

## МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ГРАНУЛ

**Кучерявая И.Н.**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: rb.irinan@gmail.com

*Выполнены компьютерное моделирование и анализ связанных между собой электрических, тепловых процессов и термомеханических напряжений в материале гранул при их электроискровой обработке. Учтены нелинейные свойства материала гранул и фазовый переход при достижении температуры плавления. Выявлена зависимость размера зон и объема расплавленного и испарившегося материала, а также максимальных значений температуры и эквивалентного напряжения на контакте двух гранул от длительности воздействия теплового потока. Учтены два источника нагрева – задаваемый поверхностный тепловой поток, обусловленный протеканием разрядного тока, и определяемая по результатам решения электрической задачи объемная плотность выделения энергии вследствие джоулевых потерь. Проведено моделирование охлаждения материала гранул после прохождения импульса тока. Реализован подход к определению оптимального значения длительности токового импульса, начиная с которого ожидается наибольшая производительность образования порошковых частиц из разрушенного объема гранул с учетом технологических условий электрообработки.*

**Ключевые слова:** электроискровая эрозия металлических гранул, электрические и тепловые процессы, нелинейные характеристики, эквивалентное (механическое) напряжение, мультифизическое моделирование.

**Введение.** Электроискровая эрозия токопроводящих сред используется в технологиях обработки материалов с целью получения порошковых материалов с размерами частиц от нанометров (< 100 нм) до сотен микрометров [2, 11]. Порошки со специальными физико-химическими и структурными свойствами, зависящими от параметров обработки [1, 2, 11], применяются в промышленном производстве новых материалов, тонких лент, пленок и покрытий.

Технология искровой эрозии основывается на формировании искровых разрядов при протекании импульсного тока в проводящей гранулированной среде, погруженной в диэлектрическую жидкость между электродами [1, 11]. Установка электроискрового диспергирования металлических гранул схематически показана на рис. 1, а. Разряды, одновременно возникающие на контактах многих гранул, вызывают их разрушение за счет высокотемпературного нагрева, образования микроплазменного канала и явлений в плазме как высококонцентрированном источнике энергии, а также вследствие механико-деформационных изменений материала. В целом электроискровая эрозия гранул проходит в сопровождении сложных электрофизических, температурных, химических, структурно-механических процессов и явлений, которые представляют интерес для изучения.

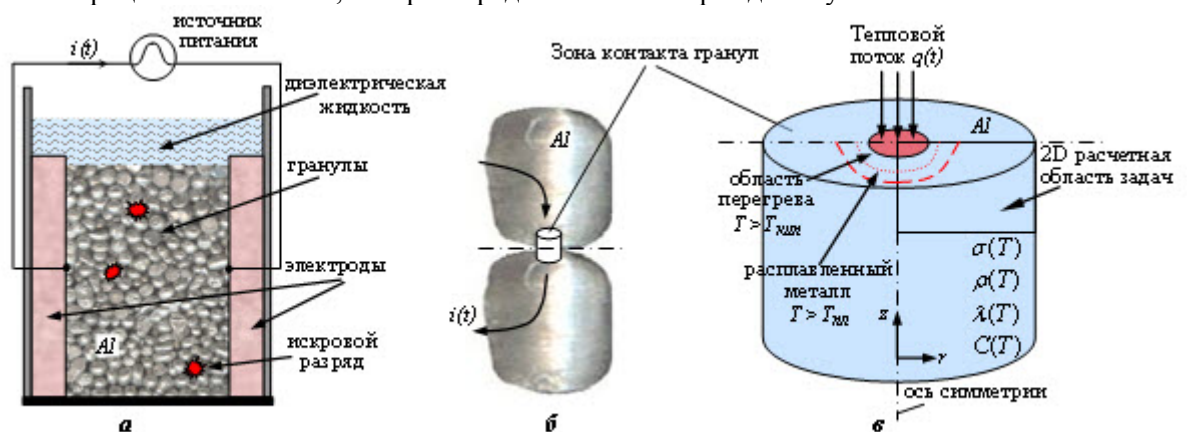


Рис. 1

В процессе электроискрового воздействия область контакта гранул подвергается оплавлению и частичному испарению. Из зоны перегретого и расплавленного материала (рис. 1, б, в) в диэлектрическую жидкость выносятся капли материала, которые быстро охлаждаются и кристаллизуются в жидкой среде, образуя порошковые частицы.

