

УДК 621.762:621.762.660.2:669:532.6:541

А. В. Деревянко, Т. И. Истомина, А. И. Райченко

ПРОЦЕССЫ, КОТОРЫЕ ИНИЦИИРУЮТСЯ ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА (ОБЗОР)

При пропусканні електричного струму крізь комплексну порошкову систему в процесі консолідації спостерігається декілька стадій проходження технологічного процесу. Практичні дослідження показали, що на початковій стадії процесу електроспікання між частинками створюються достатні умови для здійснення процесу електричного пробоя діелектричного шару. Після цього речовина порошкового компакту стає електропроводною в зонах переходу від однієї порошкової частинки до іншої. На цій стадії процес вже характеризується суттєвою нестационарною. Це пов'язано із статистичним характером зміни загального числа контактних зон і з проходженням електричного струму по містках, де відбуваються перехідні фізико-хімічні процеси. Це впливає на подальший процес ущільнення.

Ключові слова: електричний струм, порошкова система, контактна сітка.

Вступление

В современном материаловедении неорганических материалов большое значение имеет изучение процессов, происходящих в глубине фаз и на межфазовых поверхностях. Большое значение при этом играют экспериментальные наработки, которые могут показать закономерности сплавообразования и другие явления диффузионной природы для порошковых систем. Выявление новых подходов реализации в этом аспекте может стать важными фундаментами в разработке высоких технологий.

Особенности прохождения электрического тока сквозь порошковый компакт

При пропускании электрического тока сквозь комплексную порошковую систему, которую образует пресс-форма вместе с загруженной в нее порошковой смесью в процессе консолидации, наблюдается несколько стадий технологического процесса (рис. 1) [1, 2].

Исследования показали, что на начальной стадии процесса электроспекания между частицами, которые находятся непосредственно в контакте между собой или на расстоянии, создаются достаточные условия для осуществления процесса электрического пробоя диэлектрического слоя (рис. 2, а) [2].

© Райченко Олександр Іванович, головний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, доктор техн. наук, професор; Дерев'яно Олександр Вавильович, Истомина Тетяна Іванівна — наукові співробітники цього ж інституту.

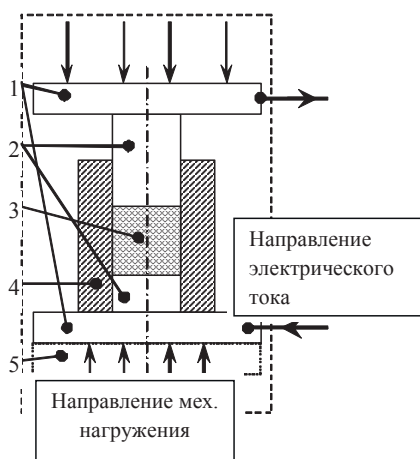


Рис. 1. Принципиальная схема узла для электроспекания: 1 — токоподводящие плиты гидравлического пресса, 2 — электроды-пуансоны из высокопрочного графита, 3 — обрабатываемая порошковая смесь, 4 — матрица прессинструмента из высокопрочного графита, 5 — блок непрерывной механической нагрузки

