

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Л. Д. ДОБРУШИН, Е. Д. ПЕКАРЬ, А. Г. БРЫЗГАЛИН, С. Ю. ИЛЛАРИОНОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Предложен метод измерения динамических деформаций с использованием тензорезисторов, включаемых по мостовой схеме. Рабочее питание подается генератором импульсов постоянного тока напряжением 23 В длительностью 14 мс. Кратковременная подача питания позволяет увеличить рабочий ток с 25...50 до 200...250 мА, что почти на порядок увеличивает чувствительность метода. Измерительная система включает генератор импульсов постоянного тока и цифровой осциллограф, подключаемый к компьютеру. Проведены тарировочные испытания и исследована работоспособность измерительной системы в области упругих и упругопластических деформаций. Показано, что динамические деформации от взрывного нагружения металлоконструкций могут быть измерены с удовлетворительной точностью в диапазоне  $-0,6...0,6\%$  во временном интервале 0...14 мс. Кроме того, система позволяет фиксировать остаточные деформации металла конструкции после динамического воздействия. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* динамическая нагрузка, деформации, тензорезистор, измерение, мостовая схема, генератор импульсов, чувствительность метода

Наиболее распространенным на сегодня способом измерения динамических деформаций является тензометрический с использованием тензорезисторов, включаемых в схему измерения по мостовой схеме. Достоинства и недостатки его практического применения достаточно хорошо известны [1].

В случае использования тензорезисторов для измерения напряженно-деформированного состояния (НДС) при взрывном нагружении металлоконструкций их приходится располагать в непосредственной близости от заряда. Длина проводов подключения рабочего и компенсационного тензорезисторов может достигать нескольких десятков метров и их активным и реактивным сопротивлением уже нельзя пренебречь — они вносят существенные погрешности в измерения. Кроме того, в этом случае схема измерений становится более чувствительной к помехам. При проведении практических измерений амплитуда полезного сигнала мало отличается от величины помех и становится проблематичной его идентификация [2]. Увеличение величины полезного сигнала может быть достигнуто увеличением рабочего тока питания моста. Но одним из существенных факторов, влияющих на точность измерения, является разогрев тензорезисторов при протекании по ним рабочего тока. Корректная работа выпускаемых промышленно тензорезисторов при постоянно включенной измерительной цепи возможна при значении тока 20...50 мА [3].

В конструкциях, подвергаемых взрывному нагружению, а также в металле при сварке взрывом

максимальные деформации реализуются в течение нескольких миллисекунд [4]. Таким образом, питание схемы измерения может осуществляться подачей импульсного напряжения длительностью 10...15 мс. В этом случае необходимо синхронизировать иницирование заряда взрывчатого вещества (ВВ), запуск осциллографа и подачу измерительного импульса напряжения. Кратковременность подачи питания на тензорезисторы позволяет поднять значение рабочего тока до 200...250 мА, что почти на порядок повышает чувствительность метода измерения.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан метод измерения динамических деформаций, при котором рабочее питание подается генератором импульсов постоянного тока напряжением 23 В длительностью 14 мс [5]. Генератор изготовлен специалистами Волгоградского технического университета. Для оценки возможностей нового метода и пригодности его для измерения деформаций, создаваемых в металлоконструкциях при взрывном нагружении, проведены исследования его работоспособности в области упругих и упругопластических деформаций.

Тарировочные испытания разработанного метода в области упругих деформаций проводили на специально изготовленном тарировочном устройстве (рис. 1) по схеме четырехточечного изгиба призматической стальной балки размером 400×40×5 мм, а также на растяжной машине. В качестве регистрирующей аппаратуры использовали осциллограф «Dataman», позволяющий выводить данные измерений непосредственно на мо-



Рис. 1. Внешний вид тарировочного устройства

нитер компьютера. Полученные тарировочные зависимости приведены на рис. 2. Здесь же приведена зависимость механических напряжений от напряжения разбалансировки моста, полученная расчетным путем по выражению:

$$\sigma = 4E \frac{\Delta U}{s(U - 2\Delta U)}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — напряжения;  $E$  — модуль упругости стали балки;  $\Delta U$  — напряжение разбалансировки измерительного моста;  $U$  — напряжение, подаваемое на мост;  $s$  — коэффициент тензочувствительности тензорезистора, определяемый заводом-изготовителем.

Полученные тарировочные зависимости имеют линейный вид, тарировочный коэффициент при испытаниях на растяжной машине равен 17,7 МПа/мВ ( $56,5 \cdot 10^{-3}$  мВ/МПа), при испытаниях на тарировочном устройстве — 17,2 МПа/мВ ( $58 \cdot 10^{-3}$  мВ/МПа), при расчете напряжений по выражению (1) — 17,5 МПа/мВ ( $57,25 \cdot 10^{-3}$  мВ/МПа).

