

МЕТОДЫ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ Al–B–W В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

© 2019 г. В.А. Глушечков, И.А. Беляева, Ф.В. Гречников, В.А. Миронов,
Ю.С. Ушеренко, В.И. Песоцкий

Самарский научный центр РАН

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

Статья поступила в редакцию 19.11.18 г., доработана 26.11.18 г., подписана в печать 03.12.18 г.

В статье рассмотрено уплотнение порошка системы Al–B–W в медной оболочке. Из такого материала предполагается изготавливать, например, компоненты шлифовального инструмента или элементы радиационной защиты. Для этой цели необходимо получать как короткие, так длинномерные полуфабрикаты, что и потребовало создания и опробования различных технологических схем (методов), основанных на использовании статических, динамических нагрузок и их комбинаций. Проведенный анализ результатов экспериментов показал реальность и возможность реализации предложенных схем уплотнения для получения трубчатых полуфабрикатов различных размеров. Рассмотрена вся цепочка их производства – от получения порошков до уплотнения и спекания. Для оценки качества спеченной порошковой композиции проведены металлографические исследования, результаты которых показали почти полное отсутствие пор. Разработана технология, обеспечивающая создание из порошковой композиции состава Al–B–W новых изделий, в том числе и длинномерных.

Ключевые слова: порошковые композиционные материалы, алюминий-бор, оболочка, статическое прессование, магнитно-импульсный обжим, волочение, гибридные технологии.

Глушечков В.А. – канд. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением (ОМД) Самарского университета (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). E-mail: vgl@ssau.ru.

Беляева И.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры ОМД Самарского университета.
E-mail: belyaeva-ommr@yandex.ru.

Гречников Ф.В. – докт. техн. наук, проф., академик РАН, зав. кафедрой ОМД Самарского университета.
E-mail: fvgr48@mail.ru.

Миронов В.А. – докт. техн. наук, вед. науч. сотрудник НОЦ «Аэрокосмическая техника и технологии» Самарского университета. E-mail: viktors.mironovs@gmail.com.

Ушеренко Ю.С. – ст. науч. сотрудник НОЦ «Аэрокосмическая техника и технологии» Самарского университета.
E-mail: osher_yu@mail.ru.

Песоцкий В.И. – вед. инженер научно-исследовательской лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования Самарского университета. E-mail: vgl@ssau.ru.

Для цитирования: Глушечков В.А., Беляева И.А., Гречников Ф.В., Миронов В.А., Ушеренко Ю.С., Песоцкий В.И. Методы уплотнения порошковой композиции Al–B–W в металлической оболочке. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 2. С. 35–42. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-35-42.

Glushchenkov V.A., Belyaeva I.A., Grechnikov F.V., Mironov V.A., Usherenko Yu.S., Pesotsky V.I.

Compaction methods for Al–B–W powder composition in a metal shell

The article considers the compaction of Al–B–W system powder in a copper shell. Such material is supposed to be used, for example, to produce grinding tool components or radiation protection elements. For this purpose, it is necessary to obtain both short and long-length semi-finished products which required the development and testing of various technological schemes (technologies) based on the use of static, dynamic loads and their combinations. Analysis of the results of the experiments showed reality and the possibility of implementing the proposed schemes to obtain tubular semi-finished products of different sizes. The whole chain of their manufacturing from powder production to compaction and sintering is considered. Metallographic studies conducted to assess the quality of sintered powder composition demonstrated almost full absence of pores. The technology is developed to ensure making new products, including long-length ones, from powder composition.

Keywords: powder composite materials, aluminum-boron, shell, static pressing, pulse-magnetic reducing, drawing, hybrid technologies.

Glushchenkov V.A. – Cand. Sci. (Tech.), Prof., Department of metal forming, Samara University (443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34). E-mail: vgl@ssau.ru.

Belyaeva I.A. – Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of metal forming, Samara University. E-mail: belyaeva-ommr@yandex.ru.

