

С. Д. ВАСИЛЬКОВ, С. А. ТАЛЬНИШНИХ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ РЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ**

Исследована связь механических и электрических характеристик с целью определения остаточных напряжений в металлах при различных видах механической обработки. Измерения проводились неразрушающим резистивным электроконтактным методом, а также разрушающим методом травления. Показана возможность определения остаточных напряжений в образцах при использовании различных технологий обработки их поверхности с помощью удельного электросопротивления.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, механическая обработка, качество поверхностного слоя, неразрушающий контроль.

Существует связь между значением удельной электрической проводимости и величиной механических напряжений [1] металла, воздействию которых он подвергается.

При отсутствии механических напряжений в металле значение периода кристаллической решетки соответствует номинальному значению удельной электрической проводимости  $\gamma_0$ . Под действием механических напряжений  $\Delta\sigma$  может происходить изменение геометрии кристаллической решетки металла. В зоне упругих деформаций такое изменение считается пропорциональным механическому напряжению, а изменения электропроводности  $\Delta\gamma$  — также пропорциональными механическим напряжениям  $\Delta\sigma$ :

$$\Delta\gamma = K_\sigma \Delta\sigma, \quad (1)$$

где  $K_\sigma$  — экспериментально получаемый коэффициент пропорциональности, который характеризует свойства металла.

Таким образом, измеряя электрические свойства металла, можно определять механические напряжения в нем.

Для определения удельного сопротивления материала по глубине используется явление скин-эффекта [2], при котором глубина проникновения тока составляет

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}, \quad (2)$$

где  $\pi = 3,1415$ ;  $f$  — частота тока;  $\mu$  — магнитная проницаемость материала;  $\gamma$  — его удельная электропроводность.

На глубине  $h$  значение плотности тока падает в  $e = 2,71$  раз относительно значения на поверхности. Явление скин-эффекта позволяет послойно исследовать проводящее изделие путем подачи в него электрического тока различной частоты и измерения откликов сигнала, параметры которого связаны с изменением напряженно-деформированного состояния изделия.

Рассмотрим процессы, происходящие в поверхностном слое металла. Через участок плоского проводника протекает ток  $I$  от какого-либо внешнего устройства. Сопротивление  $R$  такого проводника при постоянном токе выражается формулой

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала проводника,  $l$  и  $S$  — соответственно длина проводника и площадь его сечения;  $S = bh$ ,  $b$  — ширина проводника. Сопротивление проводника  $R = U/I$ , где  $U$  — падение напряжения на нем. Измерив  $U$  и  $I$  и определив значение  $R$ , при известных размерах  $l$ ,  $b$  и  $h$  можно вычислить значение  $\rho$ .

Введем понятие эффективного удельного электрического сопротивления (ЭУС) изделия

$$\rho_{\text{э}} = \rho \frac{l}{b}. \quad (3)$$

Значение ЭУС зависит от частоты тока и материала изделия, его можно измерять при разных частотах  $f_i$  ( $i=1-9$ ) так же, как и при постоянном токе:

$$\rho_{\text{э}i} = \frac{U_i h_i}{I_i}. \quad (4)$$

Вычислив распределение  $\rho_{\text{э}}$  по глубине изделия, получим информацию как об изменении удельного сопротивления  $\rho$  поверхностного слоя изделия, зависящего от изменений механических напряжений  $\sigma$  по его глубине, так и об изменении сечения проводника. Изменение значений  $\rho_{\text{э}}$  связано с изменением сечения проводника, а изменение  $\Delta\rho_{\text{э}}$  связано с механическими напряжениями. При этом значения  $\Delta\rho_{\text{э}}$  примерно на 1—2 порядка ниже, чем  $\rho_{\text{э}}$ .

Требуется получить калибровочную зависимость между ЭУС и механическими напряжениями материала исследуемого изделия на глубинах, соответствующих заданным частотам. Для этого можно применить разрушающий метод Давиденкова—Биргера [3], в соответствии с которым для образцов из материала исследуемого изделия строится распределение механических напряжений по глубинам (эпюра напряжений), соответствующим частотам электрических измерений. В результате получим калибровочный график между ЭУС и механическими напряжениями в материале изделия. При последующих исследованиях изделий из того же материала полученная зависимость используется для преобразования данных электрических измерений в эпюру механических напряжений.

