

поверхности зерна к его объему, которое зависит от размеров, формы и шероховатости поверхности АЗ. Более высокая прочность удержания алмазных зерен шлифпорошков зернистостью 80/63 объясняется однородностью структуры композиционного материала, достигаемой в процессе его изготовления: размеры частиц порошка ПТФЭ и алмазных зерен близки по размерам (около 80 мкм). Из исследованных материалов эти композиции имеют наибольшую плотность, твердость и износостойкость (низкий удельный расход алмаза), а стабильность концентрации в них АЗ обеспечивает эффективность и стабильность (высокую производительность и качество обработанной поверхности) работы опытных инструментов, изготовленных из этих композиционных материалов.

Выводы

На основании изучения стабильности режущих свойств алмазно-абразивных инструментов методом определения количества активных компонентов можно существенно повысить производительность и ресурс, изготовленных спеканием алмазных абразивных инструментов.

Литература

1. Верещагин В.А., Журавлев В.В. Определение количества зерен, приходящихся на единицу поверхности // Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия. – Минск: Наука и Техника, 1991. – 208 с.
2. Щиголев А. Г., Полупан Б. И., Коломиец В. В. Определение количества зерен по глубине рабочего поверхностного слоя алмазного инструмента // Синтет. алмазы. – 1979. – № 3. – С. 19–25.
3. Бакуль В.Н. Определение числа частиц в одном карате алмазного порошка. – К.: ИСМ АН УССР, 1966.
4. Сафонова М. Н., Сыромятникова А. С., Шиц Е. Ю. Расчетно-экспериментальный метод определения количества активных зерен а абразивном композиционном материале // Трение и износ. – 2007. – № 5. – С. 471– 476.
5. Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Компьютерное диагностическое сито для идентификации зернистости и зернового состава микроскопических проб алмазных шлифпорошков // Сверхтвердые матер. – 2003. – № 3. – С. 71– 83.
6. Шиц Е. Ю. Исследование и разработка полимерных композиционных материалов с использованием природных алмазных порошков. – Дис. ...канд. техн. наук. – Якутск, 2000.

Поступила 09.06.09

УДК 621.921

Я .О. Подоба

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОСПЕКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

The theoretical, GTN-type potential based model has been suggested of metal powder densification in a closed die at elevated teperature. The obtained analytical, closed form solution of the model problem shows satisfactory correlation with experimental data for the cobalt powder com-

pacts. The developed theory provides a rational choice of the technological parameters of intensive electrosintering by means of computer simulation.

Введение

Технология интенсивного электроспекания [1] обеспечивает получение готового изделия нагреванием заготовки от единиц до нескольких десятков секунд, нагревом заготовки в технологической ячейке прямым пропусканием тока с приложением осевого давления 300 МПа. В качестве примера на рис. 1 показаны типичные зависимости напряжения на технологической ячейке, силы тока, усадки заготовки и температуры в центральной и торцевой частях заготовки при спекании цилиндрической порошковой прессовки из кобальта диаметром 9 мм. Длительность нагревания составляла 13 с, общая длительность выдержки под давлением – 25 с.

При максимальной температуре 820 °С остаточная пористость полученного образца не превышала 3 %.

Щадящий температурный режим электроспекания делает его перспективным методом получения изделий из алмазосодержащих композитных материалов, обеспечивающим более полную по сравнению с другими методами сохранность алмазов, а следовательно, повышение работоспособности и стойкости оснащенного такими материалами инструмента. При этом следует отметить, что требуемое качество изделий достигается только при определенном сочетании технологических параметров, в частности силы тока, давления и длительности процесса. Оптимальный выбор приведенных параметров требует знания физических механизмов уплотнения и консолидации, а также прогнозирования этих процессов на основании математической модели, позволяющей осуществлять их адекватное количественное описание. До настоящего времени известны лишь несколько публикации (например, [1; 2]), посвященных рассматриваемой проблеме.

