

7. *Processing of high-density submicrometer Al₂O₃ for new applications* / A. Krell [et al.] // Am. Ceram. Soc. – 2003. – Vol. 86. – P. 546–553.
8. *Influence of powder, chemistry and intergranular phases on the wear resistance of liquid-phase-sintered Al₂O₃* / A. P. Goswami [et al.] // Ceramics International. – 2000. – Vol. 244. – P. 1–14.
9. Лукин, Е. С. Прочная керамика на основе оксида алюминия и диоксида циркония / Е. С. Лукин, Н. А. Попова, Н. И. Здвижкова // Стекло и керамика. – 1993. – № 9–10. – С. 25–30.
10. Zhou, J. Erosion characteristics of alumina ceramics at high temperatures / J. Zhou, S. Bahadur // Europ. Cer. Soc. – 1995. – P. 178–188.
11. *Influence factors on wear resistance of two alumina matrix composites* / F. C. Zhang [et al.] // Ceramics Int. – 2008. – Vol. 265. – P. 27–33.
12. Новые износостойкие материалы на основе корунда, синтезированные в Солнечной печи / Д. Д. Гуламова [и др.] // Гелиотехника. – 2001. – № 2. – С. 79–84.

PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT CERAMICS $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

O. R. Parpiev¹, M. S. Paizullakhanov¹, O. T. Rajamatov¹, Zh. Z. Shermatov¹, A. M. Zhivulko²,
S. B. Lastovsky², V. R. Sobol³, K. I. Yanushkevich²

¹*Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan,
e-mail: shermatov-82@bk.ru*

²*Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Minsk, Belarus*

³*Belarusian State Pedagogical University named after. M. Tank, Minsk, Belarus*

A synthesis of the compositions of wear-resistant ceramics $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ was carried out; composition-property diagrams of ceramics were studied, which made it possible to select the optimal compositions of wear-resistant samples in terms of water absorption, shrinkage, bending strength, abrasion, apparent density and heat resistance.

УДК 621.891:620.22

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СПОСОБОВ СПЕКАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ПОРОШКОВЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ В СВОЕМ СОСТАВЕ НАПОЛНИТЕЛИ РАЗЛИЧНОГО СТРУКТУРНОГО УРОВНЯ

В. Н. Пасовец¹, В. А. Ковтун¹, Ю. М. Плескачевский²

¹*Университет гражданской защиты, Беларусь, г. Минск, e-mail: pasovets_v@mail.ru*

²*Национальная академия наук Беларуси, Беларусь, г. Минск, e-mail: pleskym@mail.ru*

В работе представлен обзор высокоскоростных способов формирования порошковых материалов с применением электрического тока. Показано, что применение электроконтактного спекания является наиболее обоснованным с технологической точки зрения способом получения металлополимерных композиционных материалов триботехнического назначения, содержащих в своем составе дисперсный полимерный и углеродный наноструктурный наполнители.

Введение. Технологии порошковой металлургии позволяют получать композиционные материалы, обладающие заданным набором свойств и содержащие в своем составе металлические и неметаллические компоненты, которые трудно или невозможно консолидировать другими способами [1, с. 115]. На сегодняшний день возросла потребность в материалах триботехнического назначения, предназначенных для работы в режиме самосмазывания. Наиболее перспективными наполнителями современных материалов данного класса являются различные полимеры и наноразмерные частицы – например, наноструктуры углерода в виде углеродных нанотрубок и луковичных наноструктур углерода.

Одним из наиболее перспективных высокоскоростных методов получения указанных материалов по технологии порошковой металлургии является спекание электрическим током [2, с. 4; 3, с. 55]. К отечественным способам консолидации исходных компонентов, основанным на пропускании электрического тока, относятся: электроимпульсное спекание, электроимпульсное

прессование, электроразрядное спекание и электроконтактное спекание, развиваемые в Республике Беларусь и Российской Федерации. К зарубежным способам относятся Plasma assisted sintering (PAS) и Spark plasma sintering (SPS). Однако не все из перечисленных способов применимы для получения композиционных материалов, содержащих в своем составе полимерные и углеродные наноструктурные наполнители, так как основными требованиями к данным материалам являются: высокая износостойкость, низкий коэффициент трения, удовлетворительные механические характеристики и высокие теплопроводящие свойства. Получение порошковых материалов с указанными свойствами возможно только при выполнении требований сохранения структуры исходных полимерных и наноразмерных углеродных компонентов, что существенно ограничивает температуру спекания и длительность теплового воздействия в процессе технологической обработки.

Аналитический обзор высокоскоростных способов спекания электрическим током.

