

## Применение резистивного электроконтактного метода для мониторинга состояния стальных конструкций

*Заведующий учебной лабораторией А.В. Улыбин\*,  
ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Во многих странах строится и эксплуатируется множество зданий и сооружений с несущими строительными конструкциями, выполненными из стали. В связи с большим сроком эксплуатации существующих конструкций, а также большой неопределенностью совокупности факторов, влияющих на их работу, необходимо проводить мониторинг их состояния. Такая необходимость обосновывается также требованиями ФЗ РФ №384 от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», ГОСТ Р 53778-2010 «Правила обследования и мониторинга технического состояния» и других документов.

Одним из основных параметров, контроль которых производится при мониторинге технического состояния, являются эксплуатационные механические напряжения в элементах конструкций. Известные методы неразрушающего контроля напряженного состояния в ряде случаев не могут быть использованы достаточно полно, либо их использование затруднено, экономически нецелесообразно или неэффективно.

Для особо важных зданий и сооружений актуальным является разработка и применение альтернативных средств мониторинга, даже при удовлетворительной практике применения существующих средств контроля. Совокупное применение резистивного электроконтактного метода с другими традиционными методами контроля приведет к повышению безопасности строительных объектов и срока их эксплуатации.

Наибольший вклад в развитие методов неразрушающего контроля, применяемых на сегодняшний день для исследования напряженного состояния изделий и конструкций, внесли советские ученые Р.И. Янус, Л.Г. Меркулов, С.Т. Назаров, С.В. Румынцев, М.Н. Михеев, С.Я. Соколов и многие другие. Среди ученых-современников стоит отметить вклад В.В. Ключева, а также А.И. Потапова, В.Л. Венгриновича, А.А. Дубова, В.Е. Гордиенко, М.С. Бахарева, М.Г. Баширова и многих других.

Резистивный электроконтактный метод неразрушающего контроля разработан для оценки остаточных механических напряжений, сохраняющихся в металлических изделиях после их изготовления. основополагающие исследования данного метода произведены в конце XX века С.Ю. Ивановым, Д.В. Васильковым и В.Э. Хитриком. Исследованием метода в последние несколько лет, а также разработкой аппаратуры для его применения занимается С.Д. Васильков.

Метод основан на измерении электрического сопротивления на участке поверхностного слоя металла при подаче к нему переменного тока [1].

Если рассмотреть участок плоского проводника с протекающим по нему током  $I$  от какого-либо внешнего устройства, то сопротивление  $R$  такого проводника при постоянном токе выражается формулой:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{b \cdot h}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала;  $l$  – длина участка, по которому проходит ток;  $S=b \cdot h$  – площадь поперечного сечения проводника.

Изменение электрического сопротивления согласно зависимости (1) может быть обусловлено тремя эффектами.

1. Изменением удельного сопротивления материала ( $\rho$ ) при изменении его напряженного состояния. Данный эффект называется пьезорезистивным и используется в различных датчиках высокого давления. Одним из видов датчиков, работающих за счет пьезорезистивного эффекта, являются манганиновые датчики давления, коэффициент эластосопротивления которых достигает значений  $\Delta\rho/\rho=2.5 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$ . Влияние данного эффекта в обычных металлических проводниках, в том числе стальных, настолько мало, что им обычно пренебрегают.

2. Изменением длины проводника ( $l$ ) при его деформировании. Данный эффект используется в тензорезисторах. Датчики, основанные на данном эффекте, имеют коэффициент тензочувствительности, равный примерно 2. Это означает, что при напряжениях, соответствующих пределу упругости, например в стали марки Ст3, относительная деформация ( $\varepsilon$ ) составит около 0,1%, а изменение сопротивления – около 0,2% от абсолютного значения.

3. Известно, что при подаче к поверхности проводника переменного тока высокой частоты имеет место скин-эффект, при котором токи высокой частоты сосредотачиваются у той 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:

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

где  $f$  – частота тока, Гц;  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м;  $\gamma$  – удельная электропроводность материала, Ом<sup>-1</sup>.

Известно, что магнитная проницаемость материала является переменной величиной и, в том числе, зависит от напряженного состояния. На данном явлении основан ряд магнитных методов неразрушающего контроля напряжений, в частности в работах М.С.Бахарева [2] имеется зависимость:

$$\mu = \frac{\mu_n}{1 - \mu_n \lambda_0 \sigma / \pi}, \quad (3)$$

где  $\mu_n$  – начальная относительная проницаемость материала;