Характеристики и гидродинамические процессы в микроплазменном канале между гранулами при искровом разряде, также как и результаты экспериментальных и численных исследований электромагнитных и тепловых процессов при электроискровой эрозии токопроводящих гранул с учетом плазменного канала, представлены в работе [14]. В статье [4] методом контрольного объема выполнен расчет и анализ температурного поля в грануле при электроискровой обработке. Определены тепловые характеристики – значения теплового потока, поглощаемого материалом, глубины и объема его плавления и испарения в зависимости от мощности действующего теплового потока.

Целью настоящей работы является исследование электротепловых процессов и связанных с ними термомеханических напряжений в материале гранул при искровой эрозии, выявление механизма разрушения гранул за счет термомеханической деформации и уменьшения прочности материала, а также представление подхода к определению оптимальной длительности импульса тока для увеличения производительности процесса получения порошков с учетом технологических условий электрообработки.

Исследование проводится численным методом конечных элементов в предположении протекания одиночного импульса разрядного тока, при задании значения теплового потока, воздействующего на поверхность гранулы в области контакта в течение ограниченного промежутка времени. Используются результаты экспериментов, приведенные в работе [14], и оценки поверхностного теплового потока, полученные в [4, 14].

**Постановка задачи и математическая модель для исследования мультифизических процессов.** Основные положения и предположения разработанной модели состоят в следующем.

Последовательно решаются связанные между собой физические задачи – электрическая (стационарная) и нестационарные тепловая и механическая задачи. Схема передачи данных между ними показана на рис. 2. Согласно классификации мультифизических задач [7] связь между решаемыми задачами является слабой. Учитываются зависимости электро- и теплофизических свойств материала гранулы ( $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $C_p$ ) от температуры. Решение задач проводится в стандартной программе мультифизического моделирования Comsol Multiphysics [12].

Модель строится для единичного импульса разрядного тока. Часть общей электрической энергии разряда в виде тепловой энергии поступает в гранулу и рассеивается через ее поверхность в зоне контакта посредством теплопроводности. Рассматриваются два источника нагрева гранул – поверхностный источник в виде заданного теплового потока со стороны контактного (плазменного) промежутка и объемная плотность выделения энергии – джоулевы потери – вследствие протекания тока из контактной зоны в объем электропроводящего материала гранул (рис. 1, б, в; рис. 3). Предполагается, что поверхностный тепловой источник распределен равномерно по контакту гранул (рис. 1, в). Материал гранул (алюминий) однородный и изотропный.

Процессы исследуются без учета формирования плазменного промежутка между гранулами (процессы в плазменном промежутке изучались в [14]) и особенностей диэлектрической жидкости, в которой происходит электроискровая обработка. Гидродинамические процессы в области расплавленного материала и связанный с ними массоперенос (вынос части расплавленного материала в окружающую среду – диэлектрическую жидкость) при высокотемпературном нагреве не рассматриваются.

Поток, воздействующий на поверхность гранулы со стороны контактного промежутка, определяется при максимальном значении тока в разрядной цепи  $i_{\max}$ , задаваемого в соответствии с экспериментальными данными из [14]. Тепловой поток равен

$$q(t) = \begin{cases} q_0 & \text{при } 0 \leq t \leq \tau; \\ 0 & \text{при } t > \tau. \end{cases} \quad (1)$$

