

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Проскуряков Н.Е.* Пути повышения эффективности магнитно-импульсной штамповки грубчатых заготовок // Исслед в обл. теории, технол. и оборуд. штамп. пр-ва. - Тула: ТулГУ, 1998. - С. 32-37.
2. *Власов А.В., Курдюк С.А., Шмелев Е.Н.* Использование программного комплекса PRADIS для моделирования технологических комплексов обработки давлением // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всероссийской юбилейной научно-технической конференции "100-летие со дня рождения профессора А.И. Зимины". - М.: 1995. - С. 31-38.
3. *Магнитно-импульсная штамповка полых цилиндрических заготовок / А.К. Талалаев, С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь, Н.Е. Проскуряков и др.; Под ред. А.К. Талалаева, С.П. Яковлева.* - Тула: Репривикс Лтд, 1998. - 238 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРОВОДНИКА В СКИН-СЛОЕ ИНДУКТОРА МИОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Райченко А.И.

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев;

Чемерис В.Т.

Министерство Украины по делам науки и технологий, Киев

В индукторных системах для магнитно-импульсной обработки металлических изделий (МИОМ) амплитуда индукции магнитного поля во многих случаях достигает 40-50 Тл. Такой режим работы предъявляет повышенные требования к прочности индуктора и стойкости его проводника и изоляции к высоким периодическим нагрузкам, обусловленным действием электромагнитного поля. Опыт организаций, применявших технологии МИОМ в серийном производстве изделий, указывает на то, что срок службы индуктора определяется не столько свойствами изоляции, сколько ограниченной стойкостью проводника в условиях импульсно-периодического нагружения, которое имеет комплексный характер: одновременно с электродинамическими силами, вызывающими деформации проводника, в проводнике имеют место локальные перегревы, обусловленные неоднородностью в распределении плотности тока по его сечению. В этой связи важным является вопрос о

возможных механизмах разрушения проводника. В зависимости от условий применения индуктора и выбора материала проводника возможны различные механизмы разрушения, начиная от локального оплавления или даже испарения и заканчивая макроскопическим ростом начального дефекта и перегоранием проводника под действием импульсного тока. В ряду возможных механизмов мы рассмотрим хрупкое термическое разрушение (или растрескивание) проводника в скин-слое, вызванное резким нагреванием материала импульсным током.

Если процессы испарения поверхностного слоя проводника при интенсивном поглощении электромагнитной энергии были проанализированы во многих работах (например, [1]), то явления возникновения термических напряжений и деструкции материала в связи с неравномерным нагревом требуют своего исследования. При протекании мощных импульсов тока в проводнике вероятными могут быть явления, характерные для хрупких материалов, поскольку пластическая деформация в материалах, даже вязких и пластичных в обычных условиях, здесь не успевает произойти.

Можно полагать, что хрупкое разрушение проводника в скин-слое должно происходить при достижении определенного критического значения некоторой комбинацией компонент тензора напряжений. В качестве такой величины принимается критерий Мизеса. Необходимо вычислить второй инвариант тензора напряжений [2]:

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + \sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2$$

и сравнить его с предельной критической прочностью материала на сдвиг σ_c . Локальное разрушение должно происходить при

$$J_2 \geq \sigma_c / 3.$$

Определим локальные напряжения возникающие в материале проводника за счет теплового расширения материала под действием импульсного тока, в дополнение к обычному распределению электро-динамических усилий, обуславливающих растяжение витков по диаметру и осевое сжатие индуктора.

Компоненты тензора напряжений могут быть выражены через компоненты тензора деформаций [3], возникающих вследствие теп-

лового действия тока, которые, в свою очередь, выражаются через компоненты вектора перемещений. Задача состоит в том, чтобы по величине градиента температуры по толщине теплового слоя

$$|\text{grad}T| \cong \Delta T / \sqrt{at},$$

где ΔT - повышение температуры на поверхности проводника за время действия импульса t , a - температуропроводность, вычислить перемещения, как это сделано в работе [4], и перейти к компонентам тензора деформаций и далее к напряжениям.

Для выяснения основных количественных соотношений, характеризующих быстрый нагрев, целесообразно воспользоваться геометрически упрощенной моделью, в которой принять, что мы имеем развертку обмотки индуктора в прямоугольной системе координат и что скин-слой лежит на поверхности полубесконечной среды, имеющей модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ , причем эти параметры не зависят от температуры. Таким образом, в нашей модели область быстрого нагрева локализована в пределах плоской зоны с размерами $2a \times 2b$, которая соответствует внутренней поверхности индуктора, если полагать, что $2a$ - это ширина проводника индуктора, $2b$ - полная длина проводника.