Различие в коэффициентах, полученных при тарировочных испытаниях на растяжной машине и

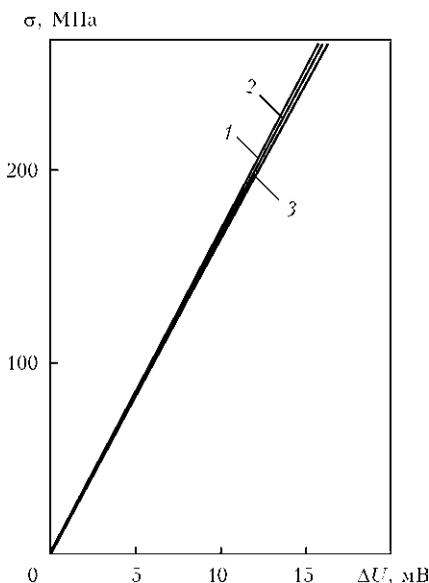


Рис. 2. Тарировочные зависимости, полученные экспериментально на растяжной машине (1); расчетным путем по коэффициенту тензочувствительности (2); экспериментально на специальном устройстве (3)

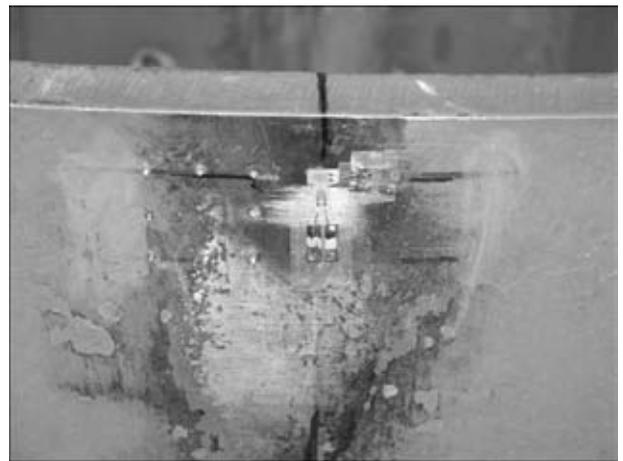


Рис. 3. Измерение деформаций в опоре для сварки взрывом (цена деления шкалы 2 мкм)

специальном устройстве, связано в основном с тем, что при проведении испытаний на специальном устройстве используется большее количество геометрических параметров, каждый из которых измеряется с некоторой погрешностью, а также неизбежным округлением расчетных величин.

Работоспособность метода в области упруго-пластических деформаций проверяли при исследовании деформаций, происходящих в специальной опоре для сварки взрывом. Опора представляет собой вертикально расположенный стальной цилиндр высотой 500 мм диаметром 2 м с днищем. Внутренний объем был заполнен стальной дробью. На дробе располагались заготовки под сварку взрывом. Масса заряда ВВ варьировалась от 20 до 50 кг. На стенку опоры вблизи верхнего края было наклеено два измерительных тензорезистора: в окружном и вертикальном направ-

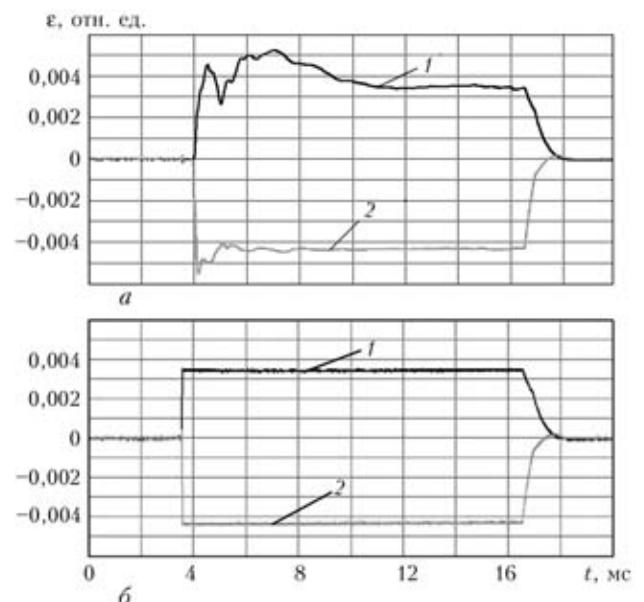


Рис. 4. Деформации стенки опоры для сварки взрывом: а — в момент подрыва заряда массой 50 кг; б — после взрыва (1 — горизонтальные деформации; 2 — вертикальные)