Grechnikov F.V. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. of the RAS, Head of the Department of metal forming, Samara University. E-mail: fvgr48@mail.ru.

Mironov V.A. – Dr. Sci. (Tech.), Leading researcher, Research and education center «Aerospace engineering and technology», Samara University. E-mail: viktors.mironovs@gmail.com.

Usherenko Yu.S. – Senior researcher, Research and education center «Aerospace engineering and technology», Samara University. E-mail: osher_yu@mail.ru.

Pesotsky V.I. – Leading engineer, Research laboratory of progressive technological processes of plastic deformation, Samara University. E-mail: vgl@ssau.ru.

Citation: *Glushchenkov V.A., Belyaeva I.A., Grechnikov F.V., Mironov V.A., Usherenko Yu.S., Pesotsky V.I.* Compaction methods for Al–B–W powder composition in a metal shell. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 2. P.35–42 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-35-42.

Введение

Во многих отраслях машиностроения все шире используются композиционные материалы (КМ), обладающие уникальными свойствами. Так, например, в авиастроении нашли применение бор-алюминиевые композиты (Al–B–W) с высокими удельными характеристиками [1–5]. Из них изготавливаются корпусные детали, лопатки турбин, силовой набор и др. Имеются примеры успешного выполнения из такого материала ряда строительных конструкций. Однако после завершения эксплуатации изделий остается нерешенной экологическая проблема их утилизации, связанная со слишком большой разницей физических и механических свойств компонентов КМ. Так, температура плавления Al составляет 700 °С, W – 3000 °С,

а B – 2200 °С. Бор обладает второй после алмаза твердостью, хорошо поглощает быстрые и медленные нейтроны и т.д.

Цель настоящей работы состояла в разработке технологии утилизации бор-алюминиевых конструкций – от измельчения до порошковой композиции и ее прессования в металлической оболочке до получения новых изделий.

Постановка вопроса и его техническое решение

Одним из первых шагов утилизации волокнистого композиционного материала Al–B–W является дробление и измельчение фрагментов



Рис. 1. Последовательность операций: от дробления фрагментов изделий до получения порошковой композиции

конструкции до порошкового состояния [6, 7]. Технологическая цепочка получения такого порошка показана на рис. 1. Ниже представлен его химический состав, мас. %:

В	87,30	Ti.....	0,06
С.....	7,01	Mn.....	0,09
О.....	4,88	Fe.....	0,54
Mg.....	0,54	Co.....	0,24
Al	7,26	Ag.....	0,07
Si.....	1,20	W	3,01

Размеры полученных частиц составляли 50–100 нм.

Для изготовления новых изделий предложено использовать исследуемый порошок Al–В–W путем засыпки его в тонкостенную медную оболочку, получив после уплотнения и спекания прутковый полуфабрикат [8, 9]. При этом металлическая оболочка выполняет силовую подкрепляющую роль, а внутренний порошок несет свою специальную функцию. Например, при создании шлифовального инструмента металлическая оболочка воспринимает центробежные силы при кручении, а порошковая композиция, вернее, ее составляющая — бор (второй по твердости материал после алмаза), выступает в качестве режущего инструмента. Функциональное назначение порошка будет тем выше, чем лучше будет качество уплотнения и спекания.

Примером получения длинномерных конструкций из такого же полуфабриката может служить создание из него элементов радиационной защиты [10, 11]. Здесь оболочка также выполняет несущую конструкционную роль, а частицы бора поглощают быстрые и медленные нейтроны.

Таким образом, в технике находят применение как короткие, так и длинные полуфабрикаты из порошковой композиции Al–В–W в металлической оболочке. В обоих случаях требуется высокая плотность порошкового конгломерата, а необходимая длина полуфабриката, кроме того, потребовала разработки различных технологических схем уплотнения (табл. 1).