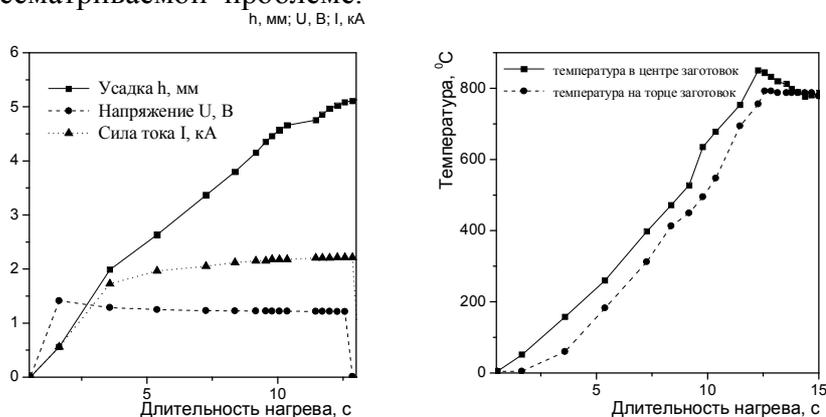


Рис. 1. Временные зависимости параметров электроспекания (осевое давление $P = 300$ МПа)

В настоящей работе сделана попытка найти уточненный подход к теоретическому описанию процесса интенсивного электроспекания. Основным механизмом массопереноса при интенсивном электроспекании является термоактивированная пластическая деформация частиц металлического порошка [2]. Предположение, что указанный механизм является единственным, позволяет использовать для описания процесса уплотнения порошковой заготовки одну из известных теорий пластичности пористого тела [3 – 6].

Соотношения теории пластичности пористого тела

Уравнение равновесия пористого тела имеет вид

$$\nabla \cdot \mathbf{y} = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{y} = \{o_{ij}\}$ - тензор макроскопических напряжений. Как правило, модель пористого материала (см., например, [3– 6]) предполагает, что его пластическое поведение описывается теорией течения по ассоциированному закону, определяемому потенциалом Φ . Последний

предполагается функцией второго инварианта девиатора напряжений q и первого инварианта тензора напряжений p (гидростатического давления):

$$q^2 = \frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}, \quad \mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - p \mathbf{I}, \quad p = \text{Tr}(\boldsymbol{\sigma}) / 3, \quad (2)$$

а условие текучести принимается в виде $\Phi(p, q) = 0$.

Выражение для тензора скоростей деформаций (ассоциированный закон текучести) может быть записано в виде

$$\dot{\mathbf{e}} = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{y}} = \lambda \left(\frac{1}{3} \frac{\partial \Phi}{\partial p} \mathbf{I} + \frac{3}{2q} \frac{\partial \Phi}{\partial q} \mathbf{S} \right). \quad (3)$$

Связь первого инварианта этого тензора (объемной деформации) со скоростью уплотнения определяется законом сохранения массы, имеющем в указанных обозначениях следующий вид

$$\dot{\varepsilon}_v = \text{Tr}(\dot{\mathbf{e}}) = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\dot{\rho} / \rho, \quad (4)$$

где $\rho = 1 - f$ – относительная плотность.

При этом предполагается, что $\partial \Phi / \partial p$ является функцией лишь гидростатического давления p , а девиатор тензора скоростей деформаций пропорционален девиатору тензора напряжений:

$$\mathbf{e} = \dot{\mathbf{e}} - \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3} \mathbf{I} = \frac{3\lambda}{2q} \frac{\partial \Phi}{\partial q} \mathbf{S}. \quad (5)$$

В систему уравнений теории пластичности пористого тела входит также диссипативная гипотеза [3]

$$\mathbf{y} : \dot{\mathbf{e}} = \rho \dot{\varepsilon}_m^{pl} \sigma_T(\varepsilon_m^{pl}), \quad \varepsilon_m^{pl}(t^*) = \int_0^{t^*} \dot{\varepsilon}_m^{pl} dt, \quad (6)$$

связывающая мощность пластической деформации

$$\mathbf{y} : \dot{\mathbf{e}} = \lambda \mathbf{y} : \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{y}} = \lambda \left(p \frac{\partial \Phi}{\partial p} + q \frac{\partial \Phi}{\partial q} \right), \quad (7)$$

предел текучести упрочняющегося материала основы $\sigma_T(\varepsilon_m^{pl})$ и эквивалентную пластическую деформацию ε_m^{pl} .

