

УДК 621.793.8:621.762.5:537.528

**А. И. Райченко, О. Н. Сизоненко, А. В. Деревянко,
В. Г. Колесниченко, Е. Г. Григорьев**

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ (ОБЗОР)

Наведено результати теоретичного аналізу та експериментальні дані зміни стану порошкових композицій за електророзрядного впливу. Запропоновано механізми утворення у речовині фізичних дефектів на суміші порошоків під впливом електричного розряду з метою їх руйнування.

Ключові слова: електричний розряд, порошок, диспергування, втомлювальні дефекти, ударні хвилі, гідропотоки.

Введение

Понимание особенностей подготовки порошков возможно путем анализа их получения и состояния частиц перед последующим этапом обработки, например, перед процессом консолидации. Наряду с чисто механическим измельчением [1] большой интерес, особенно в последнее время, приобрел метод измельчения путем создания “плазменного шнура” в суспензии измельчаемых частиц посредством высоковольтного электрического разряда [2].

Этот вид обработки включает использование электромагнитного и температурного полей и поля механических сил, однако за диспергирование здесь отвечает преимущественно механическая компонента комплексного сигнала.

Природа материалов порошковых частиц как компонентов будущих изделий диктует условия технической реализации энергетических воздействий на металлы и их соединения типа карбидов, нитридов, силицидов и т. п. С механической точки зрения это упруго-пластически-вязкие материалы. Такие материалы при энергетическом воздействии испытывают определенную хрупкопластичную деформацию, приводящую иногда и к разрушению объекта.

Большую роль в разрушении объекта играют имеющиеся несплошности структуры, например, дефекты разного рода, в частности, трещины. Если их нет в исходном объекте, то следует сначала обратить внимание на процесс их первичного возникновения в материале. Например, процесс замедленного разрушения наблюдается иногда и в готовых стальных материалах (“водородная хрупкость”). Избыток водорода, захваченного в стали, склонен к возникновению эффекта сегрегации, что инициирует образование внутренних трещин. Особенно восприимчивыми к водородной хрупкости оказываются стальные объекты, подвергавшиеся электрополировке [3].

Пустоты также могут возникать вначале или локализоваться в процессе консолидации порошкового тела под электромагнитными воздействиями, на-

© Райченко Александр Иванович, головний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, доктор техн. наук; Дерев'яно Олександр Васильович, Колесніченко Валерій Григорович — наукові співробітники цього ж інституту; Сизоненко Ольга Миколаївна, провідний науковий співробітник Інституту технологій і імпульсних процесів НАН України, докт. техн. наук; Григор'єв Євгеній Григорович, доцент Національного дослідницького ядерного університету “МИФИ”, канд.фіз.-мат. наук.

пример, возле включений на основе оксидов либо у границ зерен, содержащих примеси [4, 5]. Ставится практический вопрос: каким же образом ток, который возникает от проходящего сквозь порошковую систему электрического разряда, вызывает достаточные изменения состояния структуры в объекте, при, например, процессе диспергирования или же, наоборот, консолидации твердофазных частиц?

На основе теоретического анализа и экспериментальных данных предложены механизмы образования в веществе физических дефектов при воздействии электрического разряда на порошки с целью разрушения.

Теоретическое представление

Известно, что в любых твердофазных объектах обычно имеются дефекты разного рода. Когда частицы оказываются под воздействием сменяющихся повышенных (пониженных) электрических сил и растягивающих механических напряжений, то вблизи внутриобъемных дефектов будут возникать превращения физической или механической природы. Во время, например, воздействия эффекта обжата (который обычно в гидродинамике считается отрицательным объемным напряжением) происходит явление незначительного уплотнения вещества. При этом жидкость, на основе которой приготовлена суспензия (или это может быть расплавленная часть порошковой композиции), считается практически сжимаемой. Когда происходит растяжение объекта, то содержащиеся в нем дефекты различных структурных типов будут вести себя по-разному. В реальных материалах встречаются дефекты следующих типов:

- точечные (внедренные “чужие” атомы, вакансии),
- линейные (дислокации, дефекты упаковки, цилиндрические поры),
- объемные (поры, инородные включения).

