

УДК 621.762

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ НА СТАДИИ УПРУГОЙ ПОДПРЕССОВКИ

О.О. КУЗНЕЧИК

(Институт порошковой металлургии, Минск)

На основании предположения о существовании в контактных зонах порошковых частиц барьерных переходов с прозрачностью, влияющей на диффузию электронов и атомов в момент появления импульсного электрического тока, представлена модель электроимпульсного спекания (ЭИС) электропроводных порошков на стадии упругой подпрессовки. Используя Mathcad, на примере ЭИС модельных порошков с физико-механическими свойствами тугоплавких металлов, показано, что высокая ($10^7 \dots 10^8$ В/м) напряженность высоковольтного ($1 \dots 1,5 \cdot 10^3$ В) электрического поля в течении одного периода импульсного тока делает барьерный переход прозрачным сначала для электронов, а затем и для атомов. Из-за непрозрачности барьерного перехода при относительно низкой ($10^5 \dots 10^6$ В/м) напряженности электрического поля в контактных зонах частиц порошка при ЭИС низковольтным ($1 \dots 2$ В) импульсным током с частотой 50 Гц жидкофазные металлические контакты формируются после протекания через порошок серии импульсов тока длительностью 3...5 с. Появление жидкометаллической фазы в контактных зонах может уменьшить на один порядок силу трения между порошковыми частицами.

Введение. Из анализа работ [1 – 12] следует, что вместо установленного ГОСТ 17359-82 термина «электроимпульсное спекание» (ЭИС) в современной технической литературе могут использоваться другие названия этого процесса, например:

- в странах Евросоюза, США и Канады это – «Electroconsolidation», «High Energy High Rate Processing (HEHR)», «Electric Discharge Compaction (EDC)», «Spark Plasma Sintering (SPS)» и «Field assisted sintering technique (FAST)» [1, 5 – 8];

- для стран СНГ это – «электроимпульсное прессование порошков», «электроконтактное спекание», «электроразрядное спекание (ЭРС)» и «электроимпульсное спекание (ЭИС)» [3, 4, 9 – 12].

При этом в работах [1, 3, 9, 10, 14, 15] отмечается, что спекание электроимпульсным током порошков тугоплавких металлов является эффективным методом получения изделий с уникальными функциональными свойствами, которые находят свое широкое применение в машиностроении, приборостроении и медицине.

Общим в работах [1 – 16] является то, что в них исследуется спекание электропроводных порошков при упругих давлениях подпрессовки (10...100 МПа) с использованием импульсов тока, имеющих амплитуду напряжений $1 \dots 10^3$ В, энергию – $0,1 \dots 10$ кДж и длительность – $10^{-4} \dots 10^{-2}$ с. Для формирования таких импульсов могут использоваться источники либо с высоковольтными конденсаторными, либо с настроенными на промышленную (50...60 Гц) частоту трансформаторными силовыми накопителями электроимпульсной энергии. Исходя из этого, несмотря на исторические причины, процессы спекания электропроводных упругодеформированных порошков электроимпульсным током будем считать ЭИС, что не противоречит ГОСТ 17359-82.

В работах [9, 10] показано, что в основе ЭИС лежит кинетика контактообразования между частицами порошка, приводящая к появлению материалов и покрытий из тугоплавких металлов с пористой структурой пор, благодаря чему эти материалы и покрытия находят свое применение в машиностроении, приборостроении, энергетике и медицине. Способствовать совершенствованию технологий получения этих материалов и покрытий может дальнейшее изучение кинетики контактообразования между частицами порошка при ЭИС. Как показал анализ работ [1 – 15], при решении этой задачи могут использоваться различные математические модели спекания электрическим током, которые условно можно разделить на две группы. К первой группе [1 – 3, 5 – 7, 9, 10, 14, 15] относятся модели, представляющие кинетику контактообразования между частицами порошка при ЭИС разновидностью неравновесных термодинамических процессов, связанных с тепло- и массопереносом, сопровождающимся диффузией атомов, благодаря которой формируется пористое тело. Ко второй – относятся модели [4, 11 – 13, 16], в которых кинетика контактообразования этих процессов представляется разновидностью высокотемпературной ползучести, приводящей к структурным изменениям (пористости) порошковой среды, испытывающей под действием давления пластично-вязкое течение. К недостаткам математических моделей, приведенных в работах [1 – 16], следует отнести то, что в них не учитывается влияние на кинетический процесс контактообразования между частицами порошка при ЭИС следующих факторов:

- наличие межконтактных промежутков, формирующихся на стадии упругой подпрессовки и препятствующих возникновению межатомных связей между частицами порошка до момента появления электрического тока;

- влияние межконтактных промежутков на электроимпульсный ток, оказываемое им термическое воздействие на контактные поверхности частиц порошка и диффузию атомов между ними;
- влияние сил сухого и жидкостного трения на состояние элементарной ячейки порошка при упругой подпрессовке в матрице.

