Аврелькин Владимир Александрович
д-р техн. наук, профессор
Петров Михаил Васильевич
д-р техн. наук, профессор
Тихонов Николай Федорович
доцент
ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»
г. Чебоксары, Республика Чувашия

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

***Аннотация**: в данной статье рассматривается вопрос магнитно-импульсной обработки деталей машин и оборудования. Создавая различные геометрические зазоры между индуктором и заготовкой можно деформировать заготовку типа оболочки вращения с криволинейной образующей для получения изделия с наперед заданными размерами и формой.*

***Ключевые слова**: магнитно-импульсная обработка, детали машин, оборудование.*

Метод магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ), имеет ряд достоинств перед другими электрофизическими методами. Основными элементами МИОМ являются магнитно-импульсная установка (МИУ), индуктор, заготовка. Эквивалентная схема замещения системы МИУ – индуктор-заготовка.

Так, магнитно-импульсные процессы формоизменения заготовок описываются уравнениями электродинамики и динамическими уравнениями механики деформируемого твердого тела. Электрический ток, который наводиться в заготовке разобьем на элементарные нити тока, деля заготовку вдоль образующей на кольцевых контурах. Электромагнитное поле квазистационарное, цепи линейные, материалы заготовки и индуктора не магнитные, диэлектрическая и магнитная проницаемость среды постоянны.

Для *i*-го контура с емкостью в цепи квазистационарного тока закон сохранения энергии выражается уравнением [1,2]:

$$E_i I_i = R_i I_i^2 + \frac{e_i I_i}{C_i} + \frac{d}{dt}F_{ii} + \sum_{i=1:i\neq j}^{n} \frac{d}{dt}F_{ij} \qquad (1)$$

где E_i – электродвижущая сила; e_i – заряды на обкладках конденсатора; I_i – электрический ток; R_i – омическое сопротивление контура; C_i – емкость; F_{ii} – собственная свободная энергия токов; F_{ij} – энергия взаимодействия токов; t – время.

В выражении (1) в силу линейности уравнения поля магнитное поле представлено в виде суммы полей, которые создавались бы каждым током в отдельности, если бы в остальных проводниках токи отсутствовали.

Для линейных проводников имеем

$$F_{ii} = \tfrac{1}{2}\mu \oint_{l_i}\oint_{l_i} \frac{dl_i dl_i}{d} I_i^2; \quad F_{ij} = \mu \oint_{l_i}\oint_{l_i} \frac{dl_i dl_j}{d} I_i I_j \qquad (2)$$

где dl – элемент длины; d – расстояние между контурами; μ – магнитная проницаемость среды.

В формулах (2):

$$L_i = \mu \oint_{l_i}\oint_{l_i} \frac{dl_i dl_i}{d}; \quad M_{ij} = \mu \oint_{l_i}\oint_{l_j} \frac{dl_i dl_j}{d} \qquad (3)$$

где L_i – коэффициент самоиндукции; M_{ij} – коэффициент взаимной индукции контуров.

Пондеромоторная сила взаимодействия между индуктором и *i*-м элементом заготовки определяется как производная энергии магнитного поля по направлению движения заготовки:

$$P_i = \frac{1}{2} I_i^2 \frac{dL_i}{d\xi_i} + I_u I_i \frac{dM_{ui}}{d\xi_i} \qquad (4)$$

Для описания деформации заготовки примем общую цилиндрическую систему координат (*r*, β, *z*) и местную систему *(s,* β, ξ*)*, связанную с деформированной срединной поверхностью. *r* – координаты срединной поверхности заготовки в общем базисе, z – ось вращения, s – длина дуги меридиана, β – азимут, ξ – расстояние точки от срединной поверхности.

Геометрическая нелинейность учитывается пошаговой перестройкой геометрии и толщины заготовки.