1 — статическое осевое уплотнение [12];

2 — статико-динамическое осевое уплотнение, когда с одной стороны действует статическая нагрузка, а с противоположной — динамическое нагружение (периодическое) [13];

3 — динамическое радиальное уплотнение путем магнитно-импульсного обжима оболочки [14];

4 — пошагово-радиальное динамическое уплотнение путем магнитно-импульсного обжима оболочки с порошковой композицией [15];

5 — продольно-радиальное статико-динамическое уплотнение (гибридная технология), осуществляемое волочением и магнитно-импульсным обжимом. Возможна и обратная очередность операций: магнитно-импульсный обжим и последующее волочение [16].

Схемы 1–3 могут быть использованы для получения коротких полуфабрикатов, а 4, 5 — для изготовления длинномерных прутков.

Методика поискового эксперимента

Для оценки реализации разработанных схем уплотнения были проведены поисковые эксперименты. При этом исследовалось влияние основных технологических факторов процессов уплотнения на качество получаемых образцов [17, 18]. Форма и геометрические размеры исходных образцов приведены на рис. 2.

В качестве металлической оболочки использовалась медная (М1) труба диаметром 18 мм с толщиной стенки 1,0 мм. Состав порошковой композиции соответствовал приведенному выше. Статическое осевое прессование (сх. 1) осуществлялось на гидравлическом прессе ПСУ-50, динамическое радиальное (сх. 3) — на магнитно-импульсной установке МИУ-10 [19–21]. Для волочения использовалось приспособление, закрепляемое в испытательной машине ЦДМУ-30. При уплотнении на прессе измерялось усилие сжатия (P), на МИУ — энергия разряда (W), ток (J) и напряженность магнитного поля (H), при волочении — усилие протяжки (Q). Во всех случаях после уплотнения фиксировались конечные геометрические размеры образцов — диаметр (d) и длина (l).

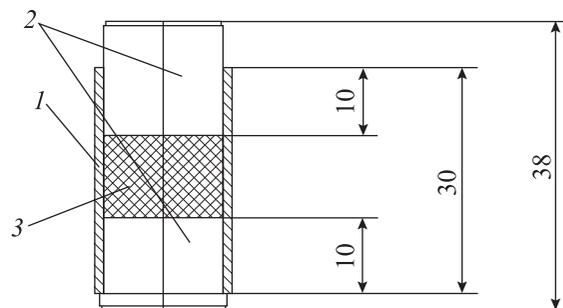


Рис. 2. Образец медной оболочки

1 — труба, 2 — заглушки, 3 — порошок. Размеры указаны в мм

Таблица 1
Технологические схемы уплотнения порошковой композиции в металлической оболочке

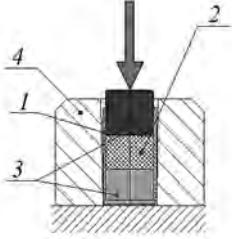
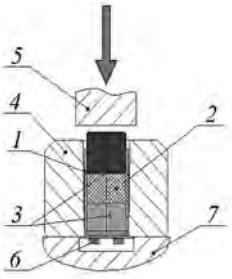
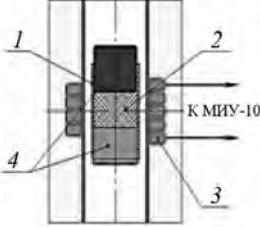
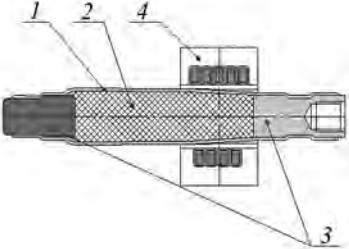
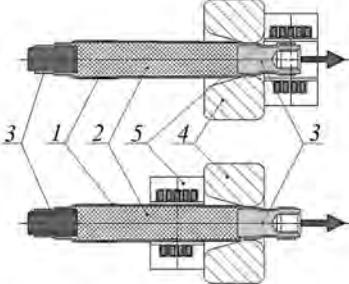
№ схемы	Уплотнение	Технологическая схема	Полуфабрикаты
1	Статическое осевое	 <p>1 – труба, 2 – порошок, 3 – заглушки, 4 – контейнер</p>	
2	Статико-динамическое осевое	 <p>1 – труба, 2 – порошок, 3 – заглушки, 4 – контейнер, 5 – пуансон, 6 – индуктор, 7 – упор</p>	Короткие
3	Динамическое радиальное	 <p>1 – труба, 2 – порошок, 3 – индуктор, 4 – заглушки</p>	
4	Пошагово-радиальное динамическое	 <p>1 – труба, 2 – порошок, 3 – заглушки, 4 – индуктор</p>	
5	Продольно-радиальное статико-динамическое (волочение + магнитно-импульсный обжим)	 <p>1 – труба, 2 – порошок, 3 – заглушки, 4 – волокна, 5 – индуктор</p>	Длинномерные