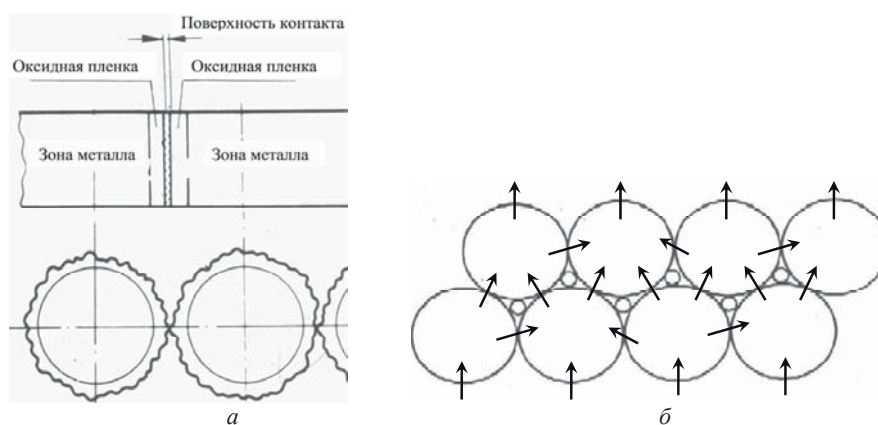


Рис. 2. Расположение порошковых частиц в засыпке: а — зоны контактных переходов, б — вероятные пути прохождения тока после электропробоя

После этого вещество порошкового компакта становится электропроводимым в зонах перехода от одной порошковой частицы к другой (рис. 2, б). В центре будущего контактного пятна может формироваться остров (либо область) короткозамкнутого контакта или дискретные мостики электроэрозионного происхождения (рис. 3) [2, 3, 4, 5].

На этой стадии процесс характеризуется существенной нестационарностью. Это связано, как со статистическим характером изменения общего числа контактных зон, так и с прохождением электрического тока по мостикам, где происходят переходные физико-химические процессы, что влияет на изменение общего электросопротивления компакта [1, 6].

Параллельно с образованием новых межчастичных контактных зон под воздействием механической нагрузки идет их последовательное разрушение с одновременным формированием новой контактной сетки, которая образует условия для дальнейшего прохождения тока.

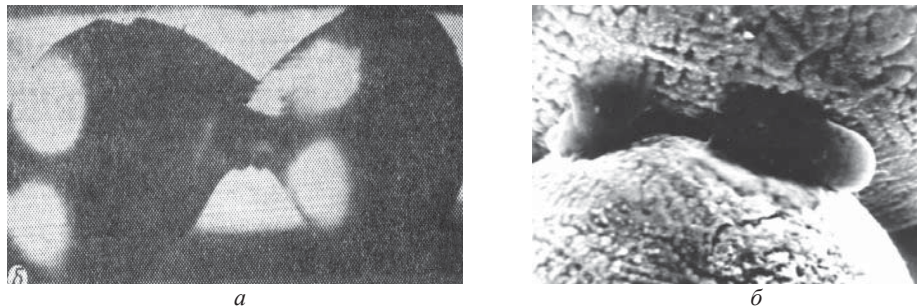


Рис. 3. Островки короткозамкнутых контактных зон после энергетических воздействий разной природы: *a* — лазерное излучение [3]; *б* — зона контакта между частицами из никелевого сплава ($\times 975$) [4], которая имеет два локальных канала прохождения электрического тока

Например, при спекании порошковой композиции под действием электрического тока промышленной частоты 1920 кА/м^2 на протяжении 30с некоторая часть жидкого металла растекается по тонкой поверхности порошковых частиц и кристаллизуется в виде тонкого слоя (рис. 3, *б*, рис. 4, *а*) [4].

Развитие сетки контактных зон при этом возможно только в процессе спекания под действием Джоулевого тепла, которое выделяется в каждом контактном перешейке (рис. 4), поскольку достоверность возникновения периферийных разрядов в момент физического прилегания порошковых частиц практически сведена к нулю в связи с падением разницы потенциалов на взаимодействующих контактных поверхностных областях [4, 7].