Из-за этих факторов с помощью данных моделей нельзя объяснить причины возможного появления в контактных зонах частиц порошков тугоплавких металлов при ЭИС высокой температуры, превышающей 4000 К [17], а также высокой скорости усадки порошка на начальной стадии процесса контактообразования [18]. Целью данной работы является разработка с учетом вышеперечисленных факторов математической модели и с ее помощью исследование особенностей процесса ЭИС на стадии упругой подпрессовки модельных порошков с физико-механическими свойствами, близкими к физико-механическим свойствам тугоплавких металлов.

1. Разработка модели контактообразования между частицами порошка при ЭИС

Предположим, что при сжатии электродами-пуансонами порошковой насыпки, помещенной в жесткую диэлектрическую матрицу, происходит разрушение окисной пленки на поверхности упругодеформированных частиц порошка в зонах их механического контакта. Тогда для упругодеформированных частиц порошка, первоначально имевших сферическую форму, каждая такая зона будет представлять собой два контактных пятна с диаметром (d), определяемым решением задачи Герца [17], согласно которой

$$d = \left(\frac{3F_0 D_0}{E_m} (1 - \nu^2) \right)^{\frac{1}{3}} = D_0 \frac{3\pi p (1 - \nu^2)}{4E_m}. \quad (1)$$

При этом величина упругой линейной деформации частицы порошка (y) определяется как

$$y = \left(\left[\frac{3F_0 (1 - \nu^2)}{E_m} \right]^2 \frac{1}{D_0} \right)^{\frac{1}{3}} = D_0 \left(\frac{3p (1 - \nu^2)}{4E_m} \right)^2. \quad (2)$$

Из (1) и (2) без учета толщины окисной пленки вытекает связь между диаметром контактного пятна и величиной линейной деформации:

$$d = y \left[\frac{E_m D_0^2}{3F_0 (1 - \nu^2)} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Пусть толщина (l_0) окисной пленки меньше величины линейной деформации частицы порошка и связана с ней отношением

$$\zeta = l_0 / y, \quad (4)$$

тогда (3) с учетом (4) преобразуется:

$$d = (y - 2l_0) \left[\frac{E_m D_0^2}{3F_0 (1 - \nu^2)} \right]^{\frac{1}{3}} = y(1 - 2\zeta) \left[\frac{E_m D_0^2}{3F_0 (1 - \nu^2)} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Зависимости (3) и (5) позволяют установить размеры контактных пятен частиц порошка сферической формы при упругой подпрессовке. Согласно [20, 15, 21] структурное состояние (пористость – Π) этого порошка и среднестатистическое количество механических контактов ($N_{кч}$), приходящихся на одну из его частиц, могут определяться с помощью угла (α) элементарной ячейки, состоящей из четырех одинаковых частиц. Так, например, согласно [20] при гексагональной укладке $\alpha_1 = 60^\circ$ ($\alpha_1 = \pi/3$), а число контактов $N_{кч} = 11$, в то время как при ортогональной укладке частиц порошка α_2 составит 90° ($\alpha_2 = \pi/2$), а $N_{кч} = 6$. В первом случае Π , как вытекает из анализа [20, 15, 21], будет иметь значение 0,476, а во втором – 0,259. Исходя из этого и опираясь на решение задачи интерполирования [22], основанной на свойствах замечательного тригонометрического предела, будем полагать, что при переходе от ортогональной к гексагональной укладке значения для расчета $N_{кч}$ и Π зависят от $\varphi = \alpha_2 - \alpha_1$ следующим образом:

$$N_{кч}(\varphi) \approx N_0(0)(1 + 6\varphi^3), \quad (6)$$

$$\Pi(\varphi) \approx 1 - \frac{\pi}{6(1 - \varphi^2)}. \quad (7)$$

Если предположить, что сила нагружения (F_n), действующая на порошок, совершает при перемещении его частиц работу, направленную против сил упругой деформации и сухого трения, то получим

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{F_n h}{1 + \xi_0} = N_0 F_0 y + \xi_0 N_{кч} D_0 \varphi = V_n n_v F_0 y + \xi_0 N_{кч} D_0 \varphi \\ A &= \frac{6V(1-\Pi)}{\pi D_0^3} F_0 y + \xi_0 N_{кч} D_0 \varphi \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где

$$n_v = \frac{N_0}{V_n(1-\Pi)} = \frac{1-\Pi}{V_0} = \frac{6(1-\Pi)}{\pi D_0^3}, \quad (9)$$

$$n_{вк} = \frac{N_{кч} N_0}{V_n(1-\Pi)} = \frac{1-\Pi}{V_0} = \frac{6(1-\Pi)}{\pi D_0^3}, \quad (10)$$

$$F_0 = \frac{p\pi d_0}{4}, \quad (11)$$

$$h = y H_{nm} n_v^{\frac{1}{3}}. \quad (12)$$

Будем полагать, что F_n формируется в результате взаимодействия частиц порошка с электродами-пуансонами и стенкой матрицы таким образом, что

$$F_n = \sqrt{F_{эн}^2 + F_{см}^2}. \quad (13)$$

Причем если матрица имеет цилиндрическую форму, то связь между $F_{эн}$ и $F_{см}$ устанавливается следующим образом:

$$F_{эн} = p_{эн} S_{эн} = p_{эн} \frac{\pi D_{эн}^2}{4}, \quad (14)$$

соответственно с учетом [19]

$$F_{см} = \frac{\nu}{1-\nu} p_{эн} \pi D_{nm} H_{nm}. \quad (15)$$

Из (10) – (15) следует

$$F_{см} = 4F_{эн} \frac{\nu}{1+\nu} \frac{H_{nm}}{H_{nm} - D_{эн}} \frac{H_{nm}}{D_{эн}}, \quad (16)$$

$$F_n = F_{эн} \sqrt{1 + \frac{16\nu^2}{[1+\nu H_{nm} - D_{эн}]^2} \left(\frac{H_{nm}}{D_{эн}}\right)^2}. \quad (17)$$

Зависимость (17) устанавливает связь между усилием сжатия электродов-пуансонов и силой нагружения частиц порошка. При этом исходя из (13) и (17) направление действия этой силы относительно электродов-пуансонов определяется следующим образом:

$$\operatorname{tg}(\alpha_n) = \frac{F_{эн}}{F_{см}} = \frac{1+\nu}{4\nu} \frac{H_{nm} - D_{эн}}{H_{nm}} \frac{D_{эн}}{H_{nm}}. \quad (18)$$

На основании (6) – (18) можно установить связь контактного давления (p) с такими величинами, как коэффициент сухого трения-скольжения между частицами порошка (ξ_{01}), изменение пористости ($\Delta\Pi$), среднестатистическое количество контактов ($N_{к}$), приходящихся на одну частицу, и угол элементарной ячейки φ :

$$\xi_{01}(\varphi) = \xi_0 N_0 [1 + 6\varphi^3], \quad (19)$$

$$\Delta\Pi(p) = \Pi_0 - \frac{1,25\pi\varphi^2(p)}{6 [1 - 2,25\varphi^2(p)]}, \quad (20)$$

$$N_{к} = N_0 [1 + 6\varphi^3(p)], \quad (21)$$

$$\varphi(p) = \frac{1,1 - \sqrt{1,21 - 3,6\varphi_p(p)}}{1,8}, \quad (22)$$

где

$$\varphi_p(p) = \left[\frac{\pi^3 p (1-\nu^2) N_0 \xi_0}{8E_M} \right]^{\frac{4}{3}}. \quad (23)$$

Если предположить, что при ЭИС частиц порошка в контактных зонах появляется жидкометаллическая фаза, то это приводит к замене коэффициента сухого трения на коэффициент жидкостного трения, который с учетом (1), (2) и [19] можно оценить следующим образом:

$$\xi_{02}(p) = \frac{\pi p (1-v^2)}{2E_M} \cdot \frac{2 \ln \left(\frac{3\pi p (1-v^2)}{4E_M} \right) - 1,5 \frac{3\pi p (1-v^2) - 4E_M}{3\pi p (1-v^2) + 4E_M}}{3 \ln \left(\frac{3\pi p_{01} (1-v^2)}{4E_M} \right) - 2 \cdot \frac{3\pi p (1-v^2) - 4E_M}{3\pi p (1-v^2) + 4E_M}}. \quad (24)$$

Зависимости (6) – (24) позволяют определить изменение механического состояния контактных зон частиц порошка, включая пористость на стадии упругой подпрессовки, до момента появления электрического тока. Для того чтобы определить электрическую проводимость этого порошка, будем полагать, что контактные пятна контактных зон его частиц разделены межконтактными промежутками (l_n). Появление этих промежутков обусловлено действием кулоновских сил отталкивания, стремящимся уравновесить силы контактного давления (F_0). Исходя из этого, установим связь между величиной межконтактного промежутка (l_n) и контактным давлением (p):

$$l_n(p) = 2Z_e \varphi_e r_0 \sqrt{\frac{\pi \epsilon \epsilon_0 n_{sk}}{p}}, \quad (25)$$

где

$$n_{sk} = a^{-2}. \quad (26)$$

В этом случае межконтактный промежуток препятствует обмену электронами и атомами в контактных зонах частиц порошка, так как представляет собой определенного рода барьерный переход, который характеризуется своей «прозрачностью» [23]:

$$\left. \begin{aligned} D_B(p) &= \exp \left(-\frac{4\pi l_n(p)}{h_p} \sqrt{2m_x W_a} \right) \\ D_B(p) &= \exp \left(-\frac{4\pi l_n(p)}{h_p} \sqrt{2m_x U_{0Я}(\partial B) - \varphi_{ax}(\partial B)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (27)$$

