

### Резистивный метод неразрушающего определения остаточных напряжений

Резистивный электроконтактный метод неразрушающего контроля остаточных напряжений основан на корреляции между интегральными электрическими и механическими характеристиками металлов и сплавов – удельной электрической проводимостью или удельным электрическим сопротивлением в  $h$ -слое металла и деформирующей способностью остаточных напряжений, связанной с изменением кристаллической решетки при деформации.

Существует взаимосвязь между удельной электрической проводимостью и механическими напряжениями, она определяется формулой:

$$\gamma = \frac{e^2 E n_0}{mkTV_T N_0 \pi} \cdot d, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона, Кл;  $m$  – масса покоя электрона, кг;  $n_0$  – число электронов проводимости в единице объема;  $E$  – напряженность поля, В/м;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, К;  $V_T$  – скорость теплового движения электронов, м/с;  $N_0$  – число атомов в единице объема;  $d$  – период кристаллической решетки, м. Известна связь удельной электрической проводимости  $\gamma$  с удельным электрическим сопротивлением  $\rho = 1/\gamma$ .

При отсутствии механических напряжений металл имеет номинальное значение периода решетки  $d_0$  и соответствующее номинальное значение удельной электрической проводимости  $\gamma_0$ . Под действием изменения механических напряжений  $\Delta\sigma$  имеет место изменение периода решетки металла  $\Delta d$ . В зоне упругих деформаций это изменение можно считать пропорциональным механическому напряжению. В соответствии с (1) изменение электропроводности  $\Delta\gamma$  также пропорционально средним механическим напряжениям  $\Delta\sigma$  по формуле:

$$\Delta\gamma = K_\sigma \Delta\sigma, \quad (2)$$

где  $K_\sigma$  – экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий свойства материала.

Таким образом, измеряя электрические свойства проводящих изделий, можно определять механические напряжения в них. При этом необходимо измерять распределение электрических параметров в механических напряжениях по глубине изделий. Для измерения распределения удельного сопротивления по глубине используется явление скин-эффекта, при котором ток высокой частоты сосредотачивается у поверхности проводника, которая является ближайшей к источникам поля, вызывающим появление токов. На основании решения системы уравнений Максвелла для проводящего полупространства глубина проникновения тока  $h$  в таком проводнике определяется выражением:

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота тока, Гц;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала, Гн/м;  $\gamma$  – удельная электропроводность материала, Ом<sup>-1</sup>. Величина плотности тока как экспоненциально уменьшается с увеличением глубины, а  $h$  представляет значение глубины (3), на которой плотность тока падает в "e" раз по сравнению с исходным значением тока на поверхности.

Использование явления скин-эффекта позволяет послойно исследовать поверхностный слой изделия путем подачи в него тока различной частоты и измерения сигнала отклика, параметры которого связаны с изменением напряженного состояния материала изделия. Уменьшая соответственно формулой (3) частоту посылаемого в изделие переменного тока, увеличивается глубина исследуемого слоя. Выбор рабочих частот обеспечивает требуемый диапазон глубин изделия.