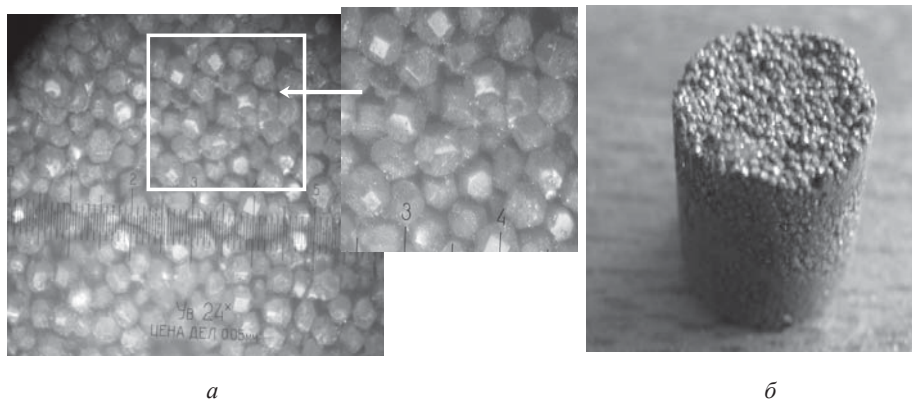


Рис. 4. Межчастичные перешейки, как последствие электрического тока, на начальной стадии спекания покрытого кобальтом алмазного порошка AC200 400/315: *a* — проплавление переходов, *б* — общий вид нижней части прессовки

Такое падение напряжения, которое обусловлено малым электрическим сопротивлением зоны соприкосновения при прохождении электрического тока по образовавшемуся контактному скелету не является постоянным. Оно при постоянной подведенной электрической мощности уменьшается к некоторой величине и моменту окончания процесса консолидации порошкового тела для заданных условий энергетического действия (рис. 5).

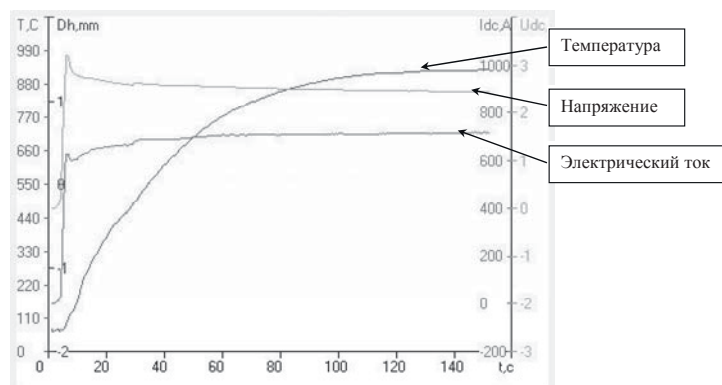


Рис. 5. Самоуравновешивание электрических параметров в процессе консолидации порошковой композиции на основе ВК15

Дальнейшее спекание, благодаря непосредственному выделению Джоулевого тепла в теле порошковой пресовки, происходит за не продолжительные промежутки времени (от 30 до 40 с) без заметного увеличения количества контактных участков [6, 7]. При этом нагревание межчастичных перешейков способствует улучшению качества изделия. Дальнейшее увеличение площади контактной сетки может происходить только при значительных выдержках (от 2 до 3 мин) за счет дальнейшего увеличения степени оплавления порошковых частиц слоя (рис. 3, б, рис. 4, а).

Подходы к формированию режимов консолидации под действием электрического тока

Таким образом, процесс формирования разветвления прохождения электрического тока по контактным парам между порошковыми частицами при спекании (рис. 2, б, рис. 4) состоит из следующих стадий [2]:

- первая — образование начального контактного скелета (сетки),
- вторая — деструкция некоторой части начальных контактов в результате механической нагрузки с формированием новых,
- третья — заполнение пустот расплавленным металлом, конечная усадка материала к определенной величине при практически неизменном количестве сформировавшихся контактных пар.

Существуют также и два основных технических параметра, которые влияют на характеристики будущего изделия во время процесса консолидации:

- 1 — уровень механического усилия подпрессовки (неизменное или изменяемое в процессе электрообработки порошковой композиционной смеси) [8, 9];
- 2 — природа, характер и величина электрического тока, длительность его пропускания через будущее изделие [6, 10, 11].