Можно считать, что наибольшее значение в данном случае приобретают поровые дефекты различной геометрической формы. Рассмотрим, когда на область объекта, содержащую щелеобразную пору или, по сути, внутрислойную трещину, сначала воздействует сжимающая часть совокупности ударных волн, а затем ее растягивающая часть. В ходе такой последовательности от силового действия растягивающего напряжения возникает ответная механическая реакция (силовая и деформационная) определяемая формой поры, свойствами среды, окружающей рассматриваемую область объекта, характеристиками волн и краевыми условиями.

Рассмотрим модель, позволяющую пояснить соответствующую ситуацию и охарактеризовать происходящие превращения в материале с дефектами. Обратимся к двухмерной модели в виде полосы шириной b (не ограниченной в направлении, нормальном к плоскости чертежа) с порой в виде щели шириной $2c$.

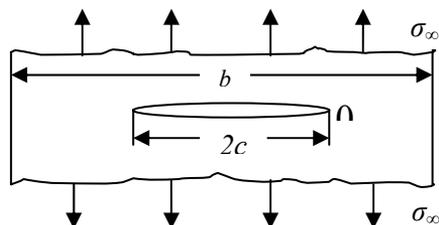


Рис. 1. Модель полого дефекта в упругом слое

Под внешним растягивающим напряжением σ_∞ возникает двухмерное напряженное состояние. Компоненты тензора упругих напряжений можно приблизительно выразить формулами [3, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &\cong \sigma_\infty \sqrt{\frac{b}{2\pi r}} \operatorname{tg} \frac{\pi c}{b} \left(\frac{5}{4} \cos \frac{\Theta}{2} - \frac{1}{4} \cos \frac{3\Theta}{2} \right) \\ \sigma_{\Theta\Theta} &\cong \sigma_\infty \sqrt{\frac{b}{2\pi r}} \operatorname{tg} \frac{\pi c}{b} \left(\frac{3}{4} \cos \frac{\Theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\Theta}{2} \right) \\ \sigma_{r\Theta} &\cong \sigma_\infty \sqrt{\frac{b}{2\pi r}} \operatorname{tg} \frac{\pi c}{b} \left(\frac{1}{4} \cos \frac{\Theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\Theta}{2} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где r, Θ — координаты плоской полярной системы с центром на передней кромке трещины (точка 0 на рис. 1).

Как видно из формул (1), при $r \rightarrow 0$ упругое напряжение должно неограниченно возрастать, что свидетельствует о фактической тенденции перехода части материала, расположенной в прилегающей окрестности у кромок трещины, в пластифицированное состояние с соответствующим ростом трещины и результирующим разрушением объекта с трещиной, в данном случае — самого материала частицы. При этом можно оценить ход процесса разрушения частицы под электросиловым воздействием. Объекты с порами других форм также могут подвергаться механическому разрушению, но уже с иным математическим описанием.

Оценку коэффициентов напряжений (и деформаций) для упругих объектов с трещиной можно описать формулой:

$$K \cong \frac{\sigma_m}{\sigma_\infty} = 1 + \left(\frac{1}{2} \div 2 \right) \sqrt{\frac{b-2c}{2a}}, \quad (2)$$

где σ_m — максимальное напряжение (возле кромки), a — радиус кривизны кромки трещины.

Так, согласно выводу Гриффитса [7], напряжение разрушения упругого объекта с трещиной при одноосном растяжении выражается следующим оценочным выражением:

$$\sigma_0 \cong \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi c}}, \quad (3)$$

где α — удельная поверхностная энергия материала, E — модуль Юнга, c — половина длины трещины (рис. 1).

