

мешался шарнир, оказалось, что часть узлов в контактной зоне переместились в направлении противоположном общим перемещениям оболочки. То есть оказалось, что часть элементов вышла из контакта. Проверить это утверждение можно, если рассмотреть изменение нормальных напряжений вдоль линии контакта. В данном случае в выбранной системе координат нормальными являются напряжения  $\sigma_r$ , график значений которых в центрах контактных конечных элементов представлен на следующем рисунке. Из графика видно, что в контакте при деформировании остаются только крайние элементы, в узлах других контактных элементов нормальные напряжения равны нулю, т.е. в пределах этих элементов после деформирования оболочка и кольцо не контактируют.

В целом следует отметить, что проведенный анализ свидетельствует о возможности применения программного комплекса SPACE-T для анализа контактного деформирования осесимметричных тонкостенных тел вращения.

**Список литературы:** 1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. – Харьков: МОСТ – Торнадо, 2002. – 288 с. 2. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И. Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач // Динамика и прочность машин. – 2000. - №57, С. 24-34. 3. M.Lashkari, Ph.D. COSMOS/M User Guide. Stress, Vibration, Buckling, Dynamics, and Heat Transfer Analyses (Release Version 1.52).-S.R.A.C.- Santa Monica, California, 1988.- 231p. 4. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высш. школа, 1982. – 264с.

*Поступила в редколлегию 29.04.02*

УДК 534.1:533.9

**К.В. ВАКУЛЕНКО; А.В. КОЛОДЯЖНЫЙ**, канд.техн.наук;  
**С.Ю. СОТРИХИН**, канд.техн.наук; ИПМаш НАН Украины

### **УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ ТОЛСТЫХ ПРОВОДНИКОВ**

Приведена одновимірна задача електричного вибуху циліндричних дротин при наявності шарів з різноспрямованими струмами. За критерій руйнування прийнято динамічний деформаційний критерій міцності.

С развитием новых направлений в современной технике, большой интерес представляет применение явления электрического взрыва проводников (ЭВ) [1,3]. Несмотря на наличие достаточного количества теорий и большого числа экспериментов, физика явления ЭВ проводников все еще недостаточно полно изучена, особенно для толстых проводников. Это не позволяет выбирать оптимальные параметры технологических процессов.

Исследования толстых (диаметром 0,5 мм и более) проводников в литературе встречается достаточно редко. Хотя многими авторами отмечается, что некоторые предположения, принимаемые для тонких проводников, пригодны для расчета параметров проводников больших диаметров, однако ЭВ таких проводников все же подлежит более тщательному теоретическому и экспериментальному исследованию.

Согласно одной из теорий [4, 5], причиной электрического взрыва является взаимодействие слоев с противоположным направлением токов. Возникновение таких токов обусловлено тем, что в процессе плавления проводник подвергается влиянию неустойчивостей различного характера (пинч-эффект, силы поверхностного натяжения и другие условия на поверхности проводника и в его объеме). В результате получается неоднородная механическая система, развивающаяся во времени. При этом материал в слоях с противоположным направлением токов находится в разных фазовых состояниях: внутренние слои - твердое тело, наружные - в состоянии плавления и испарения. Возникновение направленных перпендикулярно поверхности объемных сил отталкивания приводит к нарушению сплошности структуры проводника по границам слоев.

Поскольку время распространения тока по поверхности (в скин-слое) вдоль оси проводника намного меньше времени диффузии, то можно считать, что в каждом сечении однородного длинного проводника диффузия тока будет протекать одинаково. Это дает возможность рассматривать одномерный процесс.

Дифференциальное уравнение диффузии тока в длинный цилиндрический проводник выглядит следующим образом [4]:

$$\frac{\partial^2 j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial j}{\partial r} = \mu \sigma \frac{\partial j}{\partial t} \quad (1)$$

где  $j$  - плотность тока;  $r$  - радиус проводника;  $t$  - время;  $\mu$ ,  $\sigma$  - соответственно магнитная проницаемость и проводимость материала.

Задачу будем решать с нулевым начальным условием

$$j(r, 0) = 0 \text{ при } 0 < r < a, \quad (2)$$

где  $a$  - начальный радиус проводника.

Граничные условия выбираются из зависимости для средней плотности тока в момент  $t_1$  развития неустойчивостей, такой, при котором в поверхностном слое возникает ток обратного направления. В отличие от работы [4], где плотность тока определялась усреднением по всему сечению проводника, в данном случае использовалось усреднение по толщине скин-слоя в начальный момент времени.