То есть избранный режим электрообработки определяет основной ход технологического процесса и свойства продукта. В работах [1, 10] практически определено, что собственное сопротивление сплавляемой порошковой смеси составляет ~80%, сопротивление электродов-пуансонов и электродов ~20%. Согласно работы [12], после начала пропускания тока сквозь технологический узел (рис. 1) от внешних поверхностей образца и контактных торцевых поверхностей электрод-пуансонов, вглубь образца начинает формироваться объ-

емного типа градиентное поле электропроводимости системы в целом. И когда электропроводимость в центральной части образца практически уравнивается с его верхом и низом величина тока резко увеличивается. Скорость движения градиента поля электропроводимости тем выше, чем больше будет перепад напряжения в теле прессовки по высоте.

Величина уровня механического нагружения на порошковые частицы играет свою роль значение. Повышая давление (степень обжатия) в объеме прессовки до оптимального уровня можно достичь нужного уровня электропроводимости порошковой композиции. Пропускание электрического тока в комбинации с одновременным приложением механического нагружения позволяет в значительной степени очистить поверхность порошкового компонента от нежелательных покрытий, например, оксидных пленок [11, 12]. Этот факт был продемонстрирован при пропускании импульсов тока через алюминиевый порошок, который был предварительно спрессован (импульсы тока использовались не для инициирования процесса спекания, а для целенаправленной очистки поверхности). Спекание в муфельной печи, обработанного таким образом порошка, резко улучшалось в сравнении с использованием необработанного порошка.

Процесс консолидации под комплексным действием электрического тока и механического нагружения заготовок с "проблемными" поверхностями порошков лучше осуществлять по двухстадийной, а не одностадийной программе [12]:

1 — ток для первой стадии целесообразно установить таким, чтобы облегчить процесс механического прессования порошковой заготовки, а время спекания должно быть таким, чтобы достичь цели без эффекта перегрева,

2 — обработка на второй стадии должна прежде всего обеспечить полное и равномерное пропекание образца.

Энергетическое перенагружение порошкового компакта

Можно отметить, что природа электрического тока во время консолидации может практически полностью определять получаемую структуру изделия и параметры подводимой силовой мощности от энергетического источника [11]. Следует также помнить о недопустимости факторов, которые могут повлечь расплескивание, электровзрыв обрабатываемого материала или сквозное проплавление порошковой заготовки (рис. 6).

Также необходимо помнить, что при подпрессовании ниже критического значения происходит такое пагубное явление как локальный электрический пробой. В результате его воздействия в теле образца возникает достаточно большого поперечного сечения электроканал. Причем порошок в канале не является спеченным, а является только проплавленным (рис. 6, *e*). Иногда возникает несколько таких каналов.

Быстрое увеличение выделения тепловой энергии в областях контактных пар во время почти импульсного роста тока (при скорости роста плотности тока выше критического уровня) может привести к возникновению деформационных или электроэрозионных явлений в структуре порошка, которые определяются электрическими, теплофизическими и механическими параметрами составляющих смеси.

Экспериментальные исследования показывают, что электрическое сопротивление будущего изделия различается в зависимости от материала и типич-

ного строения порошка. Оно от 1,5 до 4 раз, а в ряде случаев на несколько порядков, существенно уменьшается в процессе консолидации, причем на