На рис. 1 приведен типичный график зависимости  $\rho_{\text{э}}$  от частоты для образца из сплава ЭП-866. В соответствии с зависимостью (2) между частотой и глубиной проникновения тока в проводник эта же кривая является графиком распределения ЭУС по глубине. Полученные данные были использованы для построения зависимости изменений ЭУС  $\Delta\rho_{\text{э}} = \rho_{\text{э}} - \rho_{\text{э}0}$  ( $\rho_{\text{э}0}$  — номинальное значение ЭУС), приведенной на рис. 2, где также показаны аналогичные зависимости  $\Delta\rho_{\text{э}}$  для различных технологий обработки поверхности образцов из того же сплава (образец А: 1 — с полированной поверхностью; 2 — с нагартованной поверхностью; образец Б: 3 — с нагартованной поверхностью; 4 — с поверхностью после штамповки), а также кривая 5 — для нагруженной балки из этого сплава с напряжением  $\sigma = 200$  МПа.

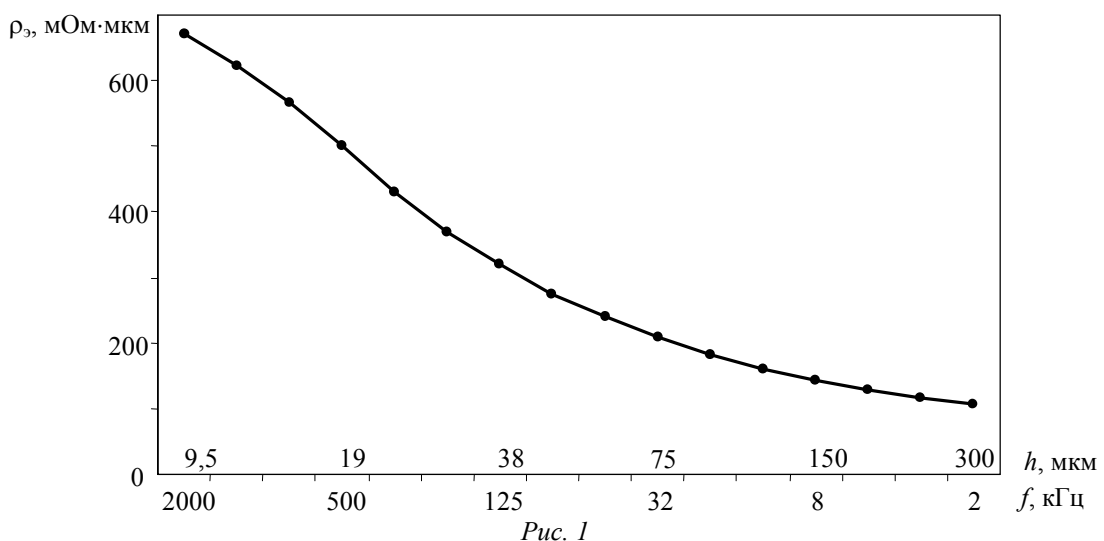


Рис. 1

Измерения на балке с известной степенью ее нагружения показали масштаб значений остаточных напряжений в образцах, подвергнутых разным видам обработки поверхности. Вид кривых  $\Delta\rho_{\text{э}}$  для образцов обработки поверхностей (полировка, нагартовка и штамповка на двух гранях плоских образцов А и Б) хорошо соответствует принятым представлениям о

механических напряжениях, создаваемых при использовании этих технологий. При этом снижение значения  $\Delta\rho_3$  указывает на наличие напряжений растяжений ( $\sigma^+$ ), а повышение — на наличие напряжений сжатия ( $\sigma^-$ ).