Таким образом  $C = I/\rho a \delta$ ,  $\delta = (2/\omega \mu_0 \sigma)^{1/2}$ , где  $\delta$  - толщина скин-слоя,  $\omega$  - частота тока;  $I$  - полный ток разряда на начальной стадии электровзрыва, который совпадает с током короткозамкнутой цепи:

$$I(t) = I_0 * \sin(\omega_0 t),$$

где  $I_0 = U_0/Z_0$ ,  $Z_0 = (L/C_0)^{1/2}$  - волновое сопротивление,  $\omega_0 = (LC_0)^{-1/2}$  -

циклическая частота.

С учетом этих замечаний граничные условия принимают вид:

$$j(a, t) = C \text{ при } 0 < t < t_1, \quad j(a, t) = -C \text{ при } t \geq t_1, \quad (3)$$

Решение уравнения (1) с начальным условием (2) и граничными условиями (3) получается применением преобразования Лапласа по времени и разложением в ряд Фурье - Бесселя по радиальной координате  $r$  на интервале  $[0; a]$ , и в безразмерных величинах выглядит следующим образом:

$$\frac{j(r, t)}{C} = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n * r / a)}{\beta_n J_1(\beta_n)} e^{-\beta_n^2 T}, \quad \text{при } 0 < T < T_1; \quad (4)$$

$$\frac{j(r, t)}{C} = -1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n * r / a)}{\beta_n J_1(\beta_n)} e^{-\beta_n^2 T} (2e^{\beta_n^2 T} - 1), \quad \text{при } T \geq T_1,$$

где  $J_0, J_1$  - функции Бесселя первого рода,  $\beta_n$  - корни уравнения Бесселя первого рода нулевого порядка,  $T = t/\mu\sigma a^2$  - безразмерное время.

Решение данной задачи было использовано для численного исследования соответствующих процессов в медном цилиндрическом проводнике диаметром  $10^{-3}$  м с параметрами:  $\mu = 1,3 \cdot 10^{-6}$  Гн/м,  $\sigma = 58 \cdot 10^6$  (Ом/м) $^{-1}$ .

На рис. 1 приведена зависимость плотности тока от времени (в мксек) в различных слоях проводника до и после момента возникновения обратного тока. Видно, что в начальный момент времени ток присутствует только в скин-слое и с течением времени распространяется вдоль радиуса к центру проводника. На рис. 2 изображен процесс диффузии тока вглубь проводника в различные характерные моменты времени, начало координат помещено на поверхности проводника. Видна картина развития слоя с обратными токами начиная с момента  $t_1$ . В вычислениях момент  $t_1$  принимался равный  $10^{-5}$  с.

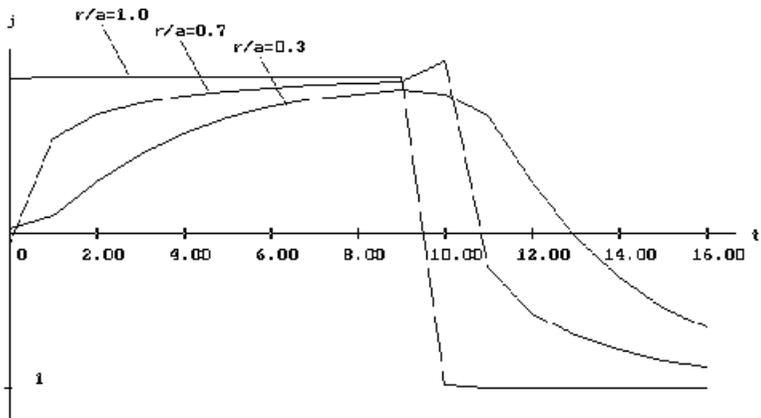


Рис. 1. Временное распределение плотности тока в слоях проводника

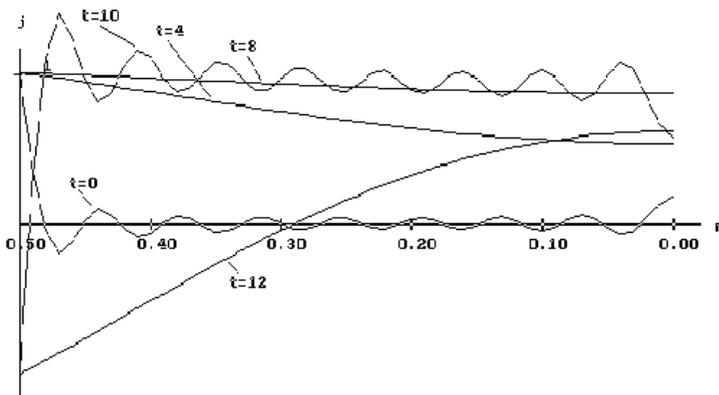


Рис. 2. Радиальное распределение плотности тока

Наличие слоев с обратным направлением тока вызывает силу отталкивания с давлением между слоями равным согласно [4]:

$$P = \int_{r_1}^a \frac{\mu j(r,t)}{r} \left[ \int_0^r j(r,t) r dr \right] dr, \quad (5)$$

где  $r$  и  $r_1$  - граница слоев, определяемая в процессе расчета.

Электровзрыв, как нарушение сплошности структуры материала по цилиндрической поверхности  $r = r_1$  наступает в момент, когда давление  $P$  превысит динамический предел прочности материала

$$P \geq \sigma_{vst} = \sigma_{vst} \left[ 1 - (\epsilon_i / D)^{1/n} \right], \quad (6)$$

где  $\sigma_{vst}$  - статический предел прочности материала;  $\epsilon_i$  - интенсивность скорости деформации;  $D, n$  - динамические прочностные параметры материала

В соответствии с работой [2]:

$$\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{r_1} \frac{dr_1}{dt}. \quad (7)$$

Интенсивность скорости деформации при образовании трещин  $\epsilon_i \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ , а  $D$  и  $n$  для меди соответственно равны  $5,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  и  $6,5$ .

В момент, когда наружный слой начнет отделяться, ток перейдет в следующий слой проводника и процесс повторится, до полного электровзрыва всей массы проводника.

Взрывной процесс, развивающийся по объему проводника, происходит за время порядка:

$$t_c = \frac{\mu \sigma_0^2 * 10^{-7}}{15}. \quad (8)$$

Критерий ЭВ по гипотезе отрыва слоев с противоположно направленными

ми токами позволяет определять минимальное значение полного тока, необходимое для ЭВ проводника с заданными геометрическими и динамическими прочностными характеристиками с учетом фазового состояния материала проводника. Таким же образом производится оптимизация тока при реализации процесса магнитоимпульсной штамповки (раздача труб, колец) и электровзрывных процессах соединения конструктивных элементов (электровзрывная сварка и пайка).

**Список литературы:** 1. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с. 2. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Янютин Е.Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с. 3. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии. - Мн.: Наука и техника, 1983. - 151 с. 4. Exploding Wires. N.Y. Plenum Press, 1959, v.1. перевод: Взрывающиеся проволочки / под ред. А.А. Рухадзе. – М.: изд-во иностр. лит., 1963. – 341 с. 5. Электрический взрыв проводников / под ред. А.А. Рухадзе и И.С. Шпигеля. М.: Мир. - 1965. - 354 с.

*Поступила в редколлегию 05.04.02*

УДК 531

***В.М.ГРИЩЕНКО***, канд. техн. наук, ***А.Є. ТРУНІН***

## **ВИКОРИСТАННЯ СПЛАЙНІВ ТА СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ НЕСТАЦІОНАРНИХ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В МАШИНАХ**

Запропоновано алгоритм апроксимації на окремих ділянках нестационарного динамічного процесу в машинах. При цьому для “повільної” складової використовується сплайн-апроксимація, а для “швидкої” – дискретне перетворення Фур’є.

Для контролю віброактивності та динамічної якості машин у більшості випадків є достатнім виконати аналіз вібраційних сигналів, що виникають при їх роботі. Метод частотного аналізу є одним з найбільш ефективних, але звичайно використовується тільки для стаціонарних процесів. На практиці виникає потреба визначати навантаження при нестационарних або перехідних режимах, які в багатьох випадках є нормальними режимами роботи важких машин, в тому числі з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Причому нестационарний динамічний процес по суті є інтегральним, в якому на основний рух механізму як системи твердих тіл („повільний” процес) накладається ефект ряду вібраційних складових („швидкий” рух), які породжені пружністю ланок машини, та активізуються і зникають лише при певних умовах. В такі моменти має сенс вираз: „резонансний (усталений) рух системи на нестационарному режимі”. Виникає потреба у визначенні в таких випадках спектрального складу „швидких” складових, тобто практичне визначення „миттєвого”