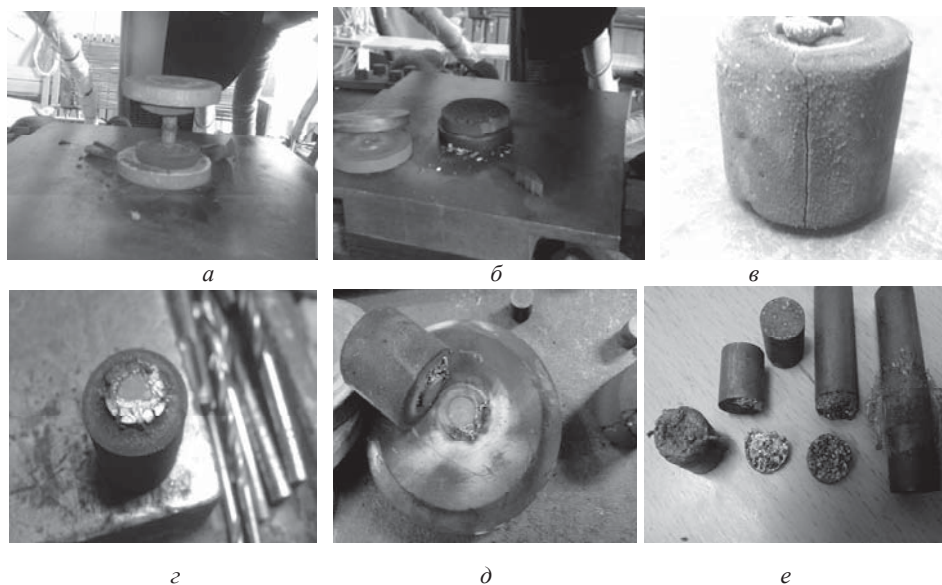


Рис. 6. Примеры “энергетического перенагружения” порошковых компактов во время электроспекания: *а* — разрушение матрицы пресс-формы во время превышения скорости нагрева (>5000 °C/мин) порошковой композиции на основе $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, время прогревания 15 сек; *б* — взрывное разрушение пресс-формы во время начала процесса спекания с превышением нарастания тока для порошковой композиции на основе TiN-TiB_2 , достигнутая температура 330 °C; *в* — растрескивание пресс-формы при спекании порошковой композиции на основе $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2 + (3\% \text{ об.})\text{Al}$ за счет объемного роста Al на начальной стадии процесса усадки, *г* — превышение уровня механического нагружения на прессовку во время спекания при 1600 °C, *д* — инфильтрация с дальнейшим вытеканием расплавленной компоненты при превышении времени изотермической выдержки, *е* — пример проплавления порошковой композиции на основе металл. связка–алмаз после электрического пробоя

начальной стадии процесса на механически нагруженную засыпку подается практический импульс напряжения от 4 до 7 В, которое может уменьшаться на конечной стадии процесса до 2 В и меньше (рис. 5).

Для большинства случаев в глубине объема порошкового компакта возможна инициация более интенсивного выделения тепла в районах “улучшенных” контактных образований, которыми могут быть агломератные структуры [8]. Эта особенность структуры при выборе неоптимальных параметров электрообработки с целью его спекания вредит результату. Данное явление во время процесса электроспекания следует предупреждать и не допускать [9].

Выводы

Процесс консолидации под действием электрического тока практически состоит из двух этапов:

– на первом целесообразно применять одновременное воздействие электрического тока общей плотностью в несколько ампер на квадратный сантиметр и механического давления до 10 МПа;

– на втором, когда образовались контактные группы между частицами и начался процесс уплотнения порошкового тела, увеличивают плотность электрического тока до нескольких килоампер на квадратный сантиметр и, по необходимости, также увеличивают механическое нагружение на порошковую прессовку [3, 4, 8].

Практика показывает, что для осуществления процесса консолидации можно также использовать целенаправленное совмещение постоянного и переменного промышленной или повышенной (вплоть до 100 МГц произвольной периодичности в линии амплитуды) частоты токов. Результатом будет электрический сигнал в форме пульсирующего тока [11, 12].

Формирование состава, структуры и свойств многих изделий из композиционных материалов определяется статическими и динамическими факторами, которые связаны также со смачиванием жидкими компонентами твердых тел и другими поверхностными явлениями.

При пропускании электрического тока сквозь комплексную порошковую систему в процессе консолидации наблюдается несколько стадий прохождения технологического процесса. Практические исследования показали, что на начальной стадии процесса электроспекания между частицами создаются достаточные условия для осуществления процесса электрического пробоя диэлектрического слоя. После этого вещество порошкового компакта становится электропроводимым в зонах перехода от одной порошковой частицы к другой. На этой стадии процесс характеризуется нестационарностью. Это связано со статистическим характером изменения общего числа контактных зон и с прохождением электрического тока по мостикам, где происходят переходные физико-химические процессы. Это влияет на дальнейший процесс уплотнения.

