

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На сегодняшний день в России и других странах эксплуатируется большое количество зданий и сооружений с несущими элементами, выполненными из стали. Возведение конструкций из данного материала продолжается ежедневно. Из-за большого срока эксплуатации конструкций зданий наблюдается высокий уровень износа, и часто требуется выполнение работ по ремонту, реставрации и реконструкции. Полнота и целесообразность проведения тех или иных восстановительных работ в большой степени зависят от технической грамотности и достоверности выполненного инженерно-технического обследования.

Одной из основных задач, решение которой необходимо для достоверной оценки технического состояния элементов конструкций, является задача по определению величины фактических механических напряжений в элементах конструкций, выявление их распределения по сечению и длине элемента, а также контроль за их изменением в процессе эксплуатации.

Для решения вышеуказанной задачи применяются и разрабатываются разнообразные методы неразрушающего контроля механических напряжений. Известные методы условно можно разделить на “внешние” относительно объекта исследования и “внутренние”. К “внешним” относятся уже давно применяемые и совершенствуемые по сей день тензометрические методы, в которых контроль напряжений осуществляется по измерению макродеформаций элемента, при этом микродеформации и изменение структуры стали не учитываются. К таким методам относят механическую тензометрию с применением различных приборов: прогибомеров, тензометров и многочисленных конструкций тензорезисторов.

К ним же можно отнести и метод углепластиковых волокон [1], а также условно неразрушающие методы “отверстия” и “столбика” [2].

“Внутренние”, или физические, методы основаны на регистрации различных физических параметров исследуемого материала (стали), значения которых изменяются вследствие микроизменений структуры материала, происходящих при изменении напряженного состояния. Большинство методов такого типа нашло свое применение в области машиностроения. Часть из них более или менее успешно адаптирована для применения при обследовании технического состояния строительных конструкций. К наиболее известным из них относятся рентгеновская дифрактометрия [3], ультразвуковые [4] и магнитные методы. К магнитным методам контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) относят метод магнитной памяти (ММП) [5], магнитоферрозондовый метод [6], метод на основе эффекта Баркгаузена (МЭБ) [7], метод магнитных меток и др.

Относительно новой запатентованной разработкой стала аппаратура СИТОН-ТЕСТ, основанная на резистивном электроконтактном (РЭ) методе для определения напряжений [8]. Метод основан на зависимости электрического сопротивления (обратной ему электрической проводимости) металла от его деформированного состояния, которая в общем виде может быть описана формулой (1):

$$d_0 = \frac{mkTV_T N_0 \pi}{e^2 E n_0} \gamma_0 = f \gamma_0, \quad (1)$$

где d_0 – период кристаллической решетки стали без воздействия нагрузки; γ_0 – электрическая проводимость стали без воздействия нагрузки;

E – модуль упругости стали; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура образца; m , e , n – масса покоя, заряд и число электронов в единице объема; N_0 – количество атомов в единице объема; V_T – скорость теплового движения электронов.

С помощью аппаратуры СИТОН-ТЕСТ (рис. 1) производится измерение эффективного удельного электрического сопротивления (ЭУС) на различной глубине от поверхности исследуемого металлического элемента. ЭУС соответствует удельному электрическому сопротивлению материала, умноженному на отношение расстояния между контактами датчика к ширине распространения тока. Величина ЭУС вводится ввиду уменьшения как глубины проникновения при увеличении частоты сигнала, так и ширины распространения тока в изделии при неизменных расстояниях между приемопередающими контактами. Таким образом, при увеличении частоты значение ЭУС увеличивается. При этом точность измерения электрических величин составляет 0,2–0,5 %. Основной целью метода является контроль остаточных напряжений в поверхностных слоях конструкций и изделий из металлов и сплавов. То есть напряжений, возникших в поверхностном слое металла в ходе изготовления, обработки и в процессе

эксплуатации и сохраняющихся без воздействия эксплуатационной нагрузки.

С учетом того, что остаточные и эксплуатационные напряжения имеют одинаковую природу, было предположено, что РЭ метод можно использовать для контроля и оценки напряженно-деформированного состояния конструкций, обусловленного воздействием эксплуатационных нагрузок.

Для проверки данной гипотезы проведен ряд экспериментальных исследований, описанных ниже. Все проведенные эксперименты условно можно разделить на три группы:

1. Исследование зависимости ЭУС от одноосных напряжений растяжения-сжатия при деформировании стальных образцов.

2. Исследования зависимости ЭУС от одноосных напряжений растяжения-сжатия при деформировании крупномасштабной модели балки перекрытия.