Таблица 2
Результаты экспериментальных исследований

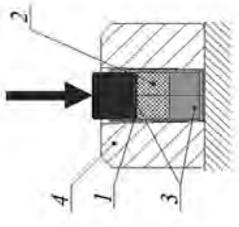
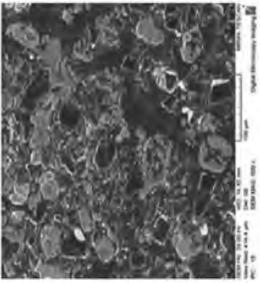
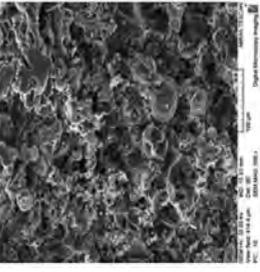
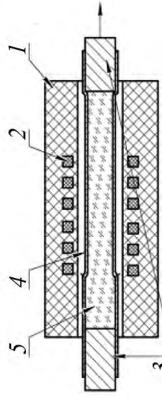
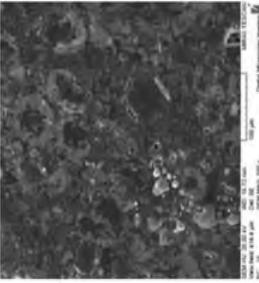
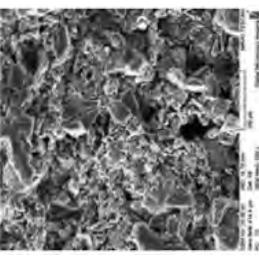
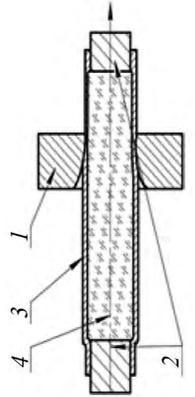
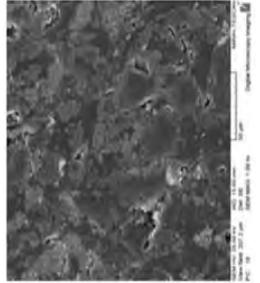
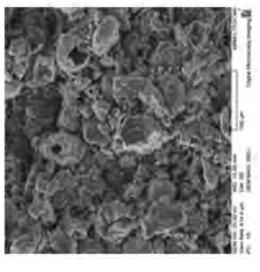
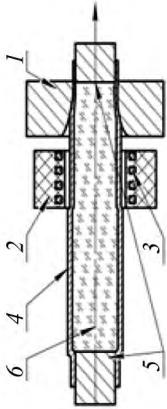
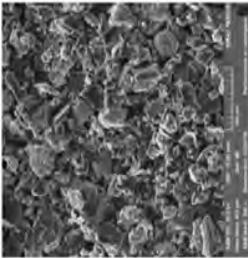
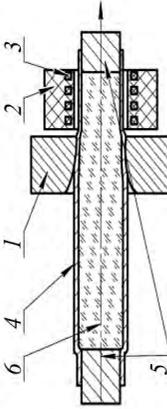
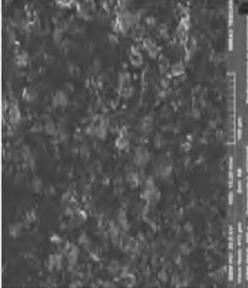
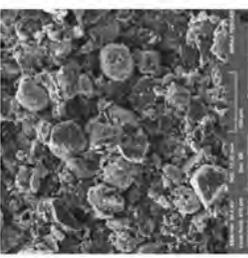
№ схемы	Технологическая схема уплотнения	Параметры уплотнения		Геометрические размеры, мм				К	Металлография после уплотнения и спекания		
		P, кН	W, кДж	P _{вол} , кН	d _{нач} , мм	l _{нач} , мм	d _{кон} , мм		l _{кон} , мм	Шлиф	Излом
1	<p>Статическое осевое</p>  <p>1 – труба, 2 – порошок, 3 – заглушки, 4 – контейнер</p>	44,77	–	–	18,0	38,0	18,1	34,1	0,96	 	
2	<p>Статико-динамическое осевое</p>  <p>1 – магнитно-импульсный индуктор на обжим, 2 – элементы обмотки, 3 – заглушки, 4 – металлическая оболочка, 5 – порошковый материал</p>	Предвари- тельная статическая подпрессовка 69	4,7	–	–	18,0	30,0	17,5	30,2	0,95	 
3	<p>Динамическое радиальное</p>  <p>1 – волокна, 2 – заглушки, 3 – труба, 4 – порошковый материал</p>		–	–	11	18,0	95,0	17,0	99,0	0,92	 

