

УДК 67.02:66.083

**Ю.Г. ГУЦАЛЕНКО**, Харьков, Украина

## **ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОПТИМАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СПЕКАНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

З позицій прискорення ефективної реалізації відповідних сучасному, шостому технологічному укладу нанопорошкових матеріалознавчих інновацій актуалізується проблематика прогнозування оптимальних умов провадження робочих процесів попереднього (спікання) і остаточного (шліфування) формоутворення їх об'єктів. Показано, що особливості та переваги комбінованих прямим струмопідведенням в операційну зону технологій спікання і шліфування обумовлені дією електричних розрядів.

С позицій ускорения эффективной реализации соответствующих современному, шестому технологическому укладу нанопорошковых материаловедческих инноваций актуализируется проблематика прогнозирования оптимальных условий осуществления рабочих процессов предварительного (спекание) и окончательного (шлифование) формообразования их объектов. Показано, что особенности и преимущества комбинированных прямым токоподводом в операционную зону технологий спекания и шлифования обусловлены действием электрических разрядов.

The problems of predicting the optimal conditions for the implementation of workflows in preliminary (sintering) and final (grinding) shaping actualize from the positions of acceleration for effective implementation of nanopowder materials science innovation which are relevant to modern (the sixth) technological order. It is shown that the features and benefits of combined by direct current supply in the operating area of technology of sintering and grinding due to the action of electric discharges.

**Введение.** Расширенное создание, воспроизводство и применение композиционно-химически и структурно-геометрически новых высокофункциональных материалов из наноразмерных порошков является одной из доминант современного, шестого технологического уклада. Исследовательская и опытно-производственная практика свидетельствуют

о высокой эффективности технологий спекания под давлением с прямым токоподводом и алмазно-искрового шлифования таких материалов с высокоплотной структурой, в особенности тугоплавких, в том числе инструментальных.

В связи с этим, с позиций ускорения эффективной реализации материаловедческих инноваций, актуализируется проблематика прогнозирования оптимальных условий осуществления соответствующих этим технологиям комбинированных рабочих процессов, физические особенности и преимущества протекания которых по сравнению с конвенциональными термомеханическими альтернативами консолидации и обработки порошковых материалов, проявляющиеся в объеме (спекание) и в поверхностном слое (шлифование), общепризнано обусловлены действием электрических разрядов.

**Практические основания постановки задачи оптимизации.** В практике обоих рассматриваемых технологических методов с прямым токоподводом в рабочую зону параметром управления и фактором варьирования в поиске наилучшего технического результата является давление, испытываемое консолидируемым (спекание) или консолидированным (шлифование) объектом рабочего процесса.

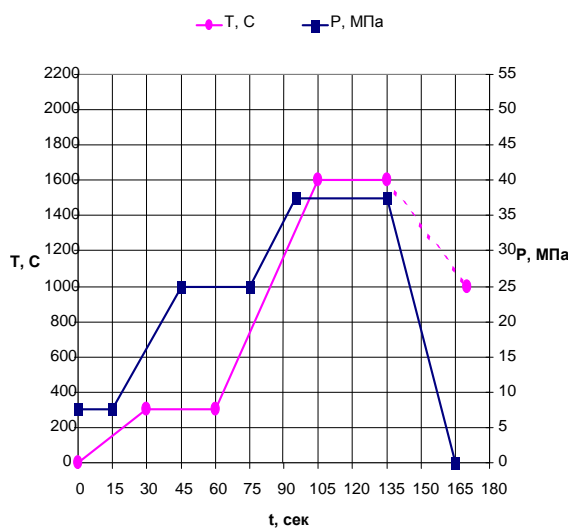
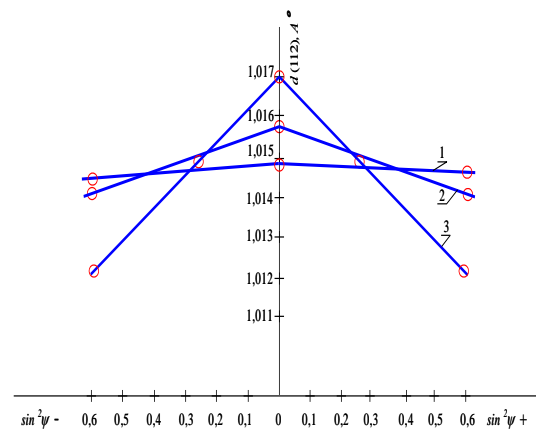


Рисунок 1 – Циклограммы электро-консолидации под давлением композита  $Al_2O_3-WC$  [1]



1 – после электроспекания,  
2, 3 – после алмазно-искрового  
шлифования под давлением 1,2  
МПа (2) и 0,4 МПа (3)

Рисунок 2 –  $\sin^2\psi$ -графики WC [2]

Например (рис. 1), из собственного, совместного с Украинской академией железнодорожного транспорта опыта получения электроконсолидацией под давлением высокоплотного тонкодисперсного композита  $Al_2O_3-WC$ , в котором исходные порошки (50/50 мас. %) имели зернистость 40–70 нм (WC) и 60–80 нм ( $Al_2O_3$ ), диапазон оптимальных давлений первых ступеней цикла подавления пористости – примерно от 7,5 до 25 МПа.

