

ЗАГАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТІЛ

Лавінський Д.В., Морачковський О.К.

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Розрахункове оцінювання конструкційної міцності електропровідних тіл базується на аналізі пружно-пластичного деформування, який спирається на попередній аналіз розподілу електромагнітного поля. Розподіл векторних компонент ЕМП у і електропровідному тілі описується системою фундаментальних рівнянь Максвелла, які доповнюються матеріальними залежностями та граничними умовами:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}; \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0; \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0; \vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c [\dot{\vec{u}} \times \vec{B}]; \quad (1)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_c \vec{E}; \vec{B} = \mu_c \vec{H}; \vec{E}_\Gamma \times \vec{n} = 0; \vec{D}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0; \vec{H}_\Gamma \times \vec{n} = 0; \vec{B}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0, \quad (2)$$

де $\vec{H}, \vec{E}, \vec{H}_\Gamma, \vec{E}_\Gamma$ – вектори напруженості магнітного та електричного полів у об’ємі тіла та на границі (Γ) тіла; $\vec{D}, \vec{B}, \vec{D}_\Gamma, \vec{B}_\Gamma$ – вектори електричної та магнітної індукції у об’ємі тіла та на границі (Γ) тіла; $\varepsilon_c, \mu_c, \gamma$ – електрична та магнітна проникність, та електрична провідність матеріалу; \vec{j} – вектор густини сили струму; \vec{n} – вектор нормалі до границі тіла. Розподіл компонент тензорів напружень $\vec{\sigma}$ та деформацій $\vec{\varepsilon}$, а також вектора переміщень \vec{u} піддається системі рівнянь, яка містить диференційні рівняння рівноваги, геометричні залежності, матеріальні залежності стану та граничні умови:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} + \rho \vec{f} = 0; \vec{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T]; \vec{\varepsilon} = {}^{(4)}\vec{S} \cdot \vec{\sigma}; \vec{\sigma}_n = \vec{p} + \frac{\Xi}{2} \vec{E}_\Gamma + \frac{\mu_c}{2} (\Xi \dot{\vec{u}} \times \vec{n} + \vec{i}) \times \vec{H}_\Gamma,$$

де ρ – густина матеріалу; \vec{f} – вектор інтенсивності об’ємних сил (у випадку врахування електромагнітних сил $\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$); ${}^{(4)}\vec{S}$ – тензор відповідності 4-го рангу, який у випадку пружного деформування має вигляд відповідно до лінійного закону Гука; \vec{p} – поверхневе навантаження; Ξ, \vec{i} – густина поверхневих зарядів та струмів. При розгляді пружно-пластичного деформування поведінка матеріалу розглядається у інкрементальній формі (3) разом із умовою пластичності (4):

$$d\vec{\varepsilon} = \frac{1+\nu}{E} \left(d\vec{\sigma} - \frac{3\nu}{1+\nu} d\vec{\sigma}_0 \vec{I} \right) + \frac{3}{2} d\varepsilon_i^p \frac{\vec{s} - \vec{\beta}}{\sigma_i}; \quad \beta = \frac{2}{3} \frac{EE_h}{E - E_h} \bar{\varepsilon}^p; \quad (3)$$

$$\sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}((\vec{s} - \vec{\beta})^2)} - \sigma_T = 0, \quad (4)$$

де σ_i – інтенсивність напружень; \vec{I} – одиничний тензор; $\vec{\sigma}_0$ – кульовий тензор напружень; \vec{s} – девіатор напружень; $\bar{\varepsilon}^p$ – тензор деформацій пластичності; ε_i^p – інтенсивність пластичних деформацій; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; σ_T – межа текучості; E_h – модуль зміцнення.