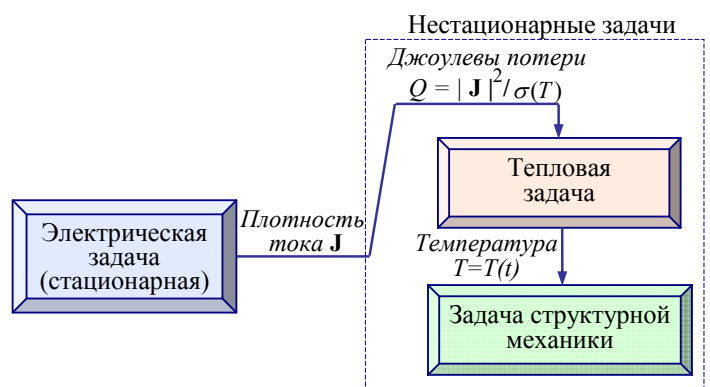


Рис. 2

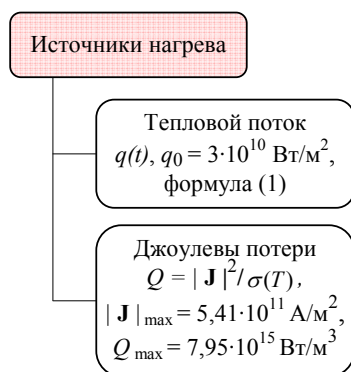


Рис. 3

Время воздействия потока  $q(t)$  принимается равным длительности импульса разрядного тока в цепи  $\tau = \text{var}$ .

Электрическая, тепловая и термомеханическая задачи решаются в двумерном случае в цилиндрической системе координат в малой области в зоне контакта гранул, показанной на рис. 1, в. Поскольку две гранулы выполнены из одного материала и имеют одинаковую форму, физические процессы анализируются в объеме только одной гранулы. Размеры расчетной области определяются с учетом формулы для глубины  $\delta$  проникновения теплового потока, который излучается источником, равномерно распределенным по поверхности тела [5]:  $\delta = \sqrt{a\tau}$ , где  $a = \lambda / (C_p \rho)$  – температуропроводность материала;  $\tau$  – время воздействия теплового потока.

*Электрическая задача.* Оценка глубины проникновения импульсного магнитного поля в материал гранулы согласно выражению [3]  $\delta = \sqrt{2\tau / (\pi\mu_0\sigma)}$  ( $\tau$  – длительность токового импульса;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\sigma$  – электропроводность алюминия) при  $\tau$  до 100–400 мкс дает значения  $\delta$ , соизмеримые с размером гранул (в [14] описаны эксперименты электроискрового диспергирования алюминиевых гранул радиусом  $\sim 2$ –2,5 мм). В таком случае электромагнитную задачу можно рассматривать в предположении постоянного тока и использовать уравнения для определения плотности тока  $\mathbf{J}$  в объеме гранулы с электропроводностью  $\sigma$ , записанные на основании системы уравнений Максвелла

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0; \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}; \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля;  $\varphi$  – электрический потенциал.

С помощью уравнений (2) получаем дифференциальное уравнение для расчета потенциала  $\varphi$

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (3)$$

и дальнейшего определения плотности тока  $\mathbf{J}$  и джоулевых потерь  $Q = |\mathbf{J}|^2 / \sigma$ , которые используются для решения связанных тепловой задачи и задачи определения механических напряжений в объеме гранулы.

Граничные условия электрической задачи следующие. Нулевой потенциал ( $\varphi = 0$ ) задается на нижней границе расчетной области (рис. 1, в). На внешних границах области, кроме оси симметрии, выбирается условие электрической изоляции  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$  ( $\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали,  $\mathbf{J}$  – плотность полного тока). В контактной круговой зоне воздействия теплового потока (рис. 1, в) определяется условие входного тока в область, плотность которого равна  $J = i_{\text{max}} / (\pi R^2)$ , где  $R$  – внешний радиус зоны контакта.

*Тепловая задача.* Нестационарный процесс нагрева гранулы описывается дифференциальным уравнением

$$\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) + Q. \quad (4)$$

Здесь  $t$  – время;  $\rho, C_p, \lambda$  – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала, зависящие от температуры  $T = T(r, z)$ ;  $Q$  – удельная мощность объемных источников тепла (джоулевы потери).