3. Исследование зависимости ЭУС от различных факторов (зона расположения датчика, сила прижатия датчика, направление расположения датчика, вид обработки поверхности и др.).

В настоящей статье приведены результаты исследований по группам 1 и 2. Все исследованные модели выполнены из стали Ст3сп. Исследованные образцы изготовлены в виде

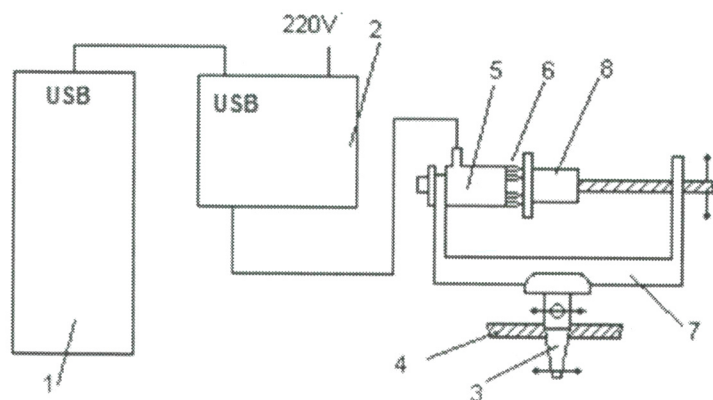


Рис. 1. Схема и внешний вид аппаратуры СИТОН-ТЕСТ

1 – компьютер; 2 – прибор “СИТОН-ТЕСТ”; 3 – тиски; 4 – рабочая поверхность; 5 – датчик ДУ 26/13; 6 – образец; 7 – струбина; 8 – упорный наконечник

пластин по ГОСТ 1497-84 с уширением и без него. Растягивающие напряжения создавались с помощью разрывных машин FPZ 100/1 и P-20. Сжимающие и растягивающие напряжения создавались в образцах путем поперечного изгиба по консольной схеме опирания, а в крупномасштабной модели – по шарнирной однопролетной схеме (измерения производились на сжатом либо растянутом волокне моделей). Значения напряжений растяжения-сжатия, возникающих в моделях, определялись с помощью формул сопротивления материалов по известным геометрическим характеристикам моделей, модулю упругости стали, а также условиям и величинам прикладываемых нагрузок.

Следует отметить, что в зависимости от исходного состояния, вида обработки поверхности, механической предыстории образцов начальные значения ЭУС в различных зонах поверхности могут значительно ($\pm 3\%$) различаться. Поэтому в ходе исследований изучались зависимости ЭУС от напряжений в каждой конкретной точке образца (без потери контакта датчика прибора). При измерениях была выбрана наибольшая достижимая аппаратурой глубина 100 мкм.

В результате проведенных экспериментов установлена зависимость ЭУС от одноосных

напряжений растяжения-сжатия. Частный случай зависимости, полученной при растяжении и сжатии стальной пластины, представлен на рис. 2.

В упругой зоне работы металла зависимость носит линейный характер и является прямо пропорциональной. По результатам корреляционно-регрессионного анализа получены линейные уравнения регрессии вида

$$\rho = \rho_n + 0,01\sigma, \quad (2)$$

где ρ_n – начальное значение ЭУС без дополнительных напряжений, мОм·мкм; σ – одноосное напряжение растяжения-сжатия, МПа.

Определенные в ходе более тридцати экспериментов зависимости характеризуется коэффициентом корреляции 0,9 и более.

При растяжении материала с дальнейшим переходом в пластическую стадию зависимость ЭУС изменяется на обратно пропорциональную (рис. 3). Основной предполагаемой причиной изменения зависимости ЭУС от растягивающих напряжений на обратно пропорциональную (значения ЭУС уменьшаются) становится влияние наклепа. Данное явление описано в издании Б.Г. Лившица [9] и объясняется тем, что пластинчатый перлит под влиянием деформа-