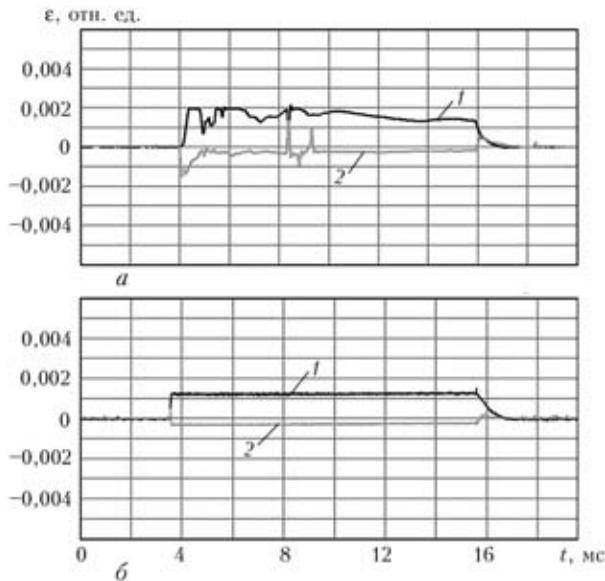


Рис. 5. Деформации стенки опоры во время (а) и после взрыва (б) заряда массой 20 кг (обознач. те же, что и на рис. 4)

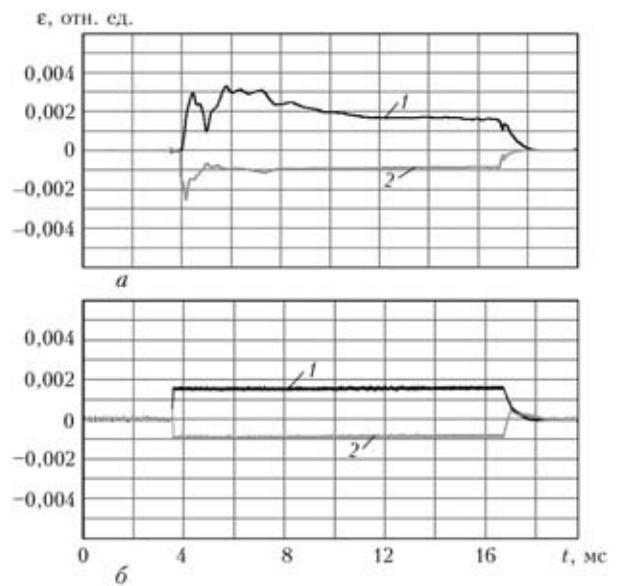


Рис. 6. Деформации стенки опоры во время (а) и после взрыва (б) заряда массой 35 кг (обознач. те же, что и на рис. 4)

лении. Рядом с тензорезисторами были нанесены базы для проведения измерений механическим деформометром с индикатором часового типа (рис. 3). Деформометром фиксировалась остаточная деформация стенки опоры после взрывов. Следует отметить, что разработанный метод также позволяет измерять остаточные деформации исследуемой конструкции путем повторного включения измерительной цепи после взрыва. На рис. 4 приведены примеры регистрации деформаций, развивающихся во времени в момент подрыва заряда и в стационарном состоянии после взрыва.

На рис. 5, 6 представлены аналогичные осциллограммы деформаций, произошедших в опоре после взрыва зарядов массой 20 и 35 кг.

В таблице представлены сравнительные результаты измерения остаточных деформаций.

Оценивая результаты проведенных измерений, необходимо учитывать то, что остаточные деформации образуются вследствие создания взрывом пластических деформаций стенки опоры. Пластические деформации отличаются от упругих существенно большей неравномерностью распределения. Измерения деформометром и тензорезисторами проводили в разных, хотя и близко расположенных, местах стенки опоры, разброс накопленной деформации (последняя строка таблицы) меньше, чем у большинства отдельных измерений, поэтому имеющийся разброс показаний, полученных двумя разными методами, можно считать вполне приемлемым. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный метод позволяет оценивать деформации, превышающие упругие.

Исследования по оценке достоверности фиксируемых временных интервалов проводили пу-

тем регистрации волны нагрузки, создаваемой в прямолинейном цилиндрическом стальном стержне ударом свободно падающего стального бойка. На стержне длиной 720 мм диаметром 18 мм на расстоянии 30 мм от торца, по которому осуществлялся удар бойка, был наклеен тензорезистор (длина рабочей части 3 мм, сопротивление 100 Ом). Стержень крепился вертикально зажимом через резиновую прокладку. Боек, представляющий собой цилиндрический стержень длиной 100 мм диаметром 10 мм, через направляющую трубку бросался на стержень с высоты 1 м (рис. 7). Он выполнял также функцию датчика запуска. Пример регистрируемой волны нагрузки приведен на рис. 8