Нелинейные характеристики материала определяются следующим образом. Зависимость электропроводности алюминия от температуры  $T$  задается согласно [6, 10] как

$$\sigma(T) = \begin{cases} 10^8 / [-0,628 + T \cdot (8,45 \cdot 10^{-3} + 3,28 \cdot 10^{-6} \cdot T)] & \text{при } T < T_{\text{пл}}; \\ 10^8 / [10,56 + 14,6 \cdot 10^{-3} \cdot T] & \text{при } T_{\text{пл}} \leq T \leq T_{\text{кип}}; \\ 1,989 \cdot 10^6 & \text{при } T > T_{\text{кип}}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $T_{\text{пл}}$  и  $T_{\text{кип}}$  – температура плавления и кипения материала соответственно.

Температурные зависимости теплопроводности  $\lambda(T)$  и плотности  $\rho(T)$  для алюминия определяются с помощью интерполяционных полиномов третьей степени и эмпирическими соотношениями, полученными на основании данных работ [6, 10, 15] с учетом твердого и жидкого состояния материала. Вводится эффективная теплоемкость гранул, рассчитываемая с учетом фазового перехода при плавлении материала по выражению [8]:

$$C_p(T) = \begin{cases} c_{sol} & \text{при } T < T_{sol}; \\ 0,5 \cdot (c_{sol} + c_{liq}) + \Delta H / (T_{liq} - T_{sol}) & \text{при } T_{sol} \leq T \leq T_{liq}; \\ c_{liq} & \text{при } T > T_{liq}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $T_{sol}$  и  $T_{liq}$  – значения температуры солидуса и ликвидуса материала соответственно;  $c_{sol}$  и  $c_{liq}$  – теплоемкость твердой и жидкой фаз;  $\Delta H$  – удельная теплота плавления материала.

В (6) теплоемкость  $C_p(T)$  претерпевает скачок в интервале фазового перехода  $T_{sol} \leq T \leq T_{liq}$ . Отметим, что наличием газообразной фазы в контактной зоне гранул пренебрегается. Температура  $T$  в формулах (5), (6) выражается в градусах Кельвина.

Для тепловой задачи устанавливается условие аксиальной симметрии на оси  $r = 0$ ; в области кругового контакта воздействия теплового потока задается  $-\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = q_0$  с учетом (1); в силу выбора размеров расчетной области при достаточной удаленности ее нижней границы (рис. 1, в) на ней выбирается условие  $T = T_0$  ( $T_0$  – температура окружающей среды); на остальных внешних границах определяется условие тепловой изоляции  $-\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = 0$ . Теплоотдача с поверхности гранулы не учитывается, так как ее влияние на тепловые процессы по сравнению с распространением тепла путем теплопроводности незначительно. Начальные условия для решения уравнения (4):  $T|_{t=0} = T_0$ .

Электрическая (3) и тепловая (4)–(6) задачи связаны посредством вектора плотности тока  $\mathbf{J} = (J_r, J_z)$  и джоулевых потерь  $Q$  (рис. 2).

*Задача определения термомеханических напряжений.* Неравномерность нагрева объема гранулы вызывает появление в нем термомеханических напряжений. Для их расчета в предположении отсутствия внешних механических нагрузок и давления в материале используется уравнение

$$\rho(T) \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \hat{\sigma} = 0. \quad (7)$$

Здесь  $\hat{\sigma}$  – тензор механических напряжений;  $\mathbf{u} = (v, w)$  – вектор смещения;  $\rho(T)$  – плотность материала. При этом компоненты тензора деформаций  $\hat{\varepsilon}$  равны  $\varepsilon_r = \frac{\partial v}{\partial r}$ ;  $\varepsilon_\varphi = \frac{v}{r}$ ;  $\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$ ; деформация сдвига

$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right)$  ( $v$  и  $w$  – составляющие вектора смещения по координатам  $r$  и  $z$  соответственно).