Текущая геометрия заготовки вычисляется следующим образом:

$$r = r^* + U_r;\ z = z^* + U_z;\ ds = \left[(dr)^2 + (dz)^2\right]^{1/2}, \tag{5}$$

где $r^* = r^*(s),\ z^* = z^*(s)$ – начальная геометрия;

$U_r = U_r(s,t), U_z = U_z(s,t)$ – компоненты вектора перемещений;

$h = h(s,t)$ - толщина стенки заготовки.

Зададим распределение скоростей перемещений по толщине заготовки в виде:

$$\dot{U}_s(s,\xi,t) = \dot{U}_s(s,t) + \xi \dot{U}_\varphi(s,t);\ \dot{U}_\xi(s,\xi,t) = \dot{U}_\xi(s,t),$$

где $\dot{U}_s(s,t), \dot{U}_\xi(s,t)$ – скорости перемещения срединной поверхности в направлении касательной и нормали;

$\dot{U}_\varphi(s,t)$ – угловая скорость поворота поперечного сечения.

Полные деформации $\varepsilon_{ij}(i, j = 1,2,3)$ определяются интегрированием скоростей деформаций по времени, что дает в результате логарифмические деформации.

Законом Гука компоненты напряжений σ_{ij} связаны с упругими деформациями. Пластические деформации определяются вариантом теории течения с линейным кинематическим упрочнением.

Вариационное уравнение движения заготовки в предположении произвольности вариаций $\delta\dot{U}_r, \delta\dot{U}_z, \delta\dot{U}_\varphi$ приводится к системе трех уравнений:

$$\begin{cases} \int\limits_0^L \left[(N_1\psi_r - Q\psi_z)\delta\dot{U}_{z,s} + (M_p\ddot{U}_z - q_z)\delta\dot{U}_z \right] rdS - (rP_z\delta\dot{U}_z)_{s=0,L} = 0 \\ \int\limits_0^L \left[\left(N_1\psi_z - Q\psi_r\right)\delta\dot{U}_{r,s} + \left(N_2 r^{-1} + M_p\ddot{U}_r - q_r \right)\delta\dot{U}_r \right] rdS - \left(rP_r\delta\dot{U}_r \right)_{s=0,L} = 0 \\ \int\limits_0^L \left[M_1\delta\dot{U}_{\varphi,s} + \left(M_2 r^{-1}\psi_z + Q + I_p\ddot{U}_\varphi \right)\delta\dot{U}_\varphi \right] rdS - \left(rM^0\delta\dot{U}_\varphi \right)_{s=0,L} = 0, \end{cases} \tag{6}$$

где N_1, N_2, Q, M_1, M_2 – соответственно мембранные усилия, перерезывающая сила и изгибающие моменты определяются интегралами по толщине от соответствующих компонент напряжений; $q_r=q_r(s,t)$, $q_z=q_z(s,t)$ – компоненты электромагнитного давления в общем координатном базисе; $P_r=P_r(t)$; $P_z=P_z(t)$, $M^0=M^0(t)$ – статические граничные условия на контурных сечениях заготовки, L – длина заготовки; $M_p = \int_{-h/2}^{h/2} \rho d\xi = \rho h$; $J_p = \int_{-h/2}^{h/2} \rho \xi^2 d\xi = \rho \frac{h^3}{12}$ – масса и момент инерции. Запятая в нижнем индексе означает дифференцирование по пространственной координате.

Начальные условия для ненапряженной в исходном состоянии заготовки записываются в виде $U_\alpha(s,0) = U_\alpha^0(s)$; $\dot{U}_\alpha(s,0) = \dot{U}_\alpha(s)$; $\alpha = r, z, \varphi.$

Граничные условия на торцах заготовки (s=0,L) принимаются: либо заделка $\dot{U}_r = \dot{U}_z = \dot{U}_\varphi = 0$, либо свободный край $M^0 = P_r = P_z = 0.$

Процесс формоизменения заготовки решается численно. По пространственной координате дискретизация производится в соответствии с введенным ранее разбиением заготовки на T_1 кольцевых элементов длиной ΔS_i. Толщина делится на ряд слоев $\Delta h=h/T_2$. Таким образом имеем основную сетку из $(T_1 +1)(T_2+1)$ узлов. Вводится еще промежуточная сетка, смещенная на половину шага ΔS_i по отношению к основной. Тензоры скоростей деформаций, напряжений, полных и пластических деформаций, моменты, внутренние усилия подсчитываются в узлах промежуточной сетки, перемещения и скорости перемещений вычисляются в узлах основной разностной сетки. Дискретизация по времени производится по явной схеме «крест».