Величина повышения температуры на поверхности проводника может быть оценена на основании соотношения [1]:

$$\Delta T = \frac{1}{c_v \sigma} \int_0^t \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} \right]_{z=0} dt,$$

где c_v и σ - теплоемкость единицы объема проводника и его электропроводность, соответственно, H_x - напряженность магнитного поля, которое здесь считается параллельным поверхности проводника ($z = 0$). В результате интегрирования по всем точкам рассматриваемой области ($-a < x < a$, $-b < y < b$, ось z направлена вглубь проводника по нормали к его поверхности) получаем выражения для компонент вектора перемещений:

$$u_x = \frac{\Delta T}{a \cdot t} \cdot \frac{\alpha(1+\mu)}{6\pi(1-2\mu)} \cdot \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta \left\{ \frac{(x-\xi)^2}{R^{3/2}} - \frac{(1-2\mu)(x-\xi)}{z \cdot R^{1/2} + R} \right\};$$

$$u_y = \frac{\Delta T}{a \cdot t} \cdot \frac{\alpha(1+\mu)}{6\pi(1-2\mu)} \cdot \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta \left\{ \frac{(y-\eta)^2}{R^{3/2}} - \frac{(1-2\mu)(y-\eta)}{z \cdot R^{1/2} + R} \right\};$$

$$u_z = \frac{\Delta T}{a \cdot t} \cdot \frac{\alpha(1+\mu)}{6\pi(1-2\mu)} \cdot \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta \left\{ \frac{2(1-\mu)}{R^{1/2}} + \frac{z^2}{R^{3/2}} \right\},$$

где обозначено $R = [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2]$.

Используя соотношения между компонентами вектора перемещений и компонентами тензора деформаций, получаем для последних выражения:

$$u_{xx} = A \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta \left\{ \frac{z}{r^3} - 3 \frac{(x-\xi)^2 z}{r^5} - (1-2\mu) \frac{r[r^2 - 2(x-\xi)^2] + z[r^2 - (x-\xi)^2]}{r^3(r+z)^2} \right\},$$

$$u_{yy} = A \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta \left\{ \frac{z}{r^3} - 3 \frac{(y-\eta)^2 z}{r^5} - (1-2\mu) \frac{r[r^2 - 2(y-\eta)^2] + z[r^2 - (y-\eta)^2]}{r^3(r+z)^2} \right\},$$

$$u_{zz} = A \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta \left(2\mu \frac{z}{r^3} - 3 \frac{z^3}{r^5} \right), \quad A = \frac{\Delta T}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \frac{\alpha(1+\mu)}{6\pi(1-2\mu)}$$

и далее:

$$u_{xy} = A \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta (x-\xi)(y-\eta) \left\{ -3 \frac{z}{r^5} + (1-2\mu) \frac{2r+z}{r^3(r+z)^2} \right\};$$

$$u_{yz} = A \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta (y-\eta) \left\{ \frac{3-2\mu}{2r^2} + (1-2\mu) \left[\frac{1}{2r(r+z)^2} + \frac{z}{r^2(r+z)^2} + \frac{z^2}{2r^3(r+z)^2} \right] \right\};$$

$$u_{zx} = A \int_{-a}^a d\xi \int_{-b}^b d\eta (x-\xi) \left\{ \frac{3-2\mu}{2r^3} + (1-2\mu) \left[\frac{1}{2r(r+z)^2} + \frac{z}{r^2(r+z)^2} + \frac{z^2}{r^2(r+z)^2} \right] \right\}$$

В этих выражениях используется обозначение

$$r = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2]^{1/2} = \sqrt{R}.$$

С помощью полученных выражений может быть построен вычислительный алгоритм для нахождения условий разрушения, обусловленного быстрым появлением скачка температуры на поверхности токового слоя вследствие его разогрева джоулевым теплом, выделяющимся в результате протекания импульсного тока. Очевидно, что выяснение предельных условий для появления начальной стадии разрушения проводника в виде термического растрескивания поверхностного слоя может помочь в предупреждении дальнейшего более значительного разрушения проводника током по причине усиления локального разогрева возле начальных трещин - явления, способного нарастать лавинообразно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. - М.: Мир, 1972. - 392с.
2. B.Paul. Macroscopic criterions of plastic flowing and brittle destructure. -In: *Fracture. An advanced treatise. Vol.II. Mathematical fundamentals.*- Academic Press, New York and London, 1968, pp.336-520.
3. Л.Д.Ландау, Е.М Лифшиц. Теория упругости. - М.: Наука, 1965. - 203с.
4. A.I.Raitchenko, V T.Chemerys. Theory of material destruction in the result of thermoelastic stresses under the local pulsed electromagnetic affect. - Proceedings of the 11th IEEE Pulsed Power Conference, Baltimore, USA, 1997, pp1122-1127