Термическая деформация связана с температурой линейной зависимостью и для изотропного материала определяется так:  $\hat{\varepsilon} = [\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_z, \varepsilon_{rz}]^T - [\alpha, \alpha, \alpha, 0]^T \cdot (T - T_0)$ ,

где  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения материала (алюминия);  $T_0$  – исходная температура;  $T$  – температура, значения которой находятся из решения тепловой задачи (4).

Начальные условия для задачи структурной механики такие: компоненты вектора смещения  $\mathbf{u}|_{t=0} = (0, 0)$ , вектора скорости  $-\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}|_{t=0} = (0, 0)$ ; давление  $p|_{t=0} = 0$ . В качестве граничных условий на всех границах, кроме осевой симметрии, задается условие свободной поверхности  $\hat{\sigma} = 0$  в предположении, что материал гранулы не испытывает силовых нагрузок и давления.

Силовое воздействие на материал со стороны электрического поля не рассматривается. Задача (7) решается на основании результатов тепловой задачи (4) на каждом шаге по времени  $t$  при изменении температуры  $T(t)$  (рис. 2). Решение задачи структурной механики проводится только в области твердого состояния материала (при  $T < T_{nl}$ ), границы которой с нагревом гранулы на каждом временном шаге изменяются. Уравнение (7) содержит нелинейную зависимость  $\rho(T)$ . Нелинейные нестационарные тепловая задача и задача структурной механики решаются одновременно после решения электрической задачи.

Для отображения напряженно-деформируемого состояния материала гранулы в работе используется величина эквивалентного напряжения – расчетная механическая характеристика материала. Как правило, сравнение максимального значения этой величины с пределом прочности материала позволяет сделать вывод о степени его прочности и возможном разрушении.





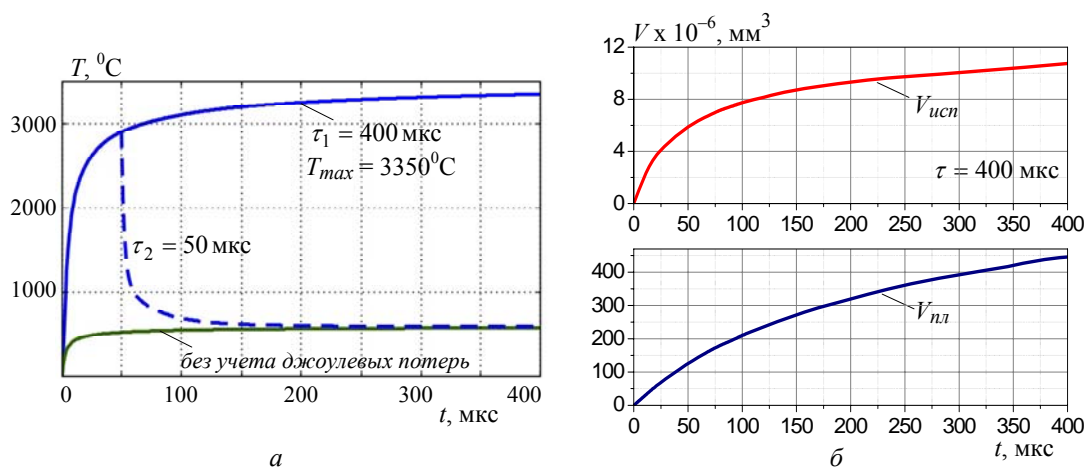


Рис. 5

улевых потерь. Сравнение двух кривых, отмеченных сплошной линией, показывает существенный вклад джоулевых потерь в нагрев материала гранулы.