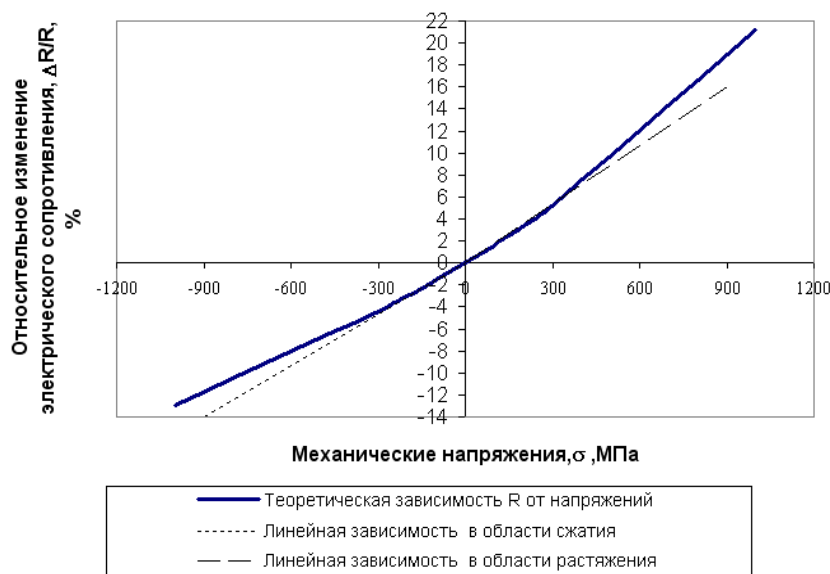
$\lambda_0$  – константа магнитострикции ферромагнетика;  $\sigma$  – одноосные напряжения растяжения–сжатия (при растяжении имеют положительную величину).

Если подставить зависимость (3) в зависимость (2), а зависимость (2) – в (1), то получим зависимость следующего вида:

$$R = \rho \cdot l \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_n}{(1 - \mu_n \lambda_0 \sigma / \pi) \rho}}, \quad (4)$$

С учетом магнитной постоянной ( $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м), константы магнитострикции стали ( $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>), того, что удельная электрическая проводимость  $\gamma = 1/\rho$  (для стали  $\rho = 140$  Ом·мм), приняв  $\mu_n = 200$ , пренебрегая незначительным изменением  $\rho$  и считая частоту тока постоянной, получим зависимость, представленную на рис. 1.

По результатам исследований М.Г. Баширова [3], после перехода стали в пластическую зону работы величина магнитной проницаемости уменьшается и, соответственно, зависимость ( $R$ - $\sigma$ ) должна измениться на обратно пропорциональную.



**Рисунок 1. Теоретическая зависимость электрического сопротивления от напряжений растяжения–сжатия**

При упругой работе конструкционных сталей в строительных конструкциях механические напряжения обычно не превышают значений  $\pm 300$  МПа. Поэтому для данного диапазона значений можно пренебречь нелинейностью зависимости в зонах от 0 до  $\sigma_T$  при растяжении и от 0 до  $\sigma_T$  при сжатии с погрешностью до 5% от величины напряжений. Для рассматриваемого примера (рис. 2) в диапазоне до  $\pm 300$  МПа,  $\pi_p = 1,7 \cdot 10^{-4}$  МПа<sup>-1</sup> при растяжении и  $\pi_c = 1,5 \cdot 10^{-4}$  МПа<sup>-1</sup> при сжатии.

Таким образом, выявленная зависимость изменения электрического сопротивления на переменном токе от механических напряжений, обусловленная изменением магнитной проницаемости стали, имеет чувствительность, в 7 раз превышающую пьезорезистивный эффект в марганине и в 17 раз чувствительность проводниковых тензорезисторов. Этот факт доказывает перспективность исследования данной зависимости ( $R-\sigma$ ) для применения в ходе мониторинга механических напряжений в строительных конструкциях при их упругой работе.

По результатам экспериментальных исследований [4, 5] показано, что зависимость от растягивающих и сжимающих напряжений, создаваемых как чистым растяжением, так и поперечным изгибом моделей, линейная и прямо пропорциональная. Коэффициент корреляции по результатам статистической обработки данных имеет значение для всех экспериментов в диапазоне 0,950-0,999.

Экспериментально полученная зависимость электрического сопротивления от механических напряжений имеет вид:

$$\eta = K_t \cdot \Delta t + \frac{K_\sigma \Delta \sigma}{R_0}, \quad (5)$$

где  $\eta = R/R_0$  – относительное изменение сопротивления, д.е.;

$K_t$  – температурный коэффициент сопротивления (экспериментальное значение  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );

$\Delta t$  – изменение температуры стали,  $^\circ\text{C}$ ;

$K_\sigma$  – экспериментальный коэффициент тензочувствительности, зависящий от марки стали и знака напряжений ( $0,1 \pm 0,02$  мкОм/МПа);