Применительно к материалу частиц модельного порошка, будем полагать, что период входящих в него кристаллических решеток имеет порядок 10^{-10} м, т.е. $l_B \sim 10^{-10}$ м. Исходя из этого, прозрачность барьерного перехода (27) для электронов и атомов будет следующей:

$$D_B = \exp -11,64 \sqrt{Z_A + N_A U_{0Я}(\partial B) - U_{АЯ}(\partial B)}, \quad (28)$$

$$D_B = \exp -1,03 \sqrt{U_{0Я}(\partial B) - U_{еЯ}(\partial B)}. \quad (29)$$

Рассмотрим состояние контактных зон частиц порошка при появлении между ними разницы потенциалов электрического напряжения ($\Delta\varphi_e$), вызывающей электронную эмиссию, связанную с работой (A_e) выхода электрона с поверхности металла [23]:

$$A_e = e\Delta\varphi_{e0} - \mu_F, \quad (30)$$

где [23]

$$\mu_F(T) = W_F \left[1 - \frac{\pi^2 (kT)^2}{12W_F^2} \right], \quad (31)$$

$$W_F = \frac{h_F^2}{2m_e} \left(\frac{3n_0}{8\pi} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (32)$$

Если ввести параметры соответствия

$$b_1(p) = \left[\frac{3\pi p (1-v^2)}{4E_M} \right]^2, \quad b_2(p) = \left[\frac{36N_k(p)}{\pi} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (33)$$

то из (27), (30) – (33) вытекает зависимость, устанавливающая связь между удельной проводимостью контактных зон порошка (ρ_k) с однородной элементарной ячейкой и удельной проводимостью материала (ρ_0) частиц:

$$\rho_k(p, T) = \frac{4\rho_0}{\pi} \frac{1 - b_1(p)b_2(p)}{b_1(p)b_2^2(p)\sqrt{D_B(p, T)}}, \quad (34)$$

где

$$D_B(p, T) = \exp \left(-\frac{4\pi l_n(p)}{h} \sqrt{m_e (eE_e l_n(p) - A_e - \mu_F(T))} \right). \quad (35)$$

Из анализа (1), (3), (13), (17) и (18) можно получить зависимость, позволяющую определить сопротивление порошка с однородным состоянием элементарных ячеек:

$$R(p) = \rho(p) \frac{H_0}{S_{эф}(p)} \frac{1 - \Pi_0}{1 - \Pi_0 + \Delta\Pi(p)}. \quad (36)$$

Учитывая (1), (2), электропроводящая площадь поперечного сечения порошка $S_{эф}$, помещенного в матрицу, в (36) определяется следующим образом:

$$S_{эф}(p) = \frac{\pi}{4} \left[\frac{3H_0 D_{эн}}{2} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{3\pi p(1 - \nu^2)}{4E_M} \right]^2. \quad (37)$$

Рассмотрим стадию процесса ЭИС, при которой через порошок начинает протекать электроимпульсный ток. Будем полагать, что эта стадия начинается с момента появления между электродами-пуансонами начального напряжения U_0 , которое с учетом (2), (6) и (7) формирует в контактной зоне частиц порошка разность потенциалов, зависящую от давления

$$\Delta\varphi(p) = U_0 \frac{D_0 - y(p)}{H_0 \sqrt[3]{1 - \Delta\Pi(p)}}. \quad (38)$$

Из (38) и (25) следует, что начальная напряженность электрического поля в контактной зоне

$$E_0(p) = \frac{\Delta\varphi(p)}{l_n(p)}. \quad (39)$$

Рассматривая модельный порошок как дисперсную среду, обладающую электропроводимостью в контактных зонах с размерами, меньшими как минимум на порядок размеров самих частиц, будем при прохождении электрического тока считать эти зоны точечными тепловыми источниками, в которых исходя из (25), (34), (1) температура определяется следующим образом:

$$T_k(D_0, p, t) = \frac{3}{2} \frac{G(D_0, p, t)}{\gamma_m(p)c_m} \frac{\Psi(p, t)}{\rho_k(p)} \frac{l_k(p)}{d(D_0, p)}, \quad (40)$$

где

$$G(D_0, p, t) = \frac{0,25}{\sqrt{\pi a_m t_0 + t}} \exp\left(\frac{-d^2(D_0, p)}{4a_m t_0 + t}\right), \quad (41)$$

$$\Psi(p, t) = \begin{cases} \Psi_1(p, t) = \frac{E_0^2(p)}{2} \exp(-2\beta t) \left[\frac{1}{\beta} + \frac{\beta \sin(2\omega t) + \omega \cos(2\omega t)}{\beta^2 + \omega^2} \right] \\ \Psi_2(p, t) = \frac{E_0^2(p)}{2} \omega t \left(t - \frac{\sin(\omega t)}{\omega} \right). \end{cases} \quad (42)$$

Если принять во внимание (42), то для модельного порошка при давлениях подпрессовки $(1 \dots 5) \cdot 10^8$ Па t_0 в (41) будет иметь величину порядка $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с. При этом $\Psi_1(p, T)$ соответствует процессу ЭИС, осуществляемого импульсами высоковольтного разряда, а $\Psi_2(p, T)$ – процессу ЭИС, осуществляемого импульсным током промышленной частоты с амплитудой напряжения $1 \dots 10$ В. Остальные параметры уравнения (40) могут оцениваться с учетом барьерного перехода (27) электронов в контактных зонах частиц модельного порошка по формулам:

$$\gamma_m(p, T) = n_v m_e D_B(p, T), \quad c_m = \frac{3}{2} \frac{k}{m_e}, \quad t_0(p, T) = \sqrt{0,5 \rho_k(p, T) \varepsilon \varepsilon_0}. \quad (43)$$

