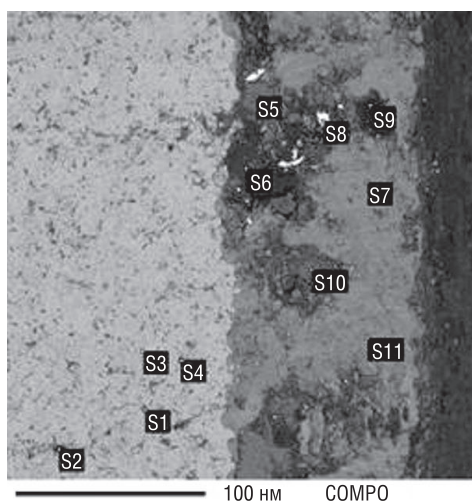


Рис. 2. Структура образца на основе Ti_3AlC_2
 Fig. 2. Structure of the sample based on Ti_3AlC_2

Указанные данные свидетельствуют о том, что стабильным в окислительной среде при температуре до $600\text{ }^\circ\text{C}$ является материал с минимальной пористостью (см. рис. 1, *b*). Для сравнения приведены данные для стали Crofer JDA, окисленной в таких же условиях (см. рис. 1, *d*). Значение $\Delta m_i/S_i$ для стали значительно выше, чем для материала на основе Ti_3AlC_2 . После первого этапа испытаний на длительную стойкость в окислительной среде оксидная пленка состояла из внутреннего слоя Cr_2O_3 и поверхностного слоя MnCr_2O_4 , потому что скорость диффузии Mn через внутренний слой Cr_2O_3 вдвое больше, чем Cr и Fe. Поверхностный слой способствует диффузии Cr из материала и прониканию оксида в материал.

Таким образом, на высокоплотные MAX-материалы слабо влияют высокие температуры ($600\text{ }^\circ\text{C}$) и водородная среда, они имеют более высокую прочность и стойкость к окислению (при $600\text{ }^\circ\text{C}$, 1000 ч), чем стали Crofer JDA.

Заклучение. Устаноўлена возможность использования ударно-волнового нагружения для компактирования порошков МАХ-фаз в системе Ti–Al–C. Показано, что в ходе обработки порошков $TiAlC_2$ и Ti_3AlC_2 пористость в зависимости от состава материала снижается до 9 % при первоначальной 22 %, фазовый состав практически не изменяется.

На примере сравнительных испытаний стойкости к окислению продемонстрировано, что метод ударно-волнового нагружения применим для получения конкурентоспособных материалов, реализующих потенциальные свойства МАХ-фаз. Отмечено, что для повышения жаростойкости необходимо стремиться к минимизации пористости материала. Существенное снижение пористости материала может быть достигнуто за счет многократного импульсного нагружения материала.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т15УК/А-068) совместно с Институтом сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Acknowledgements

The study was carried out at support of the grant of the Executive Board of the Foundation (T15UK/A-068), together with the V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Список использованных источников

1. Сметкин, А. А. Свойства материалов на основе МАХ-фаз (обзор) / А. А. Сметкин, Ю. К. Майорова // Вестн ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – № 4. – С. 120–138.
2. Исследование условий синтеза МАХ-фаз системы TiAlC и их компактирование методом ударно-волнового нагружения / Л. В. Судник [и др.] // Порошковая металлургия: Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: Беларус. наука, 2016. – Вып. 39. – С. 113–120.
3. Селиванов, В. В. Взрывные технологии / В. В. Селиванов, И. В. Кобылкин, С. А. Новиков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 519, [1] с.
4. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Канель [и др.]. – М.: Якус-К, 1996. – 408 с.

Reference

1. Smetkin A. A., Mayorov Yu. K. Properties of materials based on MAX-phases (review). *Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science], 2015, no. 4, pp. 120–138 (in Russian).
2. Sudnik L.V., Luchenok A. R., Kolodkevich Yu. I., Tkachuk V. S., Prikhna T. A., Basyuk T. V., Kozyrev A. V. Investigation of synthesis MAX phases of the system Ti–Al–C and compacting by method of shock wave loading. *Poroshkovaya metallurgiya. Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers.]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, Issue 39, pp. 113–120 (in Russian).
3. Selivanov V. V., Kobylkin I. V., Novikov S. A. *Explosive technologies*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2014. 519 p. (in Russian).
4. Kanel G. I., Razorenkov S. V., Utkin A. V., Fortov V. Y. *Shock-wave phenomena in condensed environment*. Moscow, Yakus-K Publ., 1996. 408 p. (in Russian).

Информация об авторах

Судник Лариса Владимировна – доктор технических наук, директор, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: impuls@bn.by

Лученок Алексей Романович – старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alar@tut.by

Козырева Юлия Ивановна – инженер, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: juliakolodkevich@gmail.com

Information about the authors

Larysa V. Sudnik – D. Sc. (Engineering), Director, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: impuls@bn.by

Aleksey R. Luchenok – Senior Researcher, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alar@tut.by

Yuliya I. Kozyreva – Engineer, Researcher, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: juliakolodkevich@gmail.com

Ткачук Виктор Сергеевич – инженер, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.tkachuk@tut.by

Прихна Татьяна Алексеевна – член-корреспондент Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, заведующая отделом «Технологии высоких давлений, функциональных керамических композитов и дисперсных сверхтвердых материалов», Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: prikhna@iptelecom.net.ua

Козырев Артем Вячеславович – кандидат химических наук, доцент, старший научных сотрудник, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: artem.v.kozyrev@gmail.com

Victor S. Tkachuk – Engineer, Researcher, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.tkachuk@tut.by

Tatiana A. Prikhna – Corresponding Member of the National Academy of Ukraine, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Division “Technologies of high pressures, functional ceramic composites and dispersed superhard materials”, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Ukraine (2, Avtozavodska Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: prikhna@iptelecom.net.ua

Artem V. Kozyrev – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Senior Researcher, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Ukraine (2, Avtozavodska Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: artem.v.kozyrev@gmail.com