Сущность способа электроимпульсного спекания [4] состоит в пропускании высоковольтного импульса тока через порошковую электропроводящую систему, помещенную в матрицу, изготовленную из неэлектропроводящего материала. Длительность высоковольтного электрического импульса находится в пределах от 10^{-6} до 10^{-3} с, а плотность тока составляет от 100 до 1000 А/мм². Воздействие импульса электрического тока на порошковую систему приводит к выделению тепловой энергии в зонах контактирования частиц металлического порошка, разрушению оксидных пленок и образованию жидкой фазы металла, последующая кристаллизация которой ведет к консолидации исходных компонентов спекаемого материала. С одной стороны, применение матриц из диэлектрических материалов является преимуществом данного способа, так как энергия электрического тока преобразуется в тепловую энергию исключительно в зонах контактного взаимодействия частиц металлического порошка. С другой стороны, данная особенность способа не позволяет проводить спекание диэлектрических порошков. При этом уплотнение порошка осуществляется за счет сил магнитного поля, а степень уплотнения зависит от количества подведенной энергии, сопротивления окисных пленок, размера частиц порошка, физических и химических свойств материала порошка, а также геометрии порошковой заготовки и ее размеров. Необходимо отметить, что отсутствие существенного внешнего давления на порошковую систему не позволяет сформировать материал с низкой плотностью и высокими значениями предела прочности при сжатии. Анализ литературных данных показал, что максимальная прочность спеченных материалов наблюдается в направлении пропускания импульса тока.

Электроимпульсное прессование [5] представляет собой способ консолидации порошков в изделия, при котором применяется одновременное воздействие короткого (10^{-5} – 10^{-3} с) высоковольтного импульса электрического тока (плотность тока 100 А/мм²) и механического давления (50–500 МПа). При этом кроме основных электрических параметров процесса электроимпульсного спекания, таких как плотность тока и длительность импульсов электрического тока, на характеристики получаемых материалов влияет такой параметр, как давление прессования. Применение данного способа при получении металлополимерных композитов для узлов трения ограничено в связи с невысокой прочностью получаемых материалов, что связано с кратковременностью воздействия электрическим током невысокой плотности.

Электроразрядное спекание [6] представляет собой процесс, состоящий из двух стадий. На первой стадии осуществляется пропускание электрического тока плотностью в несколько ампер на квадратный сантиметр через слабоспрессованный порошок при давлении прессования менее 10 МПа, что сопровождается возникновением искрения на межчастичных контактах и разрушением оксидных пленок, имеющих на поверхностях частиц. Для спекания используются либо импульсы постоянного тока, либо наложенные друг на друга импульсы постоянного и переменного тока. На второй стадии увеличивают плотность тока до нескольких тысяч ампер на квадратный сантиметр. Стадия спекания завершается отключением тока при медленном понижении давления в течение периода охлаждения. В качестве особенности процесса можно отметить, что многократное включение тока положительно влияет на свойства материалов, получаемых электроразрядным спеканием. Однако применение данного способа консолидации исходных компонентов металлополимерных композитов нежелательно в связи с невысокой плотностью формируемых материалов, а также недостаточно высокими значениями предела прочности при сжатии.

При использовании спекания, активированного плазмой (plasma activated sintering – PAS) [7], происходит образование плазмы за счет пульсирующей составляющей электрического напря-

жения. Порошковый материал нагревается за счет джоулевого тепловыделения при протекании постоянного тока (до 800 А), одновременно с этим к порошковой заготовке, расположенной в пресс-форме, кратковременно прикладывается осевое давление, которое вызывает пластическую деформацию уплотняемого материала. Считается, что совместное воздействие электрических разрядов, джоулев нагрев и механическое давление вызывают ускорение процессов уплотнения. При использовании данного способа применяется максимальное усилие прессования 50 кН, что позволяет судить о невозможности применения данного способа для получения металлополимерных композитов триботехнического назначения.

Плазменно-искровое спекание (spark-plasma sintering – SPS) [8] является одним из способов консолидации порошков, при котором применяются низковольтные источники импульсов тока. При этом через спекаемый образец пропускается постоянный ток в импульсной форме с длительностью импульсов от 1 до 300 мкс и прикладывается давление. Особенностью плазменно-искрового способа спекания является использование электрического тока напряжением менее 30 В при силе тока до 1000 А. Хотя данный способ обеспечивает высокие скорости нагрева, короткие по длительности циклы и низкие температуры спекания, однако его применение для получения металлополимерных композитов, содержащих в своем составе наноструктуры углерода, нежелательно в связи с использованием невысокой силы тока.

Более совершенным способом консолидации исходных компонентов является электроконтактное спекание [9], заключающееся в пропускании через металлические порошки кратковременных импульсов переменного электрического тока большой силы (до 22 кА) и низкого напряжения (до 6 В) при одновременном приложении давления. При этом за счет активации процессов спекания и ускорения процессов уплотнения за короткий промежуток времени (0,1–10 с) получают материалы с заданным набором свойств, определяемым химическим составом и структурой как исходных компонентов, так и вновь образуемых соединений. В связи с вышеизложенным можно отметить, что электроконтактное спекание является наиболее приемлемым для получения металлополимерных композиционных материалов триботехнического назначения, содержащих в своем составе наполнители в виде дисперсных полимеров и наноструктур углерода.