Изменение объема расплавленного  $V_{пл}$  и испарившегося  $V_{исп}$  материала от времени  $t$  воздействия теплового потока ( $\tau = 400$  мкс) представлено на графиках рис. 5, б. Как видно, объем расплавленного металла  $V_{пл}$  растет во времени несколько быстрее. Наибольшее увеличение объема испарившегося материала  $V_{исп}$  отмечается на отрезке времени до 100 мкс. Начиная с этого момента, ожидается наибольшая производительность образования порошковых частиц из разрушенного объема гранулы при соблюдении одного из условий эффективности технологии –  $\tau = \tau_{min}$ . Отметим, что столь продолжительная длительность импульса тока  $\tau$  выбрана для более наглядного представления зависимостей  $T(\tau)$ ,  $T(t)$ ,  $V_{пл}(t)$ ,  $V_{исп}(t)$  и нахождения условия высокопроизводительного получения порошкового материала.

Аналогичные зависимости объема расплавленного и испарившегося металла от мощности и продолжительности воздействия теплового источника получены в работе [4], в которой достоверность расчетных величин подтверждена путем их сравнения с аналитическим решением задачи нагрева полубесконечного тела под действием теплового поверхностного источника ограниченного действия.

**Вывод.** Проведено компьютерное моделирование связанных электротепловых процессов и термомеханических напряжений в отдельной алюминиевой грануле применительно к технологии электроискровой эрозии гранулированной среды. Получены количественные характеристики процесса разрушения материала гранулы за счет высокотемпературного нагрева и оплавления контактной поверхности, а также деформации и уменьшения прочности материала. Показана возможность достижения эффективных режимов получения порошкового материала путем обеспечения оптимальных значений длительности импульса разрядного тока.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов. – Фрунзе: Илим, 1990. – 256 с.

2. Иванова О.М., Даниленко М.И., Монастирський Г.Є., Коломицев В.І., Коваль Ю.Н., Щерба А.А., Захарченко С.М., Портъє Р. Дослідження механізмів утворення нанопорошків Ti-Ni-Zr-Cu, отриманих методом електроискрової ерозії в криогенних рідинах // Металлофізика і новітні технології. – 2009. – Т. 31. – № 5. – С. 603–614.

3. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 392 с.

4. Кучерявая И.Н. Тепловой анализ процесса электроискровой обработки гранул // Технічна електродинаміка. – 2003. – № 2. – С. 67–71.

5. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Какора А.Н. Лазерная и электронно-лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

6. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергия, 1973. – 392 с.

7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 3–15.

8. Самойлович Ю.А. Тепловые процессы при непрерывном литье стали. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.

9. Справочник по цветным металлам (механические, физические, химические, коррозионные свойства цветных металлов...). – <http://libmetal.ru/al/al%20prop.htm>

10. Столович Н.Н., Милицкая Н.С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. – Минск: Наука и техника, 1975. – 157 с.

11. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: influence of processing parameters // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95. – No 3. – Pp. 823–829.

12. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>

13. Howatson A.M., Lund P.G., Todd J.D. Engineering tables and data. – London; New York: Chapman and Hall, 1991. – 181 p.  
 14. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Spark erosion of conducting granules in a liquid: analysis of electro-magnetic, thermal and hydrodynamic processes // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 6. – С. 4–17.  
 15. Totten G.E., MacKenzie D.S. Handbook of aluminum. – CRC Press, 2003. – 1310 p.

УДК 621.3 : 004.942

## МУЛЬТИФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБЦІ СТРУМОПРОВІДНИХ ГРАНУЛ

Кучерява І.М., докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: rb.irinan@gmail.com

Виконано комп'ютерне моделювання та аналіз пов'язаних між собою електричних, теплових процесів і термомеханічних напруг у матеріалі гранул при їхній електроіскровій обробці. Враховано нелінійні властивості матеріалу гранул і фазовий перехід при досягненні температури плавлення. Виявлено залежність розміру зон і об'єму розплавленого матеріалу та матеріалу, що випаровується, а також максимальних значень температури та еквівалентної напруги на контакті двох гранул від тривалості дії теплового потоку. Враховано два джерела нагріву – поверхневий тепловий потік, обумовлений протіканням розрядного струму, та об'ємна густина виділення енергії внаслідок джоулевих втрат, що визначається за результатами розв'язання електричної задачі. Проведено моделювання охолодження матеріалу гранул після проходження імпульса струму. Реалізовано підхід до визначення оптимального значення тривалості імпульса струму, починаючи з якого очікується найбільша продуктивність утворення порошкових часток зі зруйнованого об'єму гранул з урахуванням технологічних умов електрообробки. Бібл. 15, рис. 5, табл. 1.