Таблица 2
 Результаты экспериментальных исследований (окончание)

№ схемы	Технологическая схема уплотнения	Параметры уплотнения		Геометрические размеры, мм				К	Металлография после уплотнения и спекания		
		P , кН	W , кДж	$P_{\text{водр}}$ кН	$d_{\text{нач}}$ мм	$l_{\text{нач}}$ мм	$d_{\text{кон}}$ мм		$l_{\text{кон}}$ мм	Шлиф	Излом
4	Пошагово-радиальное динамическое  1 – волокна, 2 – индуктор, 3 – обмотка, 4 – металлическая оболочка, 5 – заглушки, 6 – порошковый материал	4,7	6	18,1	82,0	17,0	83,5	0,90			
5	Продольно-радиальное статико-динамическое (волокно + магнитно-импульсный обжим)  1 – волокна, 2 – индуктор, 3 – обмотка, 4 – металлическая оболочка, 5 – заглушки, 6 – порошковый материал	Предвари- тельная статическая подпрессовка 69	4,7	6	18,1	84,0	16,5	86,0	0,86		

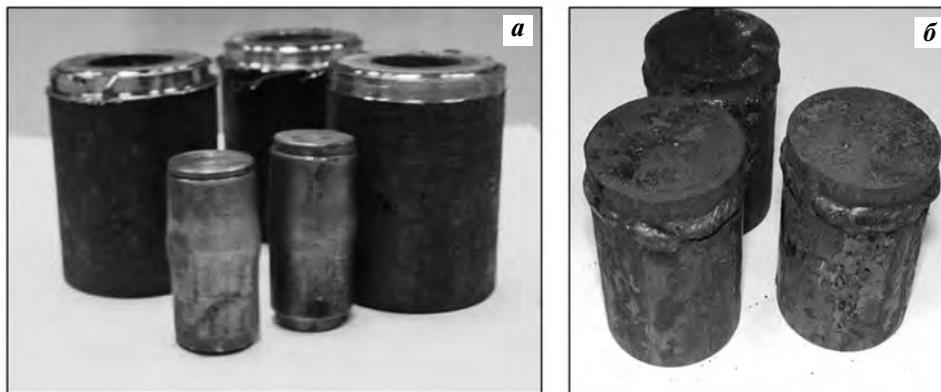


Рис. 3. Образцы и контейнеры до (а) и после (б) спекания

Спекание образцов проводилось в запаянных контейнерах с наполнителем состава $W + 20\% \text{ Ti}$ (рис. 3) при ступенчатом нагреве до температур 600, 800 и 900 °С [21].