Используемый в настоящей работе потенциал текучести

$$\Phi(p, q) = \left(\frac{q}{\sigma_T} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left(\frac{3}{2} q_2 \frac{p}{\sigma_T} \right) - 1 - (q_1 f)^2 = 0 \quad (8)$$

получен Гурсоном [7] из решения задачи о центрально-симметричной деформации жестко-пластической среды с единичной сферической порой и впоследствии модифицирован Твергардом [8] к виду, известному как GTN-модель. В (8) σ_T – предел текучести материала основы (матрицы, каркаса) при одноосном растяжении/сжатии, q_1 и q_2 – постоянные коэффициенты. В модели [7] $q_1 = q_2 = 1$. В модели [8] эти постоянные коэффициенты выбраны из условия соответствия (8) теоретическому решению задачи о плоской деформации среды с упорядоченной системой цилиндрических пор. Как показано в [9], q_1 и q_2 могут быть использованы как подгоночные коэффициенты при аппроксимации как теоретических моделей, так и экспериментальных данных.

Зарубежными учеными [9] также предложен способ теоретического определения коэффициентов q_1 и q_2 , основанный на строгом численном анализе упруго-пластического поведения структурной ячейки пористого материала. Этот способ позволяет путем моделирования макроскопически однородного напряженного состояния определить поверхность текучести с учетом не только значения текущей пористости f , но и типа микроструктуры. Преимуществом

щество подхода, основанного на строгом анализе микромеханических моделей в рамках метода регуляризации [10], состоит в обеспечении условия неразрывности и надлежащего учета микроструктуры. Как следствие, в отличие от моделей, основанных на решении задачи для единичной поры, этот подход корректен не только для слабопористых материалов ($f \ll 1$), но и для высокопористых. При этом коэффициенты q_i являются структурно-чувствительными и могут использоваться в качестве структурных параметров [9]. В частности, для материала с изолированными порами, характерными для свободного спекания, моделирование дает значения $q_1 = 1,3$ и $q_2 = 0,9$, тогда как для холоднопрессованного порошка $q_1 = 1,85$ и $q_2 = 0,95$. Как будет показано далее, использование последних значений в формуле (8) приводит к согласованности с экспериментом.

Модель усадки порошковой заготовки в закрытой пресс-форме

Для прогнозирования степени усадки порошка кобальта при уплотнении в закрытой пресс-форме воспользуемся изложенной выше теорией и экспериментальными данными по пластическому деформированию беспористого кобальта. Предполагается, что смена механизма уплотнения от перегруппировки частиц к их пластической деформации происходит при пористости, близкой к 0,5. Пренебрежение формоизменением прессуемого цилиндрического брикета и обусловленными трением краевыми эффектами позволяет рассматривать данный процесс как одноосную деформацию, для которой

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = k\sigma_{33} \quad (0 \leq k \leq 1), \quad \sigma_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} = 0 \quad (i \neq j). \quad (9)$$

Положим $\sigma_{33} = P$, тогда

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = kP, \quad p = \frac{(1+2k)}{3}P, \quad S_{ii} = (\delta_{i3} - \frac{1}{3})(1-k)P, \quad q = (1-k)P, \quad (10)$$

где δ_{ij} – дельта-символ Кронекера.

При заданном k уравнение (8) можно использовать для определения P для заданного f или, наоборот, достигнутой пористости при приложенном осевом давлении P и боковом давлении

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = kP.$$

С учетом (10) уравнения (3) принимают вид

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \left(\frac{1}{3} \frac{\partial \Phi}{\partial p} + \frac{(3\delta_{i3} - 1)}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial q} \right), \quad (11)$$

откуда для одноосной деформации ($\dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}_{22} = 0$)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = \frac{3}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial q} = \frac{3q}{2\sigma_T^2} = \frac{3(1-k)P}{\sigma_T^2}. \quad (12)$$

Для пластического потенциала вида (8)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = 2q_1 f \frac{3q_2}{2\sigma_T} \sinh \left(\frac{3}{2} q_2 \frac{p}{\sigma_T} \right), \quad \frac{\partial \Phi}{\partial q} = \frac{2q}{\sigma_T^2}; \quad (13)$$

что дает следующий явный вид соотношения (12):

$$q_1 q_2 f \sinh \left(q_2 \frac{1+2k}{2} \frac{P}{\sigma_T} \right) = (1-k) \frac{P}{\sigma_T}. \quad (14)$$

Условие (14) совместно с (8) можно использовать в качестве системы уравнений для определения $\tilde{P} = P/\sigma_T$ и k как функций пористости: $\tilde{P} = \tilde{P}(\rho)$; $k = k(\rho)$.

