

**ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЙ МЕТОД В ИСПЫТАНИЯХ  
ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Бандин О.Л.**

*Доцент, старший научный сотрудник Московского государственного университета  
природообустройства, кандидат технических наук*

**Бондарович Л.А.**

*Старший научный сотрудник кафедры «Испытания сооружений»  
Московского государственного строительного университета,  
профессор, кандидат технических наук*

**Сафина Л.Х.**

*Доцент кафедры «Испытания сооружений» Московского государственного  
строительного университета, кандидат технических наук*

**Шувалов А.Н.,**

*Профессор кафедры «Испытания сооружений»  
Московского государственного строительного университета,  
кандидат технических наук*

Тензометрирование является основным методом исследования прочности, деформативности, надежности конструкций и материалов.

Критерием прочности обычно служит напряженное состояние, которое, однако, не может быть оценено прямыми методами. Как правило, напряженное состояние определяется через деформации или какие-либо сопутствующие изменению напряжения эффекты (изменение оптических или магнитных свойств, частотных характеристик и т.п.). Тензометрические методы объединяют большинство известных способов оценки напряженного состояния, однако чаще под тензометрией понимают совокупность прямых методов и средств измерения деформаций.

Для перехода к напряжениям используют специальные зависимости, связывающие напряжения и деформации в упругой и за пределами упругой работы материала.

Тензометрические исследования имеют большое значение вследствие усложнения форм и условий эксплуатации конструктивных элементов, поскольку при этом существенно снижаются точность и достоверность инженерных расчетов.

Инженерные конструкции работают в широком диапазоне температур, переменной влажности, при высоких давлениях, циклических и импульсных внешних воздействиях, в них имеются остаточные сварочные и технологические напряжения. По этим причинам к методам и средствам тензометрии при исследовании инженерных сооружений предъявляются следующие требования:

- широкий диапазон (1...100 000 е.о.д.) для измерения малых и больших (пластических) деформаций;

- обеспечение измерений на ограниченных участках в зонах концентрации напряжений при измерительной базе 0,5...5 мм, а также на элементах из макронеоднородных материалов при размерах базы свыше 50...100 мм;
- обеспечение необходимой точности и надежности измерений при статическом, циклическом и динамическом тензометрировании с частотами до нескольких десятков кГц;
- выполнение измерений в климатическом диапазоне температур;
- высокая стабильность, постоянство масштаба измерений и относительная независимость от внешних воздействий в течение длительного времени (месяцы и годы);
- возможность автоматической дистанционной регистрации деформации (до 100 м и более) во многих точках конструкции (1000 и более) и т.п.

Из известных методов и средств тензометрии перечисленным требованиям в наибольшей степени отвечает метод резистивной тензометрии, использующей в качестве первичных средств тензопреобразователи активного сопротивления или *тензорезисторы*.

Тензометрические методы исследования деформаций широко применялись в нашей стране в 60-80-е годы XX века. Однако, в настоящее время они являются незаслуженно забытыми, стоит напомнить, что тензометрические методы могут быть использованы для решения многих задач связанных с эксплуатацией инженерных конструкций, задач, решение которых аналитическими и численными методами невозможно.

В качестве примера приведем использование тензометрического метода для проведения натурных испытаний механизированного аттракциона «Катальная гора». В ряде элементов металлических конструкций аттракциона после девятилетней эксплуатации образовались поверхностные и сквозные трещины.

Конструкция аттракциона высотой 15 м и длиной трассы 200 м, представляет собой путь, выполненный из стальных труб диаметром 83 мм, толщиной 8 мм (материал – Сталь 20). Для создания психоэмоциональных ощущений путь расположен на свободно стоящих разновысоких опорах с виражами и участком с так называемой «мертвой петлей». Крепление пути к опорам осуществляется с помощью приваренных фансонок толщиной 6 мм (рис. 1).

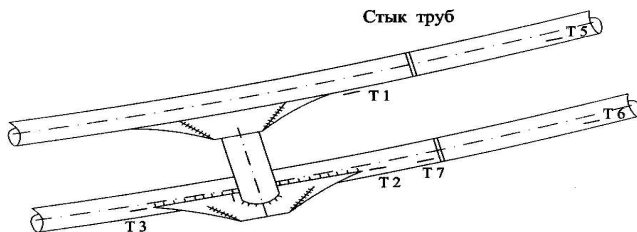


Рис. 1

В штатном режиме по пути аттракциона движется поезд, состоящий из девяти тележек с двумя пассажирами в каждой. Скорость поезда достигает 40 км/ч, перегрузки 4,5g. Наибольшее количество трещин имеет место в зонах концентрации напряжений узлов сопряжения пути с опорами, на границе сварного шва и основного металла трубы пути.