После спекания подготавливались поперечные шлифы и фотографировались структура и излом спеченного конгломерата в характерных точках.

Методика экспериментов

Минимальное значение статической подпрессовки порошка $P = 44$ кН определялось по моменту перехода трубы в пластическое состояние (раздача). Дальнейшее увеличение нагрузки осуществлялось уже в контейнере (см. табл. 1, сх. 1, поз. 4). Во всех остальных схемах в качестве предварительного уплотнения использовалось одно и то же статическое усилие $P = 69$ кН. Динамическое радиальное уплотнение (сх. 3) проводилось при напряженности магнитного поля в интервале $H = (16,7 \div 21,9) \cdot 10^6$ А/м.

При волочении (сх. 5) использовалась волока диаметром 17,0 мм с последующим обжимом импульсным магнитным полем при $H = 1,91 \cdot 10^6$ А/м.

Таким образом, в процессе поисковых экспериментов варьировались осевое статическое давление P (сх. 1), энергия магнитно-импульсного обжима W (сх. 2). Для гибридной технологии (см. табл. 2, сх. 4 и 5) коэффициент редуцирования $K = V_k/V_0$, где V_k и V_0 — объем порошковой композиции до и после уплотнения, составляет 0,9 и 0,86 соответственно при $W = 2,9, 4,0$ и 5,1 кДж.

Результаты экспериментов

В табл. 2 в качестве примера приведены начальные и конечные геометрические размеры образ-

цов и их металлография в поперечном сечении после уплотнения и спекания порошковой композиции при $t = 900$ °С.

Анализ полученных результатов

Расчетный объем образцов до и после уплотнения свидетельствует о достаточно высокой степени уплотнения $K = 0,97 \div 0,86$. О хорошем качестве уплотнения говорят и полученные шлифы — почти полное отсутствие пор.

Динамическое нагружение приводит к незначительному дополнительному измельчению порошка (см. табл. 2, сх. 1 и 2), а при гибридной технологии наблюдается некоторая вытянутость структуры (см. табл. 2, сх. 4).

Заключение

Разработаны и опробованы в лабораторных условиях различные технологические схемы уплотнения порошковой композиции Al—B—W в медной оболочке с высокой плотностью, позволяющие получать как короткие, так и длинные изделия различного назначения [22]. Разнообразие схем дает возможность их выбора при решении конкретных задач производства, оптимального как с технической, так и с экономической точек зрения.

Литература/References

1. *Скворцов Ю.В.* Механика композиционных материалов. Самара: Учебная литература, 2013.
Skvortsov Yu.V. Mechanics of composite materials. Samara: Uchebnaya literatura, 2013 (In Russ.).
2. *Фридляндер И.Н.* Композиционные материалы с ме-