Из изложенного следует, что разработанная модель процесса ЭИС при упругой подпрессовке порошков отражает особенности теплопереноса в контактных зонах частиц и учитывает в них переход сухого в жидкостное трение при появлении жидкой фазы. Основу этой модели составляют следующие положения:

- между контактными поверхностями частиц порошка на стадии упругой подпрессовки, предшествующей появлению электроимпульсного тока, возникают межконтактные промежутки, препятствующие возникновению межатомных связей;
- контактные промежутки формируют барьерные переходы для атомов и электронов, участвующих в формировании электроимпульсного тока и металлических контактов между частицами порошка;
- кроме сил бокового трения о стенку матрицы [18, 14, 15], между частицами порошка в зоне их контактирующих поверхностей, на стадии упругой подпрессовки, предшествующей появлению электроимпульсного тока действуют силы сухого трения;
- на этой стадии коэффициент трения зависит не только от давления в контакте, но и от состояния элементарной ячейки частиц порошка в матрице;

- при появлении жидкой фазы, вызванной протеканием электроимпульсного тока через порошок, в контактирующих поверхностях его частиц сухое трение замещается жидкостным, при этом коэффициент трения определяется не только вязкостью и контактным давлением, но и упругими свойствами материала частиц порошка.

На стадии упругой подпрессовки ЭИС с помощью данной модели устанавливаются следующие связи:

- между усилием сжатия электродов-пуансонов и силой нагружения частиц порошка (17), контактным давлением и работой по изменению состояния элементарной ячейки порошка на стадии упругой подпрессовки (6) – (8), (11);

- контактным давлением, упругими свойствами материала частиц порошка и коэффициентами как сухого (19), так и жидкостного трения (24) контактных поверхностей на стадии упругой деформации;

- контактным давлением, величиной межконтактных промежутков (25), (26), формирующих определенные барьерные переходы для электронов и атомов, определяющих вероятность их прохождения с одной контактной поверхности на другую (27) – (29) при упругой подпрессовке;

- барьерными переходами для электронов и атомов в контактных зонах частиц порошка и его удельной проводимостью (34), (35), на стадии упругой подпрессовки, предшествующей появлению электроимпульсного тока;

- удельной проводимостью порошка и температурой в контактах упругодеформированных частиц (40) – (43), появление которой обусловлено электротермическим действием электроимпульсного тока.

Разработанная модель процесса является дополнением к существующим моделям ЭИС, приведенным в работах [10, 14, 15] и [1, 2, 4, 11 – 13]. Согласно этим работам описание изучаемого процесса начинается либо [10, 14, 15] с мгновенного выделения тепловой энергии в контактных зонах частиц порошка и появления здесь жидкометаллических контактов, либо [1, 2, 4, 11 – 13] с упругопластической деформации частиц порошка, диффузии атомов, благодаря которой формируется пористое тело, с упруго-вязкого течения пористого тела.

Разработанная модель может использоваться для исследования процесса ЭИС порошков тугоплавких металлов на стадии упругой подпрессовки путем моделирования.

2. Методика исследований

При моделировании учитывались результаты работ [17, 18], согласно которым в контактных зонах сферических частиц порошков тугоплавких металлов при ЭИС возможно появление высоких температур, превышающих 4000 К [17], и высокой скорости усадки порошка на начальной стадии процесса контактообразования [18]. В качестве исследуемого материала использовался модельный порошок, частицы которого имели сферическую форму, а материал – физико-механические свойства, близкие к физико-механическим свойствам тугоплавких металлов. Зависимости (6) – (8), (11), (19), (24) – (29), (34), (35), (40) – (43), составляющие основу разработанной модели процесса тепломассопереноса при ЭИС в контактных зонах частиц порошка на стадии упругой подпрессовки, решались на ПЭВМ типа IBM с помощью интегрированной системы решения математических, инженерно-технических и научных задач «MathCad 13». Данная система включала в себя текстовый и формульный редактор, вычислитель, формульный процессор, графический процессор с программными средствами отображения графики. При этом текстовый редактор служил для символического ввода и редактирования формул, а также для отображения символической части результатов вычислений, формульный процессор «MathCad 13» обеспечивал подбор и запуск расчетных программ, а вычислитель – выполнение расчетов. Графический процессор применялся для построения графиков, отображающих результаты вычислений, выполненных формульным процессором и вычислителем.

Исходя из анализа физико-механических свойств тугоплавких металлов [14, 15] при вычислениях полагалось, что модельный порошок состоит из частиц сферической формы с усредненным диаметром 100 мкм, материал которых обладает модулем упругости (E_M) $10^{10} \dots 10^{11}$ Па и имеет коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$.