Причины образования трещин в зонах концентрации напряжений при динамическом нагружении определялись с помощью тензометрического метода. Для измерения деформаций использовали проволочные тензорезисторы на бумажной основе с базой 5 мм и сопротивлением 100 Ом. Регистрацию деформаций тензорезисторов осуществляли самописцем Н-338П с частотным диапазоном 0...150 Гц, чувствительностью 0,5...0,002 мм/В, скоростью движения ленты от 1 мм до 250 мм/с, нелинейностью амплитудной характеристики  $\pm 3\%$ .

В качестве тензометрического усилителя использовали четырехканальный усилитель ТА-5 с максимальным значением коэффициента преобразования 0,12 мА/е.о.д., несущей частотой 7 Гц и диапазоном рабочих частот 0...100 Гц.

Тензорезисторы при измерении деформаций включали по полумостовой схеме с обязательной градуировкой измерительного канала.

Испытание элементов конструкций аттракциона проводили при штатном нагружении поезда. Характерные виброграммы деформаций (напряжений) в исследованных зонах имеют вид, показанный на рис.2.

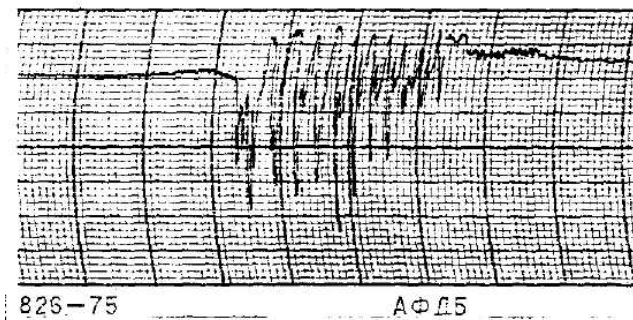


Рис.2

Масштабы напряжений на виброграммах определяли по масштабам деформаций с использованием закона Гука. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния материала конструкции аттракциона показали, что во многих его элементах имеют место существенные значения напряжений и размахов напряжений при проезде поезда ( $\sigma_{\max} = 125 \dots 140$  МПа,  $\Delta\sigma_{\max} = 160 \dots 250$  МПа, при пределе выносливости материала  $\sigma_{-1} = 170$  МПа) многие узлы работают в условиях пе-

ременных, двухчастотных циклических нагрузок с соотношением частот  $f_b/f_n = 9$  ( $f_b$  – частота, соответствующая количеству тележек поезда,  $f_n$  – частота, прозвон поезда по трассе аттракциона) и отношением амплитуд напряжений  $\sigma_a^b/\sigma_a^h = 0,27\dots 2,3$  ( $\sigma_a^b$  – амплитуда высокочастотных напряжений,  $\sigma_a^h$  – амплитуда низкочастотных напряжений). Коэффициент асимметрии циклов изменяется от  $r = -0,15$  до  $r = -1,0$ .

В результате экспериментальных исследований установлено также, что напряженно-деформированное состояние в элементах конструкции существенно зависит от условий опирания стоек аттракциона на землю (просадка грунта, разрушение деревянных подкладок под опорами).

Учитывая число циклов нагружения элементов аттракционов при двухчастотном нагружении  $N = 1,5 \times 10^6$  циклов и экспериментально установленные значения переменных напряжений в узлах конструкции, очевидно, что в них имеют место усталостные накопления повреждений, приводящие к возникновению сквозных и поверхностных трещин. Следует отметить, что численными методами расчета узлов опирания пути на стойки (расчет выполнялся по программе MSC/NASTRAN при размере конечного элемента в зоне концентратора 1 мм) таких результатов получить не удалось, максимальные расчетные напряжения цикла не превышали уровня  $\sigma_{max} = 50\dots 60$  МПа. Расчетный цикл при этом получился одночастотным.

Полученные экспериментальные результаты позволили внести изменения в конструктивные элементы аттракциона «Катальная гора» и снизить максимальные динамические напряжения до уровня расчетных. Кроме того, определены наиболее опасные участки конструкции, за которыми установлен более тщательный контроль.