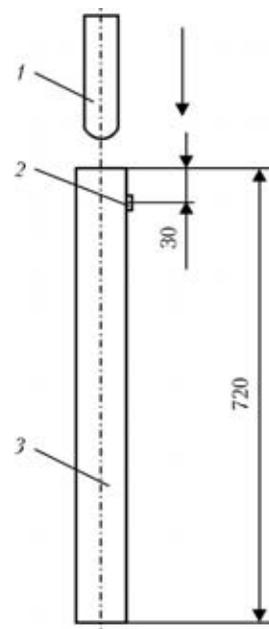


Рис. 7. Схема создания волны нагрузки в стержне: 1 — боек; 2 — тензорезистор; 3 — стержень



## Сравнительные результаты измерения остаточных деформаций в опоре для сварки взрывом

Номер взрыва	Деформации, %			
	горизонтальные		вертикальные	
	деформометр	тензорезистор	деформометр	тензорезистор
1	—	0,12	—	-0,02
2	—	0,16	—	-0,09
3	—	0,35	—	-0,43
4	0,42	0,39	-0,27	-0,33
5	0,54	0,30	-0,17	-0,12
6	0,23	0,25	-0,29	-0,36
7	0,55	0,60	-0,55	-0,60
8	0,17	0,23	-0,25	-0,30
9	0	0	-0,27	-0,18
10	0	0	-0,56	-0,42
11	0	0	-0,56	-0,33
Сумма строк 4-11	1,91	1,77	-2,92	-2,64

В момент соударения бойка со стержнем происходит их пластическая деформация, о чем свидетельствуют образующиеся вмятины, следовательно теоретически рассчитать длину создаваемой волны нагрузки довольно проблематично, соответственно сопоставить время  $t_1$ ,  $t_2$  с расчетными величинами не представляется возможным ( $t_1$  — время от момента соударения бойка со стержнем до схода созданной волны нагрузки (сжатия) с тензорезистора;  $t_2$  — время от момента входа отраженной от дальнего торца стержня волны нагрузки (растяжения) на тензорезистор до момента схода с него отраженной от торца соударения волны нагрузки (сжатия). Время прохождения расстояния 1380 мм уже упругой волны, распространяющейся со скоростью звука, характеризует  $t_3$  — период прохождения волны нагрузки от тензорезистора до дальнего торца стержня и обратно после отражения. Приняв стержневую скорость звука в стали равной 5100 м/с [6], определим, что  $t_3 = 271$  мкс. Среднее измеренное по десяти эк-

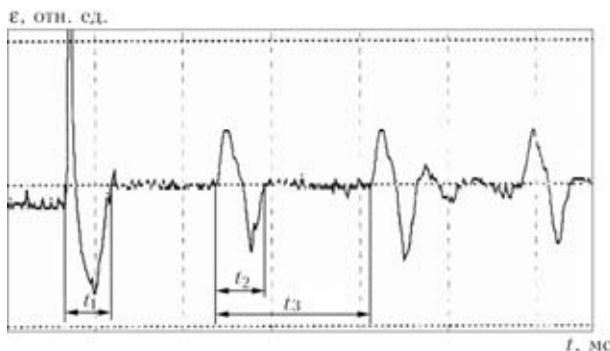


Рис. 8. Волна нагрузки в стержне (обознач. см. в тексте)

спериментам и по трем периодам в каждом эксперименте (всего 30 значений) время  $t_3$  составило 275 мкс. Максимальное измеренное время  $t_3$  — 279, минимальное 272 мкс. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов и малый разброс показаний позволяют считать точность измерения времени достаточной для решаемого круга задач.

## Выводы

1. Разработанный новый метод измерения динамических деформаций пригоден для исследований НДС металлоконструкций, подвергаемых взрывному нагружению.
2. Система измерения позволяет оценивать остаточные деформации, создаваемые в конструкциях импульсным приложением нагрузки.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев: «ИНДПРОМ», 2001. — 815 с.
2. Колодяжный А. В., Севрюков В. И. Ударные и импульсные воздействия на конструкции и материалы. — Киев: Наук. думка, 1986. — 167 с.
3. ТУЗ.06 Украины 7710-0001-93. Тензорезисторы. Назначение и область применения.
4. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю. С. Воробьев, А. В. Колодяжный, В. И. Севрюков, Е. Г. Янютин. — Киев: Наук. думка, 1989. — 220 с.
5. О возможности применения импульсного генератора тока для измерения динамических деформаций металлоконструкций / Л. Д. Добрушин, А. Г. Брызгалин, Е. Д. Пекарь и др. // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — 2012. — 5, № 14. — С. 78–82.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. 2-е изд. — М.: Мир, 1985. — 520 с.

Поступила в редакцию 13.02.2013