Из (7) и (12) следует, что для случая одноосной деформации

$$\mathbf{y} : \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_v \left(p + \frac{3}{2} q \right) = \dot{\epsilon}_v P, \quad (15)$$

что совместно с (4) и (6) дает

$$\dot{\epsilon}_m^{pl} = \dot{\epsilon}_v \tilde{P}(\rho) / \rho = -\tilde{P}(\rho) \dot{\rho} / \rho^2. \quad (16)$$

Отсюда для заданной начальной ($\rho = \rho_0$) и достигнутой ($\rho = \rho^*$) относительной плотности накопленная пластическая деформация материала основы определяется как

$$\overline{\varepsilon}_m^{pl} = \int_0^{\rho^*} \dot{\varepsilon}_m^{pl} dt = - \int_{\rho_0}^{\rho^*} \frac{\tilde{P}(\rho)}{\rho^2} d\rho. \quad (17)$$

Последний шаг состоит в решении системы уравнений (8) и (14), первое из которых принимает вид

$$\left[(1-k)\tilde{P} \right]^2 + 2q_1 f \cosh \left(q_2 \frac{1+2k}{2} \tilde{P} \right) = 1 + (q_1 f)^2. \quad (18)$$

Система (18) имеет аналитическое решение

$$k(\rho) = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{q_2 \Psi / \Phi + 1} - 1 \right), \quad \tilde{P}(\rho) = \Psi / (1-k), \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi &= \operatorname{arccosh} \left(-\frac{d}{2} + \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - e} \right); \quad \Psi = \sqrt{-\frac{b}{2} + \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - c}}; \\ b &= -2(1+q_3^2) - (2/q_2)^2; \quad c = (1+q_3^2)^2 - (2q_3)^2; \\ d &= \frac{2q_3}{(q_2 q_3)^2}; \quad e = -\frac{1+q_3^2}{(q_2 q_3)^2} - 1; \quad q_3 = f q_1. \end{aligned} \quad (20)$$

Приведенных соотношений достаточно для моделирования процесса усадки порошковой заготовки в виде итерационно-инкрементальной процедуры, на каждом шаге которой предполагается малое приращение относительной плотности: $\rho_{n+1} = \rho_n + \Delta\rho$. Это значение используется последовательно для нахождения Φ, Ψ, k и \tilde{P} из соотношений (19), (20), а затем $\overline{\varepsilon}_m^{pl}$ из (17) и $P = \sigma_T(\overline{\varepsilon}_m^{pl})\tilde{P}$, т. е. абсолютного значения давления прессования, соответствующего достигнутой относительной плотности.

Численный анализ модели и обсуждение результатов

Представим числовые результаты, полученные согласно изложенной расчетной схеме. Так, на рис. 2 приведены экспериментальные [1] и расчетные значения относительной плотности порошковой заготовки из кобальта в зависимости от осевого давления при холодном прессовании в закрытой пресс-форме.

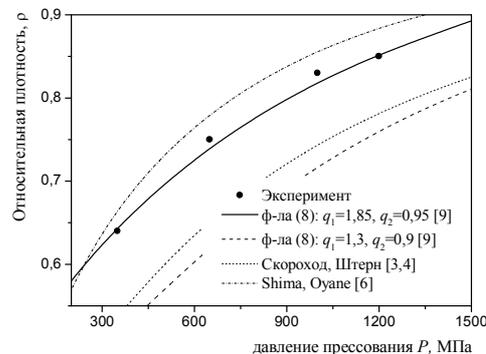


Рис. 2. Относительная плотность прессовки как функция осевого давления в закрытой пресс-форме: сравнение с экспериментом [1]

Сплошная и пунктирная линии представляют результаты расчета по изложенной методике, но с различными значениями коэффициентов q_i . Как видим соответствующая значениям $q_1 = 1,85$ и $q_2 = 0,95$ сплошная кривая согласуется с опытными данными для прессован-

ного порошка, тогда как модель с изолированными порами ($q_1 = 1,3$ и $q_2 = 0,9$, пунктирная линия) прогнозирует существенно более высокую пористость. Здесь же приведены расчеты по известным теориям пластичности пористых тел [3; 4; 6], из которых лучшее согласие дает теория [6], основанная на аппроксимации экспериментальных данных.