Тогда разрыв модельного объекта из пластичных материалов произойдет при превышении максимального уровня нагрузки P_m , приложенной к объекту (рис. 2).

$$P_m = \frac{2\sigma_b}{\sqrt{3}} \cdot (b-2c)l, \quad (4)$$

где σ_b — предел прочности сплошного материала при растяжении, l — длина объекта в направлении, нормальном к поверхности рисунка, когда:

$$\frac{l}{\left(\frac{b}{2} - c\right)} \gg 1. \quad (5)$$

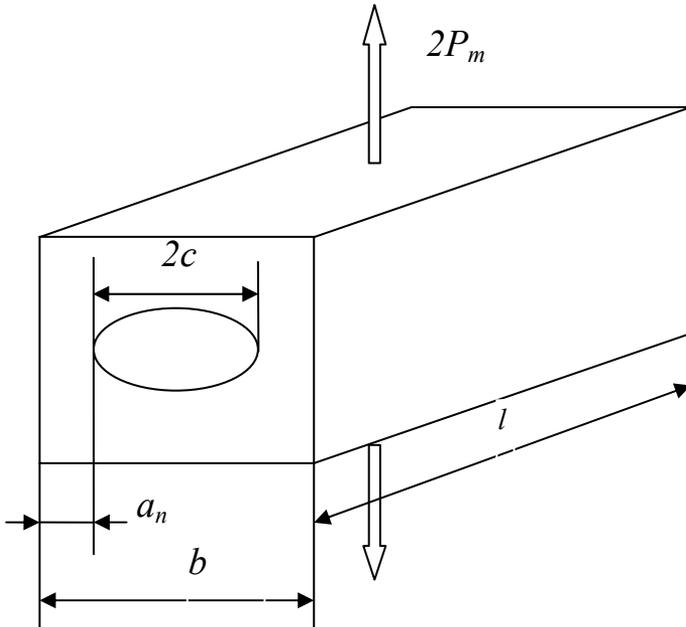


Рис. 2. Модель пластичного объекта с дефектом

Если имеющийся либо возникающий полый дефект в объекте сразу не вырастает до размера, достаточного для начала процесса развития трещины, дальнейшая эволюция трещины может напоминать постепенное увеличение размера в соответствии с закономерностями поведения материалов с дефектами при усталости. Эволюция усталостных трещин — это процесс прерывистый, связанный с циклами изменения уровней напряжений [8].

Высоковольтные электрические разряды в процессе диспергирования

Явление усталости в технике негативное, но в технологии диспергирования порошков является необходимым. Закономерности процесса разрушения объектов под влиянием усталостных эффектов можно продемонстрировать, например, ходом так называемых S-N-кривых, которые отражают зависимости максимального уровня напряжения от логарифма количества циклов воздействия до фактического разрушения. Информацию об усталостных эффектах в очень мелкодисперсных частицах, в принципе, можно получить при исследованиях макроскопических образцов. Например, средние растягивающие напряжения и вибрационные нагрузки на сплав на основе Al-Zn-Mg имеет свойство накапливаться и этим помогает эволюции усталостных трещин, что в итоге способствует ускорению процесса разрушения материала (рис. 3) [9].

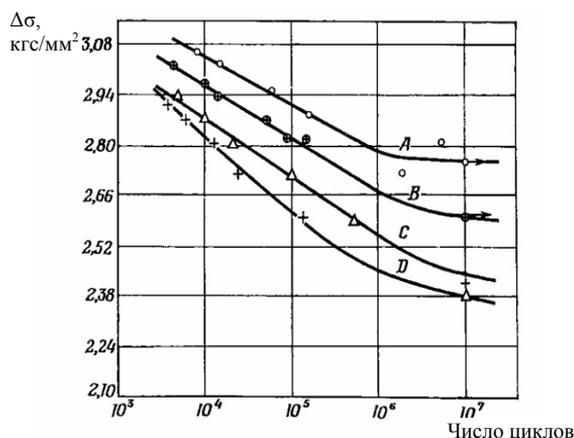


Рис. 3. Влияние среднего растягивающего напряжения $\Delta\sigma$ на характер S N-кривых сплава Al-Zn-Mg [9]: A — растягивающее напряжение равно нулю, [кг/мм²]; B — 7; C — 14; D — 21

В процессе диспергирования это обычное поведение большей части порошковых частиц, подвергающихся электрическим и механическим воздействиям.