При моделировании величин межконтактных промежутков у частиц этого порошка и его электропроводящих свойств давление в контактных зонах изменяли в пределах $(1 \dots 5) \cdot 10^8$ Па. Предполагалось, что модельный порошок находится в жесткой матрице цилиндрической формы с размерами 1 см, а температура материала контакта может изменяться от 300 до 3000 К. При моделировании процесса ЭИС с помощью высоковольтного разряда контактное давление составляло 10 МПа, а начальное напряжение 1,2...1,5 кВ. При моделировании процесса ЭИС с помощью токов промышленной (50 Гц) частоты амплитуда напряжения составляла 1,0...2,0 В, а амплитуда тока до 10 кА. Из-за того, что длительность процесса для ЭИС с использованием высоковольтного разряда не превышала 100 мкс, а с помощью токов промышленной (50 Гц) частоты – 5 с, теплообмен порошка с окружающей средой не учитывался.

3. Результаты исследований и их анализ

Расчеты, полученные с помощью зависимостей (20) – (23), показали, что при давлениях подпрессовки 1...100 МПа существенного уплотнения (пористость изменяется не более чем на 1...2 %) модельного порошка не происходит. Исследования с помощью (25) показали, что линейный размер межконтактных промежутков его упругодеформированных частиц сокращается с 50 до 1 нм при возрастании (1...100 МПа)

давления подпрессовки. С помощью (27) – (29) установлено, что в этом случае прозрачность барьерного перехода контактных зон для электронов на семь-восемь порядков выше, чем для атомов.

Расчеты, полученные с помощью (33) – (36), выявили, что при температуре 300 К увеличение давления подпрессовки хотя бы до 500 МПа приводит к снижению электрического сопротивления модельного порошка, однако из-за существования межконтактных промежутков в контактных зонах упругодеформированных частиц значение этой величины может на порядок превышать сопротивление тугоплавких металлов при этой же температуре, что не противоречит экспериментальным данным работ [14, 15]. Из результатов расчетов следует, что снизить электрическое сопротивление модельного порошка при давлениях подпрессовки ~ 1 МПа до значений, отличающихся на один порядок от сопротивления тугоплавких металлов, можно за счет увеличения температуры в контактных зонах его частиц до 3000 К.

Расчеты, полученные с помощью (33) – (43), установили, что в контактных зонах частиц модельного порошка при ЭИС, осуществляемого высоковольтным разрядом, температура в течение первого полупериода импульсного тока температурный максимум может превышать 4000 К и достигать значений 8000 К, опережая по времени появление максимума силы тока. При этом температура внутри самой частицы порошка останется практически неизменной, а слой, в котором она близка к температуре тугоплавких металлов, имеет порядок, не превышающий 10 мкм, что совпадает с данными работ [14, 15] и не противоречит экспериментальным данным работы [17].

Расчеты, полученные с помощью (33) – (42), показали, что в контактных зонах частиц модельного порошка при ЭИС, осуществляемого токами промышленной частоты с амплитудой напряжения $1 \dots 10$ В, в течение первых четырех импульсов температура в контактной зоне частиц порошка может увеличиться всего на $5 \dots 10$ К, в то время как внутри самой частицы она увеличилась на $1 \dots 2$ К. В отличие от ЭИС, осуществляемого высоковольтными разрядами, в этом случае пульсация температуры по времени совпадает с пульсацией импульсного тока. Для того чтобы достигнуть температуры 4000 К в исследуемом процессе, длительность ЭИС токами промышленной частоты должна составлять $3 \dots 5$ с.

Расчеты, полученные с помощью (19) и (24), выявили, что при неизменном давлении упругой подпрессовки появление жидкометаллической фазы в контактных зонах модельных частиц может привести к снижению коэффициента трения на один порядок. Это может объяснить высокую скорость усадки порошков при ЭИС на режимах, приведенных в работе [17].

Из анализа результатов моделирования ЭИС модельных порошков с физико-механическими свойствами тугоплавких металлов следует:

- при импульсном токе высоковольтного разряда из-за высокой ($\sim 10^7 \dots 10^8$ В/м) напряженности электрического поля в контактных зонах частиц порошков тугоплавких металлов барьерный переход, сформированный давлением подпрессовки, становится прозрачным для электрических зарядов (электронов и ионов, в том числе и атомов металлов), что способствует возникновению микродуговой плазмы с температурой, превышающей 4000 К (может достигать значений $6000 \dots 8000$ К), которая и вызывает появление здесь жидкометаллической фазы;

- при электроимпульсном токе промышленной частоты, протекающем через порошок тугоплавких металлов, из-за относительно низкой ($\sim 10^5 \dots 10^6$ В/м) напряженности электрического поля барьерный переход в контактных зонах его частиц имеет относительную прозрачность, поэтому для появления здесь жидкометаллической фазы требуется пропустить серию низковольтных разрядов определенной ($3 \dots 5$ с) длительности;

- появление жидкометаллической фазы в контактных зонах частиц может снизить на порядок как коэффициент трения, так и силу трения между ними и тем самым способствовать появлению высокой скорости усадки порошка уже на начальной стадии процесса ЭИС.