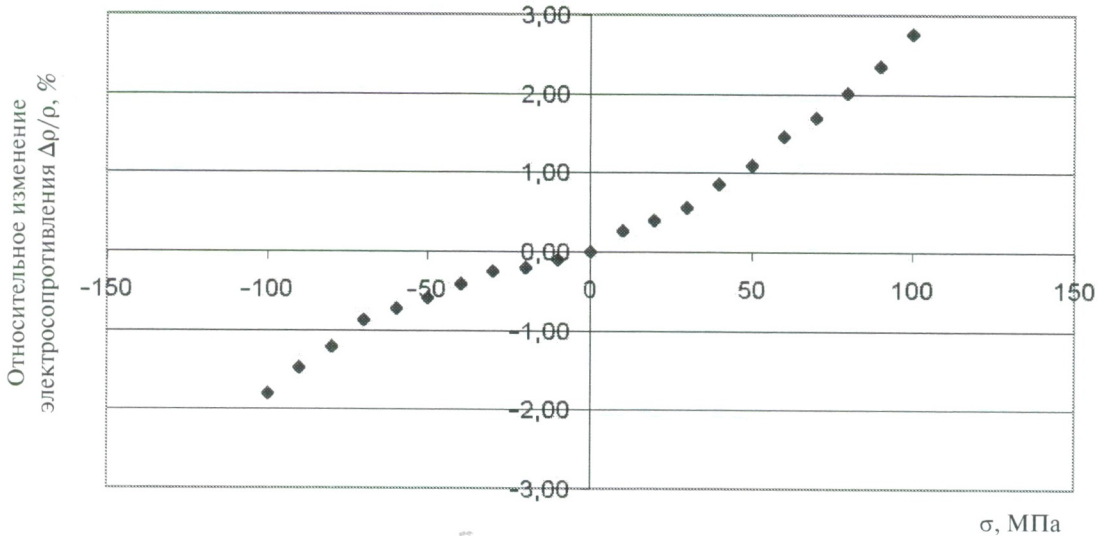


Рис. 2. Зависимость ЭУС от сжимающих и растягивающих напряжений при растяжении и сжатии стальной пластины

ции ориентируется своими пластинками вдоль направления растягивающих напряжений, что приводит к формированию так называемой “фибровой структуры”. Уменьшение ЭУС в результате образования ориентированной структуры преобладает над его увеличением, происходящим вследствие наклепа феррита.

На рис. 4 представлена зависимость, полученная при разгрузке сжатия и растяжении шлифованной поверхности модели № 1. Как следует из графика, линейная прямо пропорциональная зависимость в области сжимающих напряжений после достижения 50 МПа растяжения меняется на обратно пропорциональную.

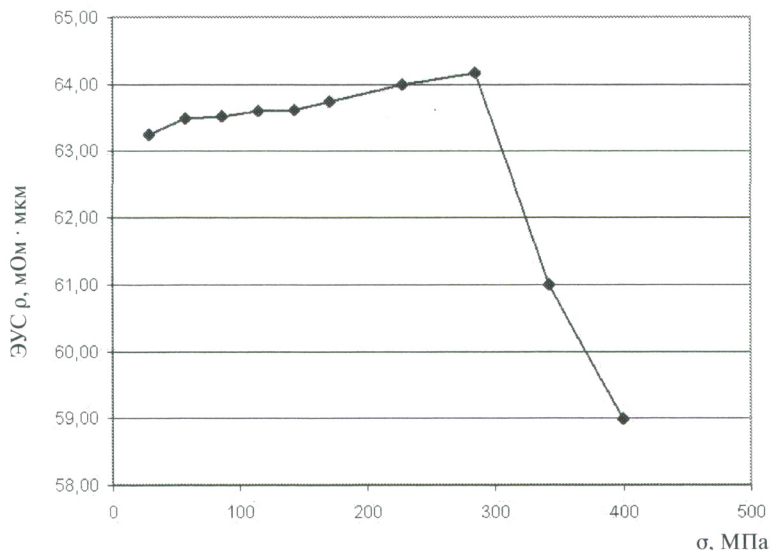


Рис. 3. Зависимость ЭУС от растягивающих напряжений в упругой и пластической зонах