Ключевые слова: электрический ток, порошковая система, контактная сетка.

Under electric current action the complex powder-like system in the process of consolidation there are a few stages of technological process. Practical researches showed that on the initial stage of electrosintering process between particles sufficient terms are created for realization of process of electric disruption of dielectric layer. After it the matter of powder-like compact becomes electro-conducting in the areas of transition from one powder-like particle to other. On this stage a process is characterized by an unstationarity. It is related to statistical character of running the general number of pin areas and with passing of electric current on bridges, where physical and chemical transients are. It influences on the further process of compression.

Keywords: electric current, powder-like system, electrocontact grid.

1. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. – М.: Металлургия, 1987. – 129 с.
2. Raychenko O. I. Dynamic aspects at electric discharge sintering of powders/ O. I. Raychenko, O. M. Syzonenko O. V. Derevyanko // International Conference on Sintering (September 7–11, 2009). – Kiev, Ukraine. – 2009. – P. 48.

3. *Modelное* исследование спекания с энерговыведением в межчастичном контакте // Порошковая металлургия. – 1977. – № 8. – С. 92–94.
4. *Буренков Г. Л.* Макроскопический механизм образования межчастичного контакта при спекании порошков электрическим током / Г. Л. Буренков, А. И. Райченко, А. М. Сураева // Там же. – 1989. – № 3. – С. 34–39.
5. *Демирский Д. Н.* Влияние микроволнового нагрева на начальную стадию спекания порошка WC сферической формы: зб. тез доповідей II-ї міжнародної конференції “Матеріалознавство тугоплавких сполучень” (18–20 травня 2010, Київ). – Київ, Україна. – С. 147.
6. *Kessel H. U.* Rapid sintering of novel materials by fast/sps – further development to the point of an industrial production process with high cost efficiency / H. U. Kessel, J. Henricke, R. Kirchner, T. Kessel // Сайт компанії FCT Fine Ceramics Technologies GmbH & Co KG [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.fct-systeme.de.
7. *Hong Peng.* Spark Plasma Sintering of Si₃N₄-Based Ceramics. Doctoral Dissertation. Department of Inorganic Chemistry Stockholm University S-10691. – Stockholm, Sweden. – 2004. – P. 104.
8. *Истомина Т. И.* Влияние давления подпрессовки при ЭРС на физико-механические свойства композиции медь – олово – абразив / Т. И. Истомина, А. А. Байденко, А. И. Райченко и др. // Порошковая металлургия. – 1983. - № 11. – С. 98–102.
9. *Райченко А. И.* Спекание порошков при наложении электрического тока и периодических механических импульсов / А. И. Райченко, Т. И. Истомина, И. А. Троян // Там же. – 2000. - № 3-4. – С. 105–109.
10. *Григорьев Е. Г.* Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков: Учебное пособие / Е. Г. Григорьев, Б. А. Калинин. – М.: МИФИ, 2008. – 152 с.
11. *Деревянко А. В.* Влияние переменной составляющей электрического тока на формирование структуры композиционных материалов при электроразрядном реакционном спекании / А. В. Деревянко, А. В. Рагуля, А. И. Райченко и др. // VII Международная школа–семинар. Импульсные процессы в механике сплошных сред. тез. докл. (21–25 августа 2007, Николаев). – Николаев, Украина. – С. 163–164.
12. *Попов В. П.* Структура и свойства карбида вольфрама, полученного электроразрядным спеканием дисперсного порошка / В. П. Попов, А. М. Шатохин, А. И. Райченко и др. // Порошковая металлургия. – 1995. - № 9/10. – С. 17–20.