В алмазно-искровом шлифовании полученного спеканием под давлением с прямым токоподводом монокарбида вольфрама формирование его функционально оптимальной высокоплотной приповерхностной структуры с достижением наилучших физико-механических свойств по критерию напряженного состояния шлифованного материала в некоторой заданной системе возможностей управления электрическими режимами обработки также происходит при некотором внутреннем значении давления в экспериментальном диапазоне давлений шлифовального рабочего контакта (рис. 2).

**Аналитическая гипотеза и ее приложение к практике.** Теоретическое объяснение эффективных условий способствования возбуждению электроразрядных процессов и соответствующих им эффектов уплотнения порошковых материалов рассмотрим с преимущественным вниманием к подавлению наибольших пор, размер которых на основании аналитических исследований по методу аннигиляции позитронов изначально принято считать [3] соизмеримым с исходной зернистостью спекаемых порошков. При этом будем исходить из принятой [4] схематизации электроразрядного тока, при определенных условиях допускающей его прохождение в порошковых средах непосредственно в промежутках пористости. Очевидно, что с позиций энергоэффективного преодоления (уменьшения) пористости наибольший интерес при этом представляет минимизация потенциала зажигания электрических разрядов в газовых средах прежде всего наибольших пор спекаемого под давлением консолидата.

Предположим далее, что эти условия с некоторым приближением могут быть определены из известных закономерностей Пашена-Пеннинга, описывающих вовлечение газовой среды в электроразрядные процессы, во-первых, для однокомпонентных газовых сред (Пашен), по

механизму с  $U_{np \min} = const$  для данной газовой среды при соответствующем этому  $U_{np \text{ opt}} = U_{np \min}$  однозначно определенном постоянстве произведения  $P \cdot h = (P \cdot h)_{opt}$ ; во-вторых, для компаундных газовых структур с присутствием примесей (Пеннинг), с дополнительным понижением минимумов Пашена, если потенциал энергии возбуждения метастабильного уровня для этих примесей ниже, чем в чистом основном газе, в том числе во влажных средах с однокомпонентной газовой основой.

Тогда, исходя из определяющей роли электроразрядного фактора и экспериментальных закономерностей Пашена-Пеннинга, можно предположить, что оптимальное давление прессования  $P_{opt}$  при нанопорошковой электроконсолидации, во всяком случае в первом приближении, подчиняется зависимости вида  $P_{opt} = k \cdot (P \cdot h)_{opt} / h$ , где  $k$  – поправочный коэффициент, учитывающий состав газовой среды; криволинейность геометрии промежутка в порах (кривые Пашена получены в экспериментальных условиях с плоскими электродами и однородным электрическим полем); известную приближенность закона Пашена и тем большую точность, чем меньше  $P$  и  $h$ , и, в то же время (по некоторым экспериментальным данным), искажения начального участка кривой Пашена при пробое малых разрядных промежутков (при одновременно малых  $P \cdot h$  и  $h$ ), объясняемые поддержанным туннелированием эффектом Шоттки; теплофизический фон и др.; в общем случае  $k > 0$  и, в частности, с повышенным ожиданием  $0 < k < 1$  в исходно нормально влажных средах реального компактирования.

Из разрешения закона Пашена для газовой среды (в приближенной оценке по [5]  $(P \cdot h)_{opt} = 0,8 \text{ Па} \cdot \text{м}$ ) относительно определяющей максимальную пористость консолидата реальной практики (рис.1) исходных зернистостей спекаемых тугоплавких порошков в диапазоне от 40 до 80 нм следует диапазон  $P_{opt}$  от 10 до 20 МПа, с последовательной ориентацией на преимущественное подавление от более крупных исходных пор, максимальных для зернистости 80 нм (расчетное значение  $P_{opt} = 10 \text{ МПа}$ ), к максимальным для зернистости 40 нм (расчетное значение  $P_{opt} = 20 \text{ МПа}$ ).