Так в течение воздействия высоковольтного электрического разряда (ВЭР), вызывающего “плазменный шнур”, электрическая энергия частично превращается в механическую энергию в виде множества ударных и неударных волн. В результате этого воздействия твердофазные частицы, увлекаемые энергонесущими потоками, могут сталкиваться с ограничивающими объем, например, стенками реактора и между собой. Кроме того, имеется возможность воздействия тепловой энергией на сами частицы, оказывающиеся в пределах “плазменного шнура”. В объеме суспензии, находящейся в реакторе, в любом произвольном месте статистически может возникать то повышенное, то пониженное давление и даже растягивающие усилия [10].

Например, в процессе ВЭР воздействия на дисперсную систему “керосин-микрорегетерогенная смесь порошков Fe-Ti-C” происходит накопление усталостных эффектов за счет увеличения количества электроимпульсов, что приводит к интенсивному изменению размера и фактора формы порошковых частиц [11]. После начальной обработки преобладают частицы исходной округлой формы с фактором формы $\Phi \sim 0,65$ (рис. 4, кривая 2). Наряду с этим возникает около 12% частиц, которые имеют фактор формы, близкий к единице, что означает появление частиц сферической формы. Образование таких частиц объясняется тем, что в процессе обработки в зоне “плазменного шнура” происходит разложение керосина и испарение металлических частиц с последующей конденсацией продуктов испарения.

Средний диаметр исходного порошка был $d \approx 12$ мкм (рис. 5, кривая 1), а после ВЭР обработки при 1000 импульсов он уменьшился до $d \approx 2$ мкм (рис. 5, кривая 2). При дальнейшем энергетическом воздействии образуется смесь мелкодисперсных порошков со средним размером частиц $\sim 1,5$ мкм и более однородным распределением фактора формы (рис. 5, кривая 3). Обработка при 4000 импульсов приводит к появлению до $\sim 25\%$ частиц с формой, близкой к сферической ($\Phi \sim 0,9$), а основное число частиц (36%) имеет фактор формы $\Phi \sim 0,85$ (рис. 4, кривая 3).

Уменьшение среднего размера частиц порошка в смеси с увеличением количества электроимпульсов приводит к увеличению значения удельной поверхности. Наибольшее снижение размера частиц, когда образуется пик при 41%, лежит в области частиц с размером 1,4 мкм, а 35% — менее 1 мкм (рис. 5,

кривая 4). Увеличение внешней удельной поверхности при этом достигает $\approx 1100 \text{ см}^2/\text{г}$ (рис. 6).

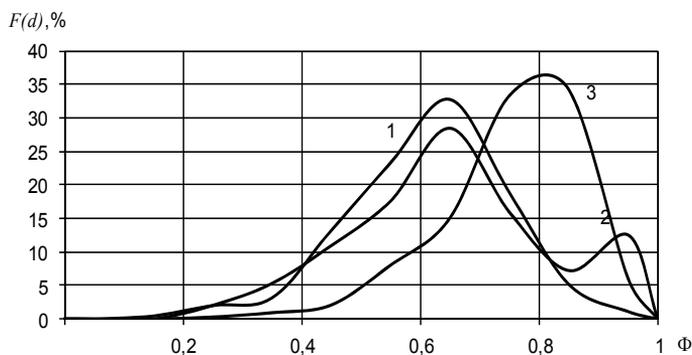


Рис. 4. Содержание $F(d)$ частиц порошковой композиции 70% Fe–25% Ti–5% С в зависимости от фактора формы Φ в зависимости от количества электроимпульсов при одинаковой интегральной энергии: 1 — исходный порошок; 2 — после 1000 имп.; 3 — после 4000 имп