В результате аппроксимации (6) со вторым порядком точности с помощью разностных операторов получается система уравнений для определения перемещений и толщины стенки заготовки на t^{k+1} момент времени:

$$\begin{cases} \left(\dot{U}_\alpha\right)_n^{k+\frac{1}{2}} = \left(\dot{U}_\alpha\right)_n^{k-\frac{1}{2}} + \left[\Phi_\alpha + q_\beta(r\Delta S)\right]_n^k \dfrac{\Delta t^{k+1} + \Delta t^k}{2(\Phi_M)_n^k} \\ (U_\alpha)_n^{k+1} = (U_\alpha)_n^k + \left(\dot{U}_\alpha\right)_n^{k+\frac{1}{2}} \Delta t^{k+1}; \ \alpha = r, z, \varphi; \ \beta = r, z; \\ h_i^{k+1} = h_i^k \left[1 + \left(\dot{\varepsilon}^0_{\xi\xi}\right)^{k+\frac{1}{2}} \Delta t^{k+1}\right], \end{cases} \tag{7}$$

где φ_α, $\varphi_м$ – обобщенные силы и массы; n – номер узла основной сетки; $(r, \Delta S)$- грузовая площадь n-ого узла; $\Delta t^{k+1} = t^{k+1} - t^k$ – временной шаг.

В исходном состоянии при $t = 0,\ \dot{U}_r = \dot{U}_z = \dot{U}_\varphi = 0$ во всех узлах основной сетки, напряжения и деформации равны нулю.

Для решения системы уравнений (4) использована следующая разностная схема:

$$\begin{cases} (L_u + L_0)\dot{I}_u + \sum\limits_{j=1}^{T_1-1} M_{uj}\dot{I}_j = B_0, \\ M_{ui}\dot{I}_i + L_i\dot{I}_i + \sum\limits_{j=1, i\neq j}^{T_1-1} M_{ij}\dot{I}_j = B_i, \ (i = 1, 2 \ldots T_1), \end{cases} \tag{8}$$

При решении системы (8) параметры МИУ L_0, R_0, C_0, V_0 считаются заданными. Индуктивности L_i, взаимоиндуктивности $M_{ij}, M_{uj}, \dot{L}_i, \dot{M}_{ij}, \dot{M}_{ui}$, токи I_u, I_i берутся с нижнего временного слоя $t = t^k$. На каждом шаге по времени осуществляется решение системы (8) относительно скоростей токов, I_u, I_i значения полных токов на новом временном слое $t = t^{k+1}$ определяются:

$$I_u = I_u + \dot{I}_u \Delta t,\ I_i = I_i + \dot{I}_i \Delta t,\ (i = 1, 2, 3 \ldots T_1).$$

Обобщенные силы в заготовке складываются с пондеромоторными и по формуле (9) определяются скорости движения заготовки, полные деформации, напряжения. На шаге новая геометрия заготовки вычисляется по (5) и расчет повторяется для следующего временного слоя.

Вывод. Создавая различные геометрические зазоры между индуктором и заготовкой можно деформировать заготовку типа оболочки вращения с криволинейной образующей для получения изделия с наперед заданными размерами и формой.

Список литературы

1. Калантаров П.А. Теоретические основы электротехники / П.А. Калантаров, Л.Р. Нейман. – М.: Госэнергоиздат, 1951. – Т.3. – 464 с.

2. Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред / М.: Наука, 1982. – 625 с.