Из сопоставления установленных опытно-экспериментальным путем и из  $(P \cdot h)_{opt}$  по Пашену значений давлений на границах диапазона исходной

максимальной пористости, соответствующего диапазону исходной зернистости спекаемых порошков, следует, что теоретический диапазон является внутренним по отношению к опытному с отклонениями каждой границы опытного диапазона на 25 %. При этом коэффициент  $k$  соответственно изменяется от  $k = 0,75$  (нижняя граница) до  $k = 1,25$  (верхняя граница). Таким образом обеспечивается повышенная надежность формирования оптимальных условий электроразрядного подавления пористости в условиях реальной форморазмерной статистики максимальных пор, в контексте [4] приближенно описываемых сферической моделью зерна. При этом условия выдержки  $P_{opt} = 25$  МПа (рис. 1) уже соответствуют запуску как преобладающего механизма деформационной реструктуризации спекаемого компаунда с уплотнительным скольжением границ смежных зерен друг относительно друга.

Таким образом, предложенный приближенный расчетный подход к определению исходных давлений прессования на начальных этапах реализации полного технологического цикла нанопорошковой электроконсолидации согласуется с рассмотренной практикой (рис. 1).

Наилучший качественный результат при шлифовании (рис. 2, кривая 3) при некотором фиксированном значении рабочего напряжения  $U_{np}$  электроразрядной инициации в зоне резания (или наиболее эффективном из нескольких значений  $U_{np}$ , заданных планом эксперимента) также, по-видимому, соответствуют следствию из закономерностей Пашена-Пеннинга  $P_{np} = k \cdot (P_{np} \cdot h)_{opt} / h$  в физико-геометрическом рассмотрении идентичными условий возбуждения электроразрядных эффектов в порах во всем объеме спекаемого консолидата и в приповерхностном слое шлифуемого твердого тела.

**Заключение.** Исходя из рассмотренного практического опыта, изложенные теоретические представления о механизме эффективного подавления пористости порошковых керамических консолидатов в их объеме (при спекании) и в их поверхностном слое (при шлифовании) применимы в подготовке производства и априорном задании оптимальных технологических регламентов предварительного формообразования изделий спеканием под давлением с прямым токоподводом и окончательного – алмазно-искровым шлифованием.

Работа выполнена по проектам НТУ «ХПИ» «Разработка технических решений специальной модернизации универсальных станков и технологических баз данных для алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов» (0113U000425) и, совместно с ХНУ, УГАЖТ (г. Харьков) и СГУ (г. Сумы), «Многокомпонентные композиционные материалы и покрытия на основе наносоединений тугоплавких металлов» (0113U001340).

**Список использованных источников:** 1. *Геворкян Э.С., Гуцаленко Ю.Г.* Подбор оптимальных режимов горячего прессования нанопорошковых смесей  $Al_2O_3-WC$  для инструментальных применений // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №5/1(47). – С. 13-18. 2. *Стрельчук Р.М.* Визначення особливостей та раціональних умов алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів з нанорозмірних зерен монокарбиду вольфраму: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – Харків, 2011. – 193 с. 3. *Гусев А.И.* Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 199 с. 4. Физика и практика электроконсолидации под давлением вольфрамокарбидных материалов и композитов [электронный ресурс]: доклад [тезисы] / Ю.Г. Гуцаленко [НТУ «ХПИ»] // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»; г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», ЛЭМПНМ, 20-23 мая 2013 г. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2013. – Электрон. дан. (32 с.: 26269538 байт). – Режим доступа: <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/gutsalenko.pdf>. 5. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Gevorkjan Je.S., Gucalenko Ju.G.* Podbor optimal'nyh rezhimov gorjachego pressovaniya nanoporoshkovykh smesey  $Al_2O_3-WC$  dlja instrumental'nyh primenenij // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2010. – №5/1(47). – S. 13-18. 2. *Strel'chuk R.M.* Vznachennja osoblivostej ta racional'nih umov almazno-iskrovogo shlifuvannja tverdih splaviv z nanorozmirmih zeren monokarbidu vol'fram: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01 – procesi mehanichnoï obrobki, verstaty ta instrumenty / Nac. tehn. un-t «Hark. politehn. in-t». – Harkiv, 2011. – 193 s. 3. *Gusev A.I.* Nanokristallicheskie materialy: metody poluchenija i svojstva. – Ekaterinburg: UrO RAN, 1998. – 199 s. 4. Fizika i praktika jelektrokonsolidacii pod davleniem vol'framokarbidnyh materialov i kompozitov [jelektronnyj resurs]: doklad [tezis] / Ju.G. Gucalenko [NTU «ХПИ»] // 2-ja mezhdunarodnaja shkola-seminar «Perspektivnye tehnologii konsolidacii materialov s primeneniem jelektromagnitnyh polej»; g. Moskva, Nac. issled. jader. un-t «MIFI», LJeMPNM, 20-23 maja 2013 g. – M.: Nac. issled. jader. un-t «MIFI», 2013. – Jelektron. dan. (32 s.: 26269538 bajt). – Rezhim dostupa: <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/gutsalenko.pdf>. 5. Fizicheskij jenciklopedicheskij slovar'. – M.: Sov. jenciklopedija, 1983. – 928 s.