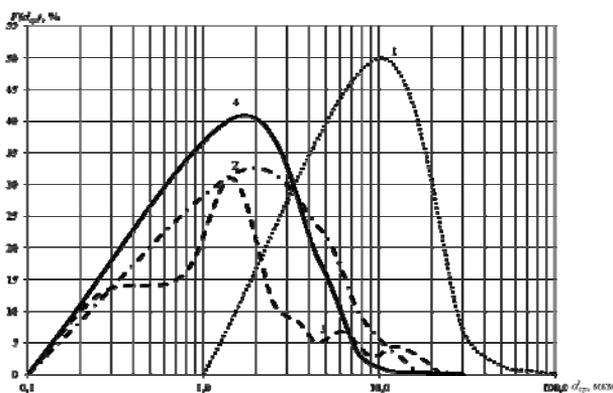


Рис. 5. Распределение процентного содержания частиц $F(d_{cp})$ по значениям среднего диаметра d_{cp} смеси порошков 70% Fe–25% Ti–5% С при различном количестве электроимпульсов с одинаковой интегральной энергией: 1 — исходный микропорошок, 2 — после 1000 имп., 3 — 2000 имп., 4 — 4000 имп

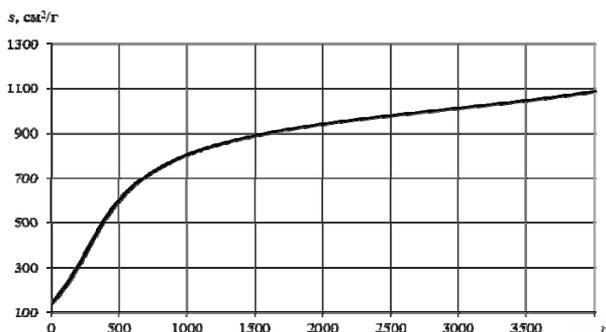


Рис. 6. Изменение удельной поверхности частиц композиции порошков 70% Fe–25% Ti–5% С от изменения числа электроимпульсов при постоянной интегральной энергии

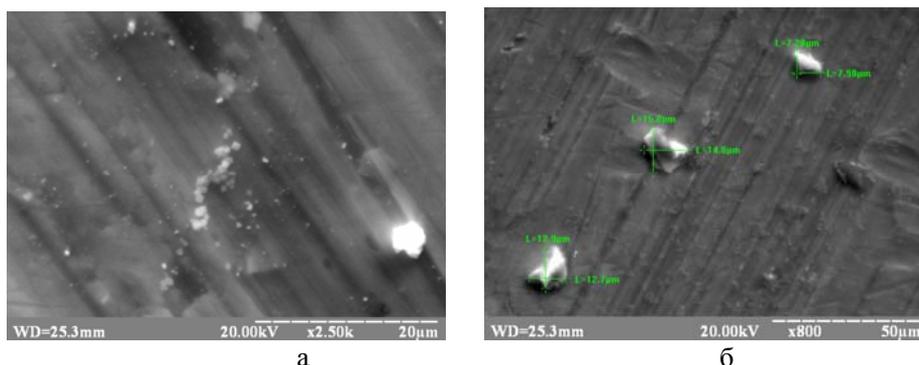


Рис. 7. Микроэлектронные фотографии порошка 70% Fe–25% Ti–5% С до и после обработки: а — исходный, $\times 800$; б — после ЭР, $\times 2500$

На рис. 7 представлены микроэлектронные фотографии смеси порошка 70% Fe–25% Ti–5% С до и после ВЭР электрообработки.