При интенсивном электроспекании активация усадки обеспечивается за счет нагревания заготовки прямым пропусканием тока промышленной частоты. Это приводит к значительному снижению предела текучести материала основы, а следовательно, получению более плотного материала при равном давлении. Для учета температурного фактора усадки в рассмотренной модели необходимо знать зависимость $\sigma_T = \sigma_T(\overline{\varepsilon}_m^{pl}, T)$, где T – текущая температура. Для кобальта такие данные приведены в [11] (темные символы на рис. 3), светлые кружки представляют данные [12], кривые – аппроксимация вида

$$\sigma_T(\varepsilon_{pl}, T_k) = a(T_k) + b(T_k)r(T_k)^{\varepsilon_{pl}}, \quad (21)$$

где входящие в (16) функции $a(T_k)$, $b(T_k)$ и $r(T_k)$ имеют вид

$$\Phi(T_k, A_1, A_2, w, d) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (T_k / w)^d}; \quad (22)$$

где коэффициенты $A_1 = 1406,7$, $A_2 = 111,5$, $w = 706,5$, $d = 5,5$ для $a(T_k)$; $A_1 = 740,4$, $A_2 = 961,7$, $w = 686,1$, $d = 6,7$ для $b(T_k)$; $A_1 = -2,3$, $A_2 = -13,2$, $w = 842,3$, $d = 5,5$ для $r(T_k)$; T_k – абсолютная температура.

Включение соотношения (21) в систему уравнений модели уплотняемого пористого тела позволяет прогнозировать влияние температуры на степень усадки порошковой заготовки под давлением. На рис. 4 показаны расчетные зависимости $\rho(P)$ для температур, для которых на рис. 3 приведены деформационные кривые материала основы.

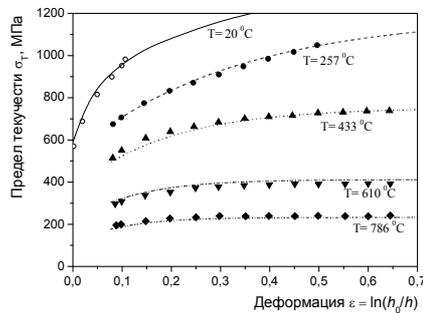


Рис. 3. Температурные зависимости деформационной кривой кобальта

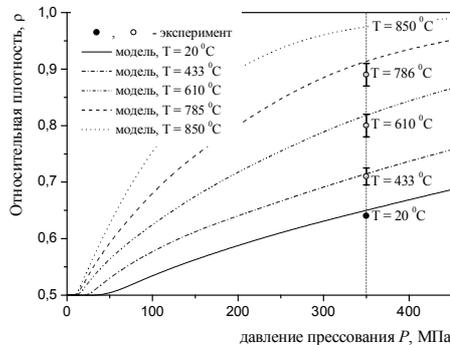


Рис. 4. Влияние температуры на уплотняемость порошковой заготовки

Как видим с повышением температуры происходит значительная интенсификация уплотнения: согласно расчету при давлении 350 МПа остаточная пористость составляет около 18 % при температуре 610 °С, 8 % при температуре 786 °С и около 3 % – при температуре

850 °С. Здесь же для сравнения приведены экспериментальные значения [1] для комнатной температуры (темный кружок) и восстановленные по изображенным на рис. 1 временным зависимостям температуры и усадки значения для температур 433°С, 610°С и 786 °С (светлые кружки). Погрешность в определении температуры обусловлена ее неоднородностью по прессовке и погрешностью измерения, а также тем, что не учитывается формоизменение прессовки. Тем не менее, даже в этом приближении наблюдается удовлетворительная согласованность расчетных и экспериментальных данных, что свидетельствует об адекватности предложенной теоретической модели.

Практическое значение проведенного исследования состоит в следующем. До настоящего времени для выбора значений технологических параметров интенсивного электроспекания в каждом конкретном случае применяли метод проб и ошибок, а также основывались на опыте предыдущих исследований. Данный подход обеспечивает осознанный выбор *P-T* параметров процесса на основе численного анализа модели, что существенно снижает временные, трудовые и материальные затраты. При этом обеспечивается возможность решения оптимизационной задачи, т. е. удовлетворение условий, накладываемых на параметры процесса. Например, при создании алмазосодержащих композиций верхний предел температуры (~850 °С) определяется термостойкостью синтетических алмазов. Использование расчетных данных, аналогичных приведенным на рис. 4, позволяет определить минимальное давление, обеспечивающее необходимое уплотнение матричного материала без повреждения алмазных зерен.