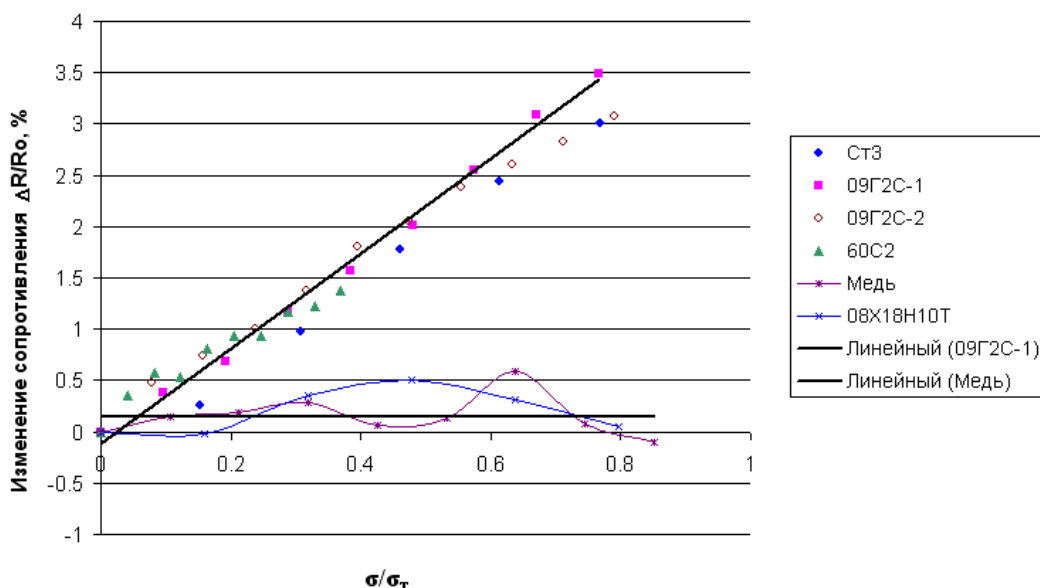
$\Delta \sigma$  – абсолютное изменение одноосных механических напряжений (при растяжении – положительное), МПа;

$R_0$  – величина сопротивления без дополнительных механических напряжений, мкОм.

Для определения изменения величины одноосных напряжений зависимость (5) преобразуется в следующий вид:

$$\Delta \sigma = \frac{(\eta - K_t \cdot \Delta t) R_0}{K_\sigma} \quad (6)$$

Установлено, что на немагнитных материалах зависимость отсутствует (рис. 2). Это подтверждает, что основным фактором, влияющим на изменение электрического сопротивления, является именно магнитная проницаемость материала.



**Рисунок 2. Влияние на зависимость сопротивления от механических напряжений вида металла**

Улыбин А.В. Применение резистивного электроконтактного метода для мониторинга состояния стальных конструкций

На основе результатов теоретико-экспериментальных исследований предложена технология мониторинга эксплуатационных механических напряжений в конструкциях с помощью резистивного электроконтактного метода.

Технология заключается в следующем:

- 1) выбор исследуемого участка конструкции, осуществляемый с помощью расчета компьютерной модели, применения других неразрушающих методов контроля напряжений, либо иным способом;
- 2) измерение абсолютного значения электрического сопротивления на выбранном участке конструкции до приложения/снятия нагрузок;
- 3) выполнение градуировки по отобранным образцам при их испытании на растяжение для уточнения коэффициента тензочувствительности;
- 4) повторное (очередное) измерение значения сопротивления в интересующий момент времени после изменения величины эксплуатационной нагрузки или по прошествии определенного времени;
- 5) определение приращения напряжений по выявленной зависимости (6) с учетом температурного коэффициента и уточненного коэффициента тензочувствительности.

### Литература

1. Васильков С.Д. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из никелевых сплавов после механической обработки. / Васильков С.Д., Анастасиади Г.П., Юрова Г.П. // Металлообработка. – 2008. – №5 (47). – С. 4-9.
2. Бахарев М.С. Разработка методов и средств измерения механических напряжений на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений: Автореферат. ... докт. тех. наук. – Тюмень, 2004. -321 с.
3. Баширов М.Г. Использование взаимосвязи электрофизических и механических свойств металлов в напряженно-деформированном состоянии в задачах прогнозирования ресурса оборудования нефтепереработки // Нефтегазовое дело. – 2002. – №1.
4. Улыбин А.В., Васильков С.Д. Использование резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния элементов стальных конструкций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – №6. – С. 155-160.
5. Улыбин А.В. Кукушкина Г.А. Особенности применения резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций // Инженерно-строительный журнал. -2010. – №3.– С. 32-34.

*\* Алексей Владимирович Улыбин, Санкт-Петербург  
Тел. раб.: +7(812)535-57-82; эл. почта: ulybin@mail.ru*