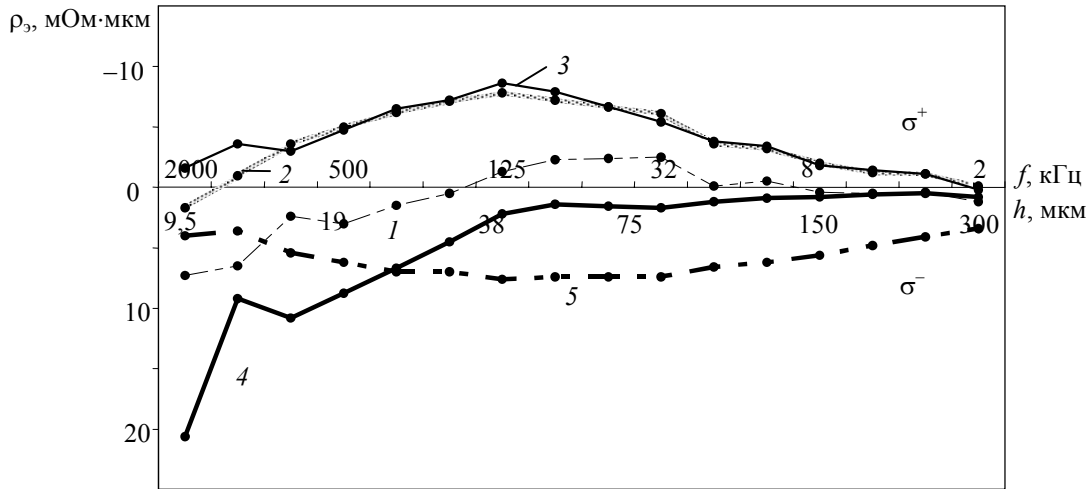
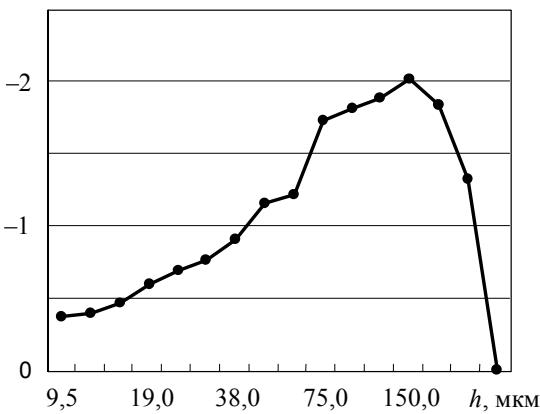


Рис. 2

На рис. 3 приведен пример поэтапной работы устройства для определения механических напряжений в турбинной лопатке: *а* — кривая калибровочных коэффициентов  $K_i^\sigma$ ; *б* — вычисленная эпюра остаточных напряжений  $\sigma(h)$ , полученная вышеописанным способом, точки — результат разрушающего контроля. Сравнимые результаты хорошо коррелируют друг с другом. Данные по предлагаемому способу получены примерно за 10 минут, а разрушающий метод требует около 4 часов работы [4].

а)

 $K_i^\sigma$ , МПа/МОм·мкм

б)

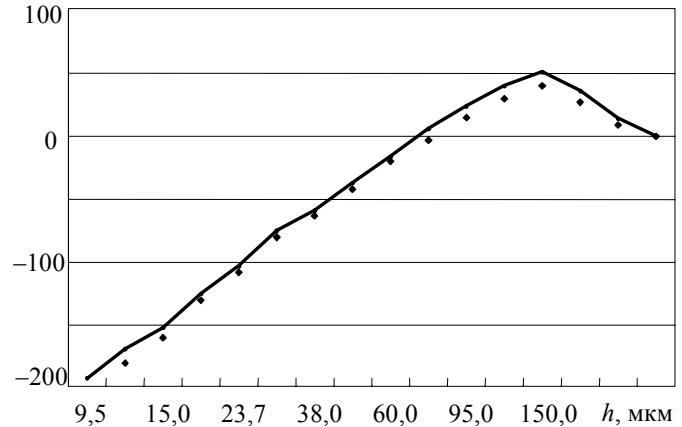
 $\sigma_i$ , МПа

Рис. 3

Таким образом, показана возможность определения остаточных напряжений с помощью измерения ЭУС, что подтверждается проведенными экспериментами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берестецкий В. Б., Лившиц Е. М., Пятаевский Л. П. Квантовая электродинамика // Теоретическая физика. М.: Наука, 1989. Т. 4.
2. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., 1976. С. 408—415.
3. Мрочек Ж. А., Макаревич С. С., Кожуро Л. М. и др. Остаточные напряжения: Учеб. пособие. Минск: УП „Технопринт“, 2003.

4. Васильков Д. В., Васильков С. Д., Иванов С. Ю. Новые подходы к оценке остаточного ресурса изделий по напряженному состоянию неразрушающим методом АФЧХ-тестирования // Физика, химия и механика трибосистем: Межвуз. сб. науч. тр. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2006. Вып. 5. С. 23—25.

***Сведения об авторах***

- Сергей Дмитриевич Васильков*** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; старший преподаватель; E-mail: vasilkovsd@mail.ru
- Сергей Андреевич Тальнишних*** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: miculi@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.