Выводы

Таким образом, в настоящей работе предложена простая процедура выбора термобарических параметров процесса интенсивного электроспекания, основанная на анализе теоретической модели уплотнения металлического порошка при повышенных температурах. Как показывает сравнение полученных с помощью этой процедуры расчетных зависимостей с экспериментом, модель дает адекватный прогноз степени усадки порошковой заготовки при заданных *P-T* условиях и, следовательно, может быть использована для решения обратной задачи, т. е. выбора оптимальных параметров технологического процесса. Выбор критерия оптимальности зависит от поставленной задачи: так, при изготовлении алмазосодержащих композитов естественными ограничениями по температуре и давлению прессования являются условия сохранности алмазных зерен. Дальнейшее уточнение модели термоактивированной усадки порошковой заготовки предполагает рассмотрение наряду с пластическим течением и других физических механизмов, ответственных за уплотнение, и в первую очередь высокотемпературной ползучести. Для оценки силы тока, длительности нагрева и определяемой ими интенсивности усадки разработанная теоретическая модель следует дополнить уравнениями электро- и теплопроводности с переменными (зависящими от пористости и температуры) коэффициентами. Это существенно усложняет соответствующую математическую задачу и делает необходимым применение для ее решения численных методов, обеспечивая взамен прогнозирование кинетики процесса интенсивного электроспекания.

Литература

1. Интенсивное электроспекание алмазосодержащих композиционных материалов. А.Л. Майстренко, С.А. Иванов, В.П. Переяслов, М.Н. Волошин // Сверхтвердые материалы. – 2000. – № 5. – С. 39–45.
2. Исследование механизма и кинетики уплотнения при интенсивном электроспекании. Сообщение 1. Лабораторные исследования. В.И Куц., С.А.Иванов, А.Л. Майстренко, В.П. Переяслов // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 2. – С. 18–25.
3. Скороход В.В. Реологическая теория спекания. – К.: Наук. думка, 1972. – 152 с.

4. Мартынова И.Ф., Штерн М.Б. Уравнение пластичности пористого тела, учитывающее истинные деформации материала основы // Порошковая металлургия. – 1978. – № 1. – С. 23–28.
5. Green R.J. A plasticity theory for porous solids // International Journal of Mechanical Sciences. – 1972. – **14**. – P. 215–224.
6. Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metals // International Journal of Mechanical Sciences. – 1976. – **18**. – P. 285–291.
7. Gurson A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I. Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Materials // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1977. – **99**. – P. 2–15.
8. Tvergaard V. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Condition // International Journal of Fracture Mechanics. – 1981. – **17**. – P. 389–407.
9. Kushch V.I., Podoba Ya.O., Shtern M.B. Effect of micro-structure on yield strength of porous solid: A comparative study of two simple cell models // Computational Materials Science. – 2008. – **42**. – P. 113–121.
10. Механика композитов. (В 12 т.) Т. 1. В.Т. Головчан, А.Н. Гузь, Ю.В. Коханенко, В.И. Куц. Статика материалов – Киев: Наук. думка, 1993. – 456 с.
11. Механические свойства кобальта при разных температурах и скоростях деформации. Л.Д. Соколов, А.Н. Гладких, В.А. Скуднов и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1969. – № 8. – С. 37–39.
12. Куц В.И., Иванов С.А. Экспериментально-теоретическая методика определения локальной пористости // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 1. – С. 51–59.

Поступила 27.05.09

УДК.541.12.012.5

Н. А. Щур, А. Е. Шило, д-р техн. наук

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ НИКЕЛЯ НА АСИММЕТРИЧНОМ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

This paper is described same aspects and results of influencing of the magnetic fields and altering asymmetric current on the nickel electroplating. It was found, what magnetic fields with altering current can be used during electrodepositing of nickel coatings with aim of forming controlling programmed properties.

Актуальность

Важнейшей задачей при получении специальных функциональных покрытий и материалов является разработка новых прогрессивных технологических способов, позволяющих обеспечить предъявляемые к ним повышенные требования. Эта задача актуальна для всех электролитических композиционных покрытий и, в частности, для гальванических никелевых, содержащих включения частиц синтетических алмазов.

Цель настоящей работы – совершенствовать технологию нанесения алмазно-гальванических никелевых покрытий путем возможного улучшения физико-механических