Заключение. Таким образом, в работе выполнен обзор существующих высокоскоростных способов формирования порошковых материалов. Показано, что применение электроконтактного спекания является наиболее обоснованным для получения металлополимерных композиционных материалов, содержащих в своем составе наполнители в виде дисперсных полимеров и наноструктур углерода.

Литература

1. *Порошковые* нанокompозиты триботехнического назначения / В. Н. Пасовец [и др.]. – Минск : КИИ, 2016. – 295 с.
2. Райченко, А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А. И. Райченко. – М. : Металлургия, 1987. – 128 с.
3. Минько, Д. В. Теория и практика получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2020. – 450 с.
4. Белявин, К. Е. Теоретические исследования формирования межчастичных контактов при электро-разрядном спекании порошковых материалов / К. Е. Белявин, Д. В. Минько, Н. В. Решетников // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. – 2009. – № 3. – С. 139–145.
5. Григорьев, Е. Г. Кинетика электроимпульсного прессования порошковых материалов / Е. Г. Григорьев // Вестн. Моск. гор. пед. ун-та. Сер.: Естеств. науки. – 2008. – Т. 20, № 1. – С. 85–88.
6. Спекание металлических порошков серией сильноточных импульсов / Н. Н. Заводов [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 1999. – Т. 37, № 1. – С. 135–141.
7. Effect of plasma activated sintering (PAS) parameters on densification of copper powder / S.W. Wang [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2000. – Vol. 35, Is. 4. – P. 619–628.
8. Omori, M. Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS) / M. Omori // Materials Research Bulletin. – 2000. – Vol. 287, Is. 2. – P. 183–188.
9. Плескачевский, Ю. М. Основы технологии электроконтактного спекания наноструктурированных металлополимерных покрытий триботехнического назначения / Ю. М. Плескачевский, В. А. Ковтун // Автоматическая сварка. – 2013. – № 10/11. – С. 72–79.

FEATURES OF APPLICATION OF HIGH-SPEED METHODS FOR ELECTRIC CURRENT SINTERING OF POWDERED METAL-POLYMER MATERIALS CONTAINING FILLERS OF DIFFERENT STRUCTURAL LEVEL

V. N. Pasovets ¹, V. A. Kovtun ¹, Yu. M. Pleskachevsky ²

¹ University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: pasovets_v@mail.ru

² National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: pleskym@mail.ru

The paper presents an overview of high-speed methods for forming powder materials using electric current. It has been shown that the use of electrocontact sintering is the most technologically justified method for producing metal-polymer composite materials for tribotechnical purposes, containing dispersed polymer and carbon nano-structured filler.

УДК 666.3-1-12-127

ГРАНУЛЫ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ ВОД

Е. Е. Петюшик¹, А. А. Дробыш², К. С. Кашуба², Ю. А. Костюченко²

¹Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

В статье анализируются возможности формирования пористых гранул из базальтового волокна и возможность их использования для очистки промывных вод.

Введение. В процессе эксплуатации систем водоподготовки загрузка фильтров загрязняется и нуждается в промывке, причем количество затрачиваемой на это воды достигает до 10–15 % от производительности системы. Наиболее экономически и экологически выгодный вариант утилизации промывных вод фильтров – их повторное использование в системах водоочистки. Для этого осветленная в отстойнике вода проходит доочистку на фильтрах и обеззараживается. Усредненные значения концентраций примесей в загрязненных промывных водах могут достигать 300 мг/дм³, соединений железа – до 200 мг/дм³. Объем загрязненных промывных вод достигает 14 % от добываемой воды из подземных горизонтов. Анализ современного состояния практики очистки загрязненных промывных вод станций обезжелезивания с применением механических и физико-химических аппаратов и установок выявил проблему создания высокопроизводительных, малогабаритных энергосберегающих технологий и оборудования, позволяющих в максимальной степени извлекать примеси и возвращать воду для повторного использования [1]. Применяемые на сегодняшний день фильтрующие материалы характеризуются значительным гидравлическим сопротивлением и большим удельным весом, приводящим к большим энергетическим и эксплуатационным затратам. Поэтому создание гранул, используемых в качестве фильтрующих загрузок при очистке промывных вод, является актуальной задачей.

Цель работы – исследование структуры и свойств гранул на основе базальтового волокна.

Материалы и методики испытаний. Гранулы диаметром 3 мм и высотой 3 мм готовили на основе базальтового волокна. Формование гранул производили в грануляторе марки ОГМ-1,5; спекание – в лабораторной печи SNOL 7,2/1100 в воздушной среде при 1050 °С в течение 3 ч. Вид гранул представлен на рис. 1.

В состав шихты для прессования кроме базальтового волокна входили следующие компоненты: связующее (далее КМЦ), пластификатор (сырье глинистое ТР 37328907-1.01-00), поробразователь ТУ РБ 00959441.005 и неионогенный ПАВ (фрилан Б ТУ РБ 37430824.002-97). Для приготовления связующего использовали: клей КМЦ ТУ 6-15-1077-92, воду дистиллированную ГОСТ 6709-72.



Рис. 1. Вид гранул на основе базальтового волокна