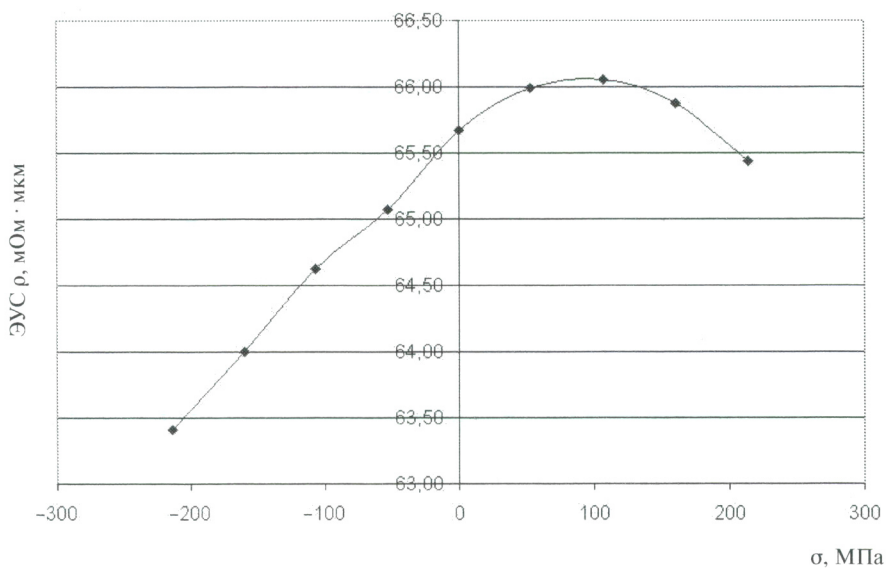


Рис. 4. Зависимость ЭУС от сжимающих и растягивающих напряжений на шлифованной поверхности образца

Данный эффект зафиксирован в десяти различных экспериментах и предположительно вызван тем, что в исследуемом поверхностном слое присутствуют растягивающие остаточные напряжения, обусловленные шлифовкой. Данное явление описано по результатам неоднократных исследований А.В. Якимовым [10]. Когда поверхностный слой сжимается, сумма остаточных и нагрузочных напряжений стремится к нулю, а затем переходит в область сжатия, тогда зависимость ЭУС от напряжений линейна. По приложении растягивающих напряжений остаточные напря-

жения суммируются с ними, что приводит к пластической деформации стали в поверхностном слое задолго до достижения расчетного предела текучести образцом в целом. Как было отмечено, при переходе металла в зону пластических деформаций зависимость ЭУС от напряжений меняет тенденцию на обратно пропорциональную, что и видно на графике (см. рис. 4).

При малоцикловом нагружении крупномасштабной модели двутавровой балки выявлен гистерезис, замыкающийся в ходе одного цикла растяжения-разгрузки (рис. 5).

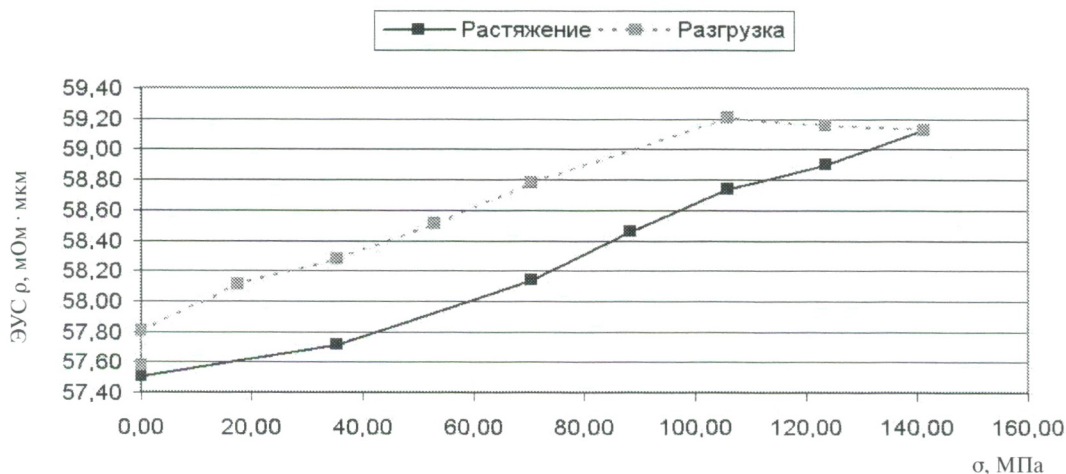


Рис. 5. Зависимость ЭУС от растягивающих напряжений в ходе одного цикла деформирования крупномасштабной модели двутавровой балки