**Ключові слова:** електроіскрова ерозія металевих гранул, електричні та теплові процеси, нелінійні характеристики, еквівалентна (механічна) напруга, мультифізичне моделювання.

## MULTIPHYSICS PROCESSES AT SPARK EROSION TREATMENT OF CONDUCTING GRANULES

Kucheriava I.M.

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: rb.irinan@gmail.com

The computer modeling and analysis of the coupled electrical, thermal processes and thermal stresses in conducting granules during their spark erosion treatment are carried out. The non-linear properties of the material and phase (solid-liquid) transition at melting point are taken into account. The dependence of the volume of molten and evaporated material as well as the maximum values of temperature and equivalent tensile stress in the granule on the duration of heat flow is revealed. The two thermal sources such as surface heat flow owing to the passage of pulsed current and volume heat source due to resistive heating are considered. The Joule's losses are determined by electric problem solving. The simulation of granule cooling after the end of current pulse is performed. The paper presents the realization of the approach to determine the optimum value of the pulse duration, starting from which the greatest production of powdered particles from destructed granule material taking into account the technological requirements is expected. References 15, figures 5, table 1.

**Key words:** spark erosion of metal granules, electrical and thermal processes, non-linear characteristics, equivalent tensile stress (von Mises stress), multiphysics modeling.

1. Asanov U.A., Tsoi A.D., Shcherba A.A., Kazekin V.I. Electro-erosion technology of compounds and powders of metals. – Frunze: Ilim, 1990. – 256 p. (Rus)
2. Ivanova O.M., Danilenko M.I., Monastyrskiy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Zakharchenko S.M., Portier R. Study of formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders produced by spark erosion in cryogenic liquids // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2009. – Vol. 31. – No 5. – Pp. 603–614. (Ukr)
3. Knoepfel H. Pulsed high magnetic fields. – Moskva: Mir, 1972. – 392 p. (Rus)
4. Kucheriava I.M. Thermal analysis of spark erosion treatment of granules // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2003. – No 2. – Pp. 67–71. (Rus)
5. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kakora A.N. Laser and electronic laser treatment of materials. Handbook. – Moskva: Mashinostroenie, 1985. – 496 p. (Rus)
6. Malkov M.P. Handbook on physico-technical background knowledge of cryogenics. – Moskva: Enegiiia, 1973. – 392 p. (Rus)
7. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling of electrotechnical devices // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 2. – Pp. 3–15. (Rus)
8. Samoilovitch Yu.A. Thermal processes during continuous casting of steel. – Moskva: Metallurgiiia, 1982. – 152 p. (Rus)
9. Manual on non-ferrous metals (mechanical, physical, chemical, corrosive properties of non-ferrous metals...). – <http://libmetal.ru/al/al%20prop.htm> (Rus)
10. Stolovich N.N., Minitskaia N.S. Temperature dependences of termophysical properties of some metals. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1975. – 157 p. (Rus)
11. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: influence of processing parameters // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95. – No 3. – Pp. 823–829.
12. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
13. Howatson A.M., Lund P.G., Todd J.D. Engineering tables and data. – London; New York: Chapman and Hall, 1991. – 181 p.
14. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Spark erosion of conducting granules in a liquid: analysis of electro-magnetic, thermal and hydrodynamic processes // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2004. – No 6. – Pp. 4–17.
15. Totten G.E., MacKenzie D.S. Handbook of aluminum. – CRC Press, 2003. – 1310 p.

Надійшла 24.01.2017  
 Остаточний варіант 09.03.17