- таллической матрицей. М.: Авиационная промышленность ВИАМ, 1984 (In Russ).
- Fridlyander I.N.* Composite materials with metal matrix. Moscow: Aviacionnaya promyshlennost' VIAM, 1984 (In Russ.).
3. *Chawla N., Chawla K.* Metal matrix composites. Springer Science & Business Media, 2006.
 4. *Комиссар О.Н.* Композиционные материалы и технологии для аэрокосмической промышленности. *Новости материаловедения. Наука и техника.* 2013. No. 4. С. 1—3.
Komissar O.N. Composite materials and technologies for the aerospace industry. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika.* 2013. No. 4. P. 1—3 (In Russ.).
 5. *Буланов И.М.* Технология ракетных и авиакосмических конструкций из композиционных материалов. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 1998.
Bulanov I.M. Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials. Bauman MSTU, 1998 (In Russ.).
 6. *Tumanok A., Kulu P., Goljindin D., Rostsin P.* Disintegrator as a machine for utilizing of metal chips to metal powder. The recycling of metals. In: *Proc. III ASM International Conference and Exhibition*, Barcelona. 1997. P. 513—522.
 7. *Bakaev A.G., Zdor G.N., Bobrova D.A.* Recycling of borromini. Minsk: NAS of Belarus, 2017. P. 1—5.
 8. *Kim J.H., Rumman M.R., Rhee C.K., Lee J.G., Lee M.K., Hong S.J.* Fabrication and densification behavior analysis of metalizing targets using ZrO₂ nanopowders by magnetic pulsed compaction. *Mater. Trans.* 2011. Vol. 52. No. 6. P. 1156—1162.
 9. Материалы и сервис для защиты от износа. <http://uploads/files/hardfacing-materials-durum.pdf> (дата обращения: 01.10.2018).
Materials and service for wear protection <http://uploads/files/hardfacing-materials-durum.pdf> (accessed: 01.10.2018) (In Russ.).
 10. *Василенко И.Я., Василенко О.И.* Радиация и человек. *Проблемы глобальной безопасности.* 2002. No. 6. С. 13—16.
Vasilenko I.Ya., Vasilenko O.I. Radiation and person. *Problemy global'noj bezopasnosti.* 2002. No. 6. P. 13—16 (In Russ.).
 11. *Ольшанский Г.С.* Радиация, радиационные поражения, радиационная защита. Новокузнецк: НГПИ, 2002.
Ol'shanskiy G.S. Radiation, radiation damage, radiation protection. Novokuznetsk: NGPI, 2002 (In Russ.).
 12. *Boyko I., Mironov V., Lapkovsky V.* Property and structure changes of sintered powder materials by the treatment in the pulse electromagnetic field. In: *Proc. of Euro PM.* 2007. Vol. 3. P. 439—444.
 13. *Lymer A.* An engineering approach to the selection and application of mechanical seals. In: *Proc. of 4-th Inter. Conf. on Fluid Sealing.* USA. 1969. P. 30—32.
 14. *Ильющенко А.Ф.* Порошковая металлургия в Беларуси: Вызов времени. Минск: Беларуская наука, 2017.
Ilyushchenko A.F. Powder metallurgy in Belarus: The challenge of time. Minsk: Belaruskaya nauka, 2017 (In Russ.).
 15. *Emeruwa E., Jarrige J., Mexmain J.* Ferrite powder compaction with ultrasonic assistance. In: *Euro Ceramics.* London: Elsevier, 1989. P. 1248—1252.
 16. *Belyaeva I., Jusupov R., Glushchenkov V.* Problems of realization of static-dynamic technologies and ways of their solution. *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 684. P. 515—522.
 17. *Глушечков В.А., Беляева И.А., Бурмистров А.Е., Миронов В.А.* Способ прессования порошковой композиции в деформируемой электропроводящей оболочке: Пат. 2651094 (РФ). 2018.
Glushchenkov V.A., Belyaeva I.A., Burmistrov A.E., Mironov V.A. Method of pressing the powder composition in a deformable conductive shell: Pat. 2651094 (RF). 2018 (In Russ.).
 18. *Kostryukov E.E., Yusupov R.Yu.* Design features of the small-scale PMI power unit. *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 684. P. 530—534.
 19. *Nishimura T., Jinbo K., Matsuo Y., Kimura S.* Forming of ceramic powders by cyclic-CIP. Effect of bias pressure. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1990. Vol. 98. P. 742—745.
 20. *Белый И.В., Ферттик С.М., Хищенко Л.Т.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Высшая школа, 1977.
Belyy I.V., Fertik S.M., Khimchenko L.T. Handbook of magnetic pulse processing of metals. Khar'kov: Vysshaya shkola, 1977 (In Russ.).
 21. *Барбарович Ю.К.* Использование энергии сильного импульсного магнитного поля для прессования порошков. *Порошк. металлургия.* 1979. No. 2. С. 24—31.
Barbarovich Yu.K. Using the energy of a strong pulsed magnetic field for pressing powders. *Poroshk. metallurgiya.* 1979. No. 2. P. 24—31 (In Russ.).
 22. *Belyaeva I., Mironov V.* Combined magnetic pulsed compaction of powder materials. *Key Eng. Mater.* 2017. Vol. 746. P. 235—239.