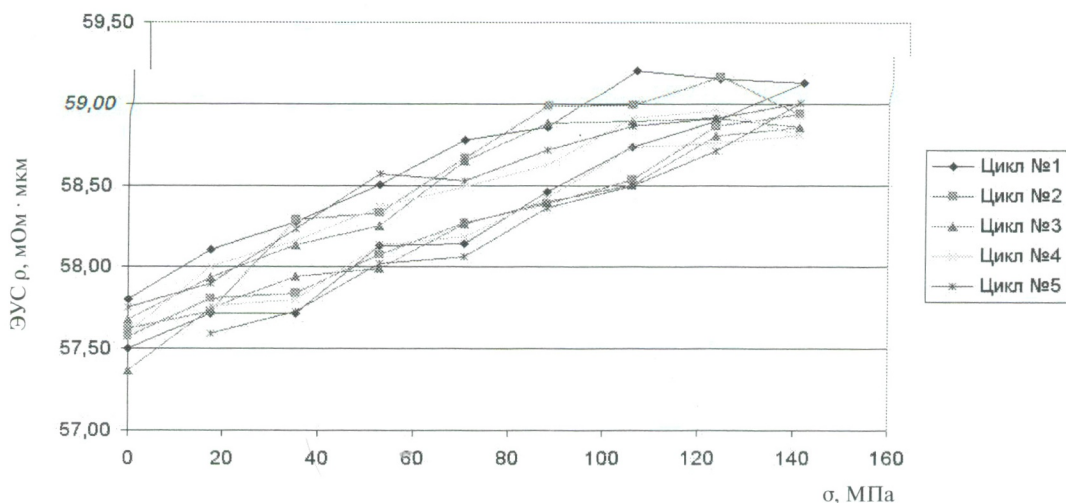


Рис. 6. Зависимость ЭУС от растягивающих напряжений в ходе пяти циклов деформирования крупномасштабной модели двутавровой балки

В ходе последующих четырех (из пяти) циклов нагружения гистерезисный характер зависимости сохранился. При этом смещения графика зависимости по оси ординат не произошло, т. е. при снятии нагрузки после каждого цикла ЭУС принимало значение, близкое к исходному (рис. 6). Таким образом, кривые всех пяти циклов загрузки-разгрузки повторяют друг друга. Повысить точность можно за счет выполнения многократных измерений при каждом шаге нагружения.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

В результате экспериментальных исследований по применению РЭ метода для контроля эксплуатационных напряжений в стальных элементах выявлена линейная прямо пропорциональная зависимость ЭУС от одноосных напряжений растяжения-сжатия в зоне упругих деформаций. Связь между напряжениями и ЭУС характеризуется коэффициентом корреляции более 0,9.

При переходе металла в зону пластических деформаций, обусловленных как достижением

предела текучести всем сечением элемента, так и влиянием остаточных напряжений поверхностного слоя, зависимость изменяется на обратно пропорциональную.

При нагружении и разгрузке материала отмечается гистерезис. Петля гистерезиса замкнута.

При циклической загрузке и разгрузке зависимость в каждом цикле практически полностью повторяет предыдущий.

Чувствительность метода позволяет определять изменения напряженного состояния в пределах 40–50 МПа, что видно при многоцикловом эксперименте. Для увеличения точности в два-три раза требуется проводить многократные измерения на каждом шаге нагружения, что особенно важно при расчете напряжений.

РЭ метод можно применять для контроля изменения напряжений растяжения-сжатия в стальных конструкциях. При подборе необходимой калибровочной зависимости для каждого вида сталей можно производить количественную оценку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баурова Н.И. Диагностирование состояния металлоконструкций с помощью углеродных волокон на примере буксировочного устройства // Контроль. Диагностика. 2008. № 12. С. 33–35.
2. Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий: Атлас схем и чертежей / Томский межотрасл. ЦНТИ. Томск, 1990. 316 с.
3. Лексовский А.М., Баскин Б.Л., Улыбин А.В. Применение рентгеновской тензометрии для определения напряженно-деформируемого состояния // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: Матер. XI науч.-метод. конф. ВИТУ / ВИТУ. СПб. 2007. С 57–62.
4. Венгринович В.Л. Принципы и практика диагностики напряженно-деформированного состояния конструкций, изделий и сварных соединений // В мире НК. 2005. № 1(27). С. 4–9.
5. Дубов А.А. Принципиальные отличительные признаки метода магнитной памяти металла и приборов контроля в сравнении с известными магнитными методами неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2003. № 12.
6. Гордиенко В.Е. К вопросу магнитного контроля и оценки НДС металла с применением графических и аналитических регрессионных зависимостей // Контроль. Диагностика. 2008. № 8. С. 52–55.
7. Венгринович В.Л., Данкевич Ю.Б., Цукерман В.Л. Новые возможности НК напряжений методом эффекта Баркгаузена // В мире НК. 2005. № 1(27). С. 36–39.
8. Анастасиади Г.П., Васильков С.Д., Юрова Г.П. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из никелевых сплавов после механической обработки // Металлообработка. 2008. № 5 (47). С. 4–9.
9. Лившиц Б.Г. Физические свойства черных металлов и методы их испытаний. М.: Глав. ред. литер. по черн. металлургии, 1937. 256 с.
10. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.