Выводы:

- 1) исходя из предположения о существовании до момента появления электрического тока межконтактных промежутков у частиц порошков на стадии упругой подпрессовки разработана модель процесса электроимпульсного спекания (ЭИС). Моделирование процесса ЭИС показало, что в контактных зонах упругодеформированных частиц порошка формируются барьерные переходы, прозрачность которых зависит от давления подпрессовки и температуры;

- 2) исследования процесса ЭИС на стадии упругой подпрессовки модельного порошка с физико-механическими свойствами частиц, присущих тугоплавким металлам, показали, что его электрическое сопротивление в зависимости от величины давления упругой подпрессовки может превышать аналогичное сопротивление тугоплавких металлов на один-три порядка;

- 3) расчетным путем установлено, что высокая ($10^7 \dots 10^8$ В/м) напряженность электрического поля при ЭИС, осуществляемым высоковольтным разрядом, делает барьерный переход контактных зон частиц порошка прозрачным для электронов и ионов (атомов металлов), вызывая тем самым появление микродуговой плазмы с температурой, превышающей 4000 К и достигающей $6000 \dots 8000$ К, что способствует появлению жидкометаллической фазы в течение одного периода разряда. Жидкометаллическая фаза в

контактных зонах частиц порошка устанавливает металлические связи и формирует пористый порошковый материал (ППМ);

4) из-за относительно низкой ($10^5 \dots 10^6$ В/м) напряженности электрического поля в контактных зонах частиц порошка при ЭИС, осуществляемой с помощью импульсного тока промышленной (50...60 Гц) частоты, ППМ из порошков тугоплавких металлов образуются после пропускания серии импульсов тока определенной (3...5 с) длительности;

5) появление в процессе ЭИС жидкометаллической фазы в контактных зонах частиц порошков тугоплавких металлов может уменьшить между ними силу трения на порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райченко, А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А.И. Райченко. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
2. Спекание металлических порошков серий сильноточных импульсов / Н.Н. Заводов [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 1999. – Т. 37, № 1. – С. 135 – 141.
3. Матренин, С.В. Электроразрядное спекание железо-титанового антифрикционного сплава / С.В. Матренин, А.И. Слосман, Ю.В. Мячин // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 4. – С. 74 – 77.
4. Рыморов, Е.В. Исследование и разработка износостойких порошковых материалов и технология упрочнения деталей электроимпульсным спеканием под давлением: дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Рыморов. – Киев, 1974.
5. Spark Plasma Sintering of Aluminum / Z. Shen [et. al] // Am. Ceram. – Soc. 85 (2002) [8]. – P. 1921 – 1927.
6. Zhang, J. Field Activated Sintering Techniques: a comparison and contrast / J. Zhang, A. Zavaliangos, J. Groza // P/M Science & Technology Briefs. – 2003. – Vol. 5, № 3. – P. 17 – 21.
7. Hennicke, J. Field assisted sintering technology for the consolidation of innovative materials / J. Hennicke, H.U. Kessel // Ceram. For. Int. / Ber. DKG 81. – 2004. – № 11. – P. 14 – 16.
8. Grigoriev, E. Electro discharge compaction of WC-Co composite material containing particles of diamond / E. Grigoriev, A. Rosliakov // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 534 – 536. – P. 1181 – 1184.
9. Применение технологии и оборудования конденсаторной сварки для получения изделий из порошков тугоплавких металлов / К.Е. Белявин [и др.] // Сварка и родственные технологии. Проблемы и пути обеспечения качества: сб. докл. IV Междунар. симпоз., Минск, 30 марта 2005 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск: Тонпик, 2005. – С. 61 – 64.
10. Белявин, К.Е. Получение пористых материалов из тугоплавких металлов методом электроимпульсного спекания / К.Е. Белявин, В.К. Шелег // Теория и практика машиностроения. – Минск: Технопринт, 2004. – № 2. – С. 68 – 77.
11. Тепловые процессы при электроимпульсном прессовании порошков / С.А. Баланкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1984. – № 2. – С. 124 – 129.
12. Дорожкин, Н.Н. Импульсные процессы нанесения порошковых покрытий / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, В.К. Ярошевич. – Минск: Наука и техника, 1985. – 279 с.
13. Введение в физику твердых, жидких и пористых систем / под ред. Н.Н. Дорожкина. – Таганрог: Изд-во Таганрог. гос. пед. ин-та, 2001. – Ч. I, II.
14. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Н. Белявин [и др.]. – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.
15. Белявин, К.Н. Теоретические основы электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Н. Белявин. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. – 52 с.
16. Бальшин, М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.Ю. Бальшин, С.С. Кипарисов. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
17. Кузнечик, О.О. Применение системы адаптивного управления в процессах электроимпульсного спекания порошков титана / О.О. Кузнечик, А.В. Сосновский // Техника машиностроения. – 2008. – Вып. 3. – С. 16 – 19.
18. Кузнечик, О.О. Применение системы адаптивного управления в процессах электроимпульсного упрочнения порошкового электроконтактного материала на основе вольфрама / О.О. Кузнечик, А.В. Сосновский // Техника машиностроения. – 2008. – Вып. 4. – С. 20 – 22.
19. Справочник по сопротивлению материалов / Е.Ф. Винокуров [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1988. – 464 с.
20. Пористые проницаемые материалы: справ. / под ред. С.В. Белова. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.
21. Пилинович, Л.П. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой для фильтрующих жидкостей и газов / Л.П. Пилинович [и др.]; под ред. П.А. Витязя. – Минск: Тоник, 2005. – 252 с.
22. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.

23. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1979. – 944 с.

Условные обозначения

A – работа, Дж;	a_m – коэффициент теплоотдачи материала, м;
A_e – работа выхода, эВ;	c_m – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);
D_0 – диаметр частицы, м;	d – диаметр контакта, м;
$D_{эп}$ – диаметр электродов-пуансонов, м;	e – электрон ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);
$D_{эп}$ – диаметр порошковой насыпки в матрице, м;	h – изменение высоты насыпки, м;
E_0 – напряженность электрического поля, В/м;	h_p – постоянная Планка ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с);
E_e – напряженность электрического поля в контактных зонах частиц порошка, В/м;	l_n – размер межконтактного промежутка, м;
E_M – модуль упругости, Па;	k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);
F_0 – сила давления в контакте, Н;	m_e – масса электрона ($9,1 \cdot 10^{-31}$ кг);
F_n – сила нагружения, Н;	m_x – масса частицы, кг;
$F_{см}$ – сила давления порошка на стенки матрицы, Н;	n_{sk} – поверхностная концентрация атомов, м ⁻² ;
$F_{эп}$ – сила сжатия электродов-пуансонов, Н;	n_V – объемная концентрация частиц, м ⁻³ ;
H_0 – начальная высота порошковой насыпки, м;	n_{VK} – объемная концентрация контактов, м ⁻³ ;
$H_{пм}$ – высота порошковой насыпки в матрице, м;	p – давление, Па;
N_0 – количество нейтронов в ядре;	$p_{эп}$ – давление электродов-пуансонов, Па;
N_0 – количество частиц в порошковой насыпке;	r_0 – размер кристаллической решетки, м;
$N_{кч}$ – количество механических контактов;	t – время, с;
R – электрическое сопротивление, Ом;	t_0 – время нарастания тока, с;
$S_{эп}$ – площадь электродов-пуансонов, м ² ;	y – упругая линейная деформация частицы, м;
$S_{эф}$ – электропроводящая площадь поперечного сечения порошка, помещенного в матрицу, м ² ;	ε – электрическая проницаемость окисной пленки;
T – температура, К;	ε_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);
$U_{оя}$ – глубина потенциальной ямы для электрона (в атоме) или атома (в кристаллической решетке) при абсолютном нуле, эВ;	γ_m – плотность материала, кг/м ³ ;
$U_{АЯ}$ – текущее состояние атома в потенциальной яме (кристаллической решетке), эВ;	φ – угол элементарной порошковой ячейки, рад;
$U_{еЯ}$ – текущее состояние электрона в потенциальной яме (атоме), эВ;	φ_e – электрический потенциал электрона, В (совпадает по значению с работой выхода электрона);
W_F – глубина потенциальной ямы, Дж;	$\Delta\varphi_0$ – разность потенциалов между контактными поверхностями, В;
W_F – энергия Ферми, Дж;	μ_F – химический потенциал электронного газа;
Z_A – число протонов в ядре;	ξ_{01} – коэффициент сухого трения-скольжения;
Z_e – валентность;	ξ_{02} – коэффициент жидкостного трения-скольжения;
Π_0 – пористость порошковой насыпки;	ρ_0 – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;
a – период кристаллической решетки, м;	ρ_k – удельное электрическое сопротивление порошка, Ом·м

Поступила 05.01.2010

MODELLING OF FIELD ASSISTANT SINTERING TECHNOLOGY AT A STAGE ELASTIC PREFORM OF REFRACTORY METAL POWDERS

O. KUZNECHIK

On the basis assumption about existence of barrier crossing in contact zones of powder particles with a transparence influencing on electrons and atoms diffusion at the pulse electric current flow moment at a stage elastic preform the electroconductive powders field assistant sintering technology (FAST) model is presented. Modelling of powders with refractory metal physicomechanical properties FAST with using Mathcad is shown that high ($10^7 \dots 10^8$ V/m) intensity of high-voltage ($1 \dots 1,5 \cdot 10^3$ V) electric fields is becoming by barrier crossing transparent at first for electrons and then for atoms in a flow of one period of a pulse current. Because of opacity of barrier crossing at relatively low ($10^5 \dots 10^6$ V/m) intensity of electric field in contact zones of powder particles at FAST a low-voltage ($1 \dots 2$ V) pulse current with frequency of 50 Hz metallic liquid-phase contacts are formed after flow through a powder of current impulses series by duration 3...5 s. Appearance of a metallic liquid-phase in contact zones can reduce by one order friction force between powder particles.