Экспериментальные данные показывают, что циклическое воздействие на твердофазные частицы импульсами “сжатие–растяжение”, формирующими большие перепады давления, создает в них напряженное состояние, способствующее развитию микротрещин. Гидропотоки, возникающие при электровозмущениях, интенсивно перемешивают суспензию. При таком броуновском движении частицы сталкиваются между собой интенсивнее, что приводит к истиранию. Поскольку исследования происходят с суспензиями, необходимо учитывать также и влияние прохождения химических процессов между твердофазными частицами и жидкой окружающей средой (вода, керосин). Электролиз окружающей среды под действием электрических процессов приводит к инициации окислительно-восстановительных реакций (например, разложению воды) либо образованию наноглерода в твердой фазе, когда окружающей средой является керосин. Это способствует изменениям фазового состава, растворению примесей, увеличению пористости частиц, снижению их прочности. Состояние поверхности и приповерхностных слоев измельченных частиц, в свою очередь, также будет характеризоваться появившимися дефектами. Наличие дефектности в структуре может играть существенную роль при изготовлении изделий из таких порошков.

Выводы

Выполнен анализ изменения состояния порошковых композиций при электроразрядном воздействии. На основе теоретического анализа и экспериментальных данных предложены механизмы образования в веществе физических дефектов при воздействии электрического разряда на смеси порошков с целью их разрушения.

Экспериментально установлено, что изменение размера и фактора формы порошков при электроразрядном диспергировании происходит за счет накопления усталостных эффектов в результате увеличения количества воздействующих импульсов.

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта № 05-08-12 НАН Украины согласно результатам конкурса НАН Украины — РФФИ 2012 г.

Представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных данных изменения состояния порошковых композиций при электроразрядном воздействии. Предложены механизмы образования в веществе физических дефектов при воздействии электрического разряда на смеси порошков с целью их разрушения.

Ключевые слова: *электрический разряд, порошок, диспергирование, усталостные дефекты, ударные волны, гидротоки*

The results of theoretical analysis and the experimental data of powder compositions state changes at electric discharge impact are presented. Mechanisms of forming of physical defects in the matter under high voltage electric discharge impact with the purpose of destruction are proposed.

Keywords: *electric discharge, powder, dispersion, fatigue defects, shock waves, hydro flows.*

1. *Ходаков Г. С.* Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 307 с.
2. *Сизоненко О. Н.* Разрядно-импульсная технология абразивных материалов / О. Н. Сизоненко, П. П. Малюшевский, Г. Г. Горовенко // Основные проблемы разрядно-импульсной технологии. – К.: Наук. думка, 1980. – С. 12–20.
3. *Макклиток Ф.* Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклиток, А. Аргон. – М.: Мир, 1970. – 443 с.
4. *Райченко А. И.* Возникновение вторичного порообразования и его влияние на усадку при электроразрядном спекании порошков / А. И. Райченко, О. Н. Сизоненко, А. В. Деревянко // Материалы 6 международной конференции “Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий” (20–24 сентября 2010 г., Большая Ялта, Понизовка, Крым, Украина) – 2010. – С. 292.
5. *Zamula M. V.* Electric-discharge sintering of TiN–AlN nanocomposites / M. V. Zamula, A. V. Derevyanko, V. G. Kolesnichenko et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2007. – Vol. 46, No. 7-8. – P. 325–331.
6. *Williams M. L.* On the Stress Distribution at the Base at the Stationary of Crack. – J. Appl. Mech. – 1957. – Vol. 24. – P. 109 – 114.
7. *Griffith A.A.* The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. – Phil. Trans. Roy. Soc. (London). – 1920 – Vol. A221. – P. 163 – 198.
8. *Хоником Р.* Пластическая деформация металлов – М.: Мир, 1972. – 408 с.
9. *Кенеди А.* Ползучесть и усталость в металлах. – М.: Мир, 1965.
10. *Гулый Г. А.* Задачи в области исследований обработки материалов высоковольтным импульсным разрядом в воде / Г. А. Гулый, Е. В. Кривицкий // Разрядно-импульсная технология. – К.: Наук. думка, 1978. – С. 3–14.
11. *Сизоненко О. Н.* Исследование влияния высоковольтных электрических разрядов на композицию порошков Fe–Ti–C / О. Н. Сизоненко, Г. А. Баглюк, А. И. Райченко и др. // Материалы 6 международной конференции “Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий” (20–24 сентября 2010 г., Большая Ялта, Понизовка, Крым, Украина), 2010. – С. 141.