

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 ρ – 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 (ρ) 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 (ε) 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; μ – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м; γ – удельная электропроводность материала, Ом⁻¹.

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 μ_n – начальная относительная проницаемость материала;

λ_0 – константа магнитострикции ферромагнетика; σ – 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⁻¹), того, что удельная электрическая проводимость $\gamma = 1/\rho$ (для стали $\rho = 140$ Ом·мм), приняв $\mu_n = 200$, пренебрегая незначительным изменением ρ 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 - σ) должна измениться на обратно пропорциональную.

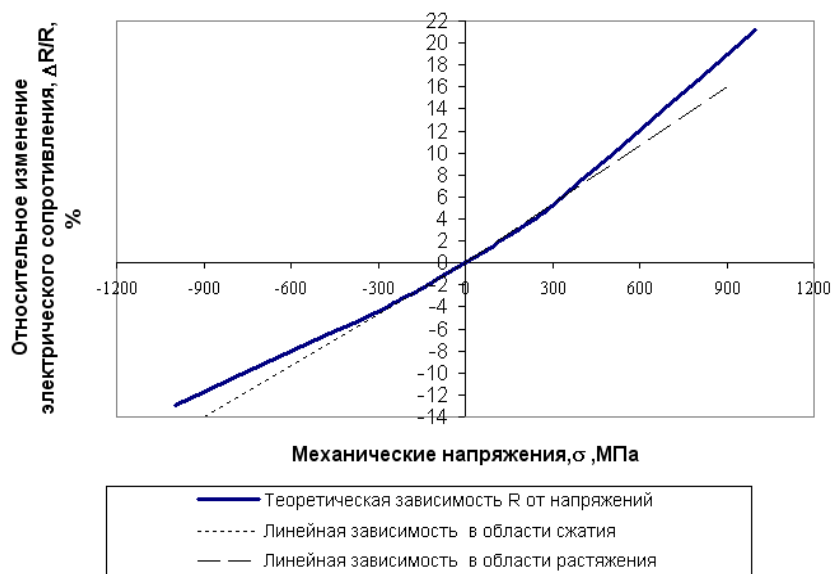


Рисунок 1. Теоретическая зависимость электрического сопротивления от напряжений растяжения-сжатия

При упругой работе конструкционных сталей в строительных конструкциях механические напряжения обычно не превышают значений ± 300 МПа. Поэтому для данного диапазона значений можно пренебречь нелинейностью зависимости в зонах от 0 до σ_T при растяжении и от 0 до σ_T при сжатии с погрешностью до 5% от величины напряжений. Для рассматриваемого примера (рис. 2) в диапазоне до ± 300 МПа, $\pi_p = 1,7 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹ при растяжении и $\pi_c = 1,5 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹ 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 $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);

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

K_σ – 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.

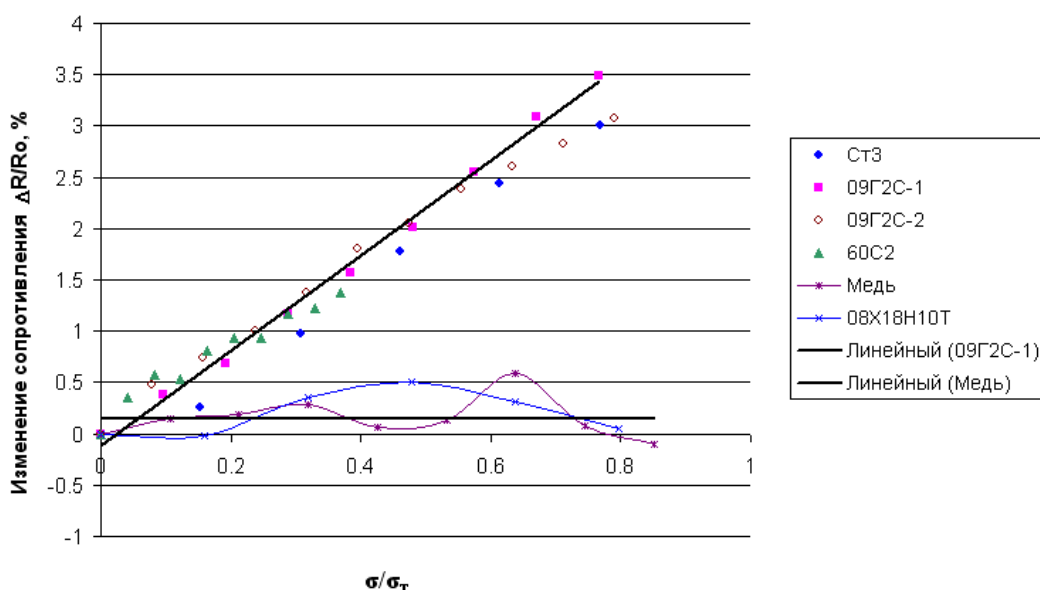


Рисунок 2. Влияние на зависимость сопротивления от механических напряжений вида металла

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*