

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В статье приведены результаты проведенных за рубежом и в России экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами, и описана методика проведения экспериментальных исследований в НИЛ «Мосты» СГУПС.

Применение композитных материалов (КМ) в строительной практике стало известно с начала 80-х гг. XX в. Первое же применение КМ выявило ряд их преимуществ по сравнению с традиционными материалами. В целях усиления конструкций в строительстве КМ стали применяться в виде ламинатов и тканевых полотен различного плетения. Все эти материалы изготавливались на основе стеклянных, арамидных и угольных волокон. В последнее время больше используют КМ на основе угольных волокон, что связано с их физико-механическими характеристиками, лучшими по сравнению с другими волокнами [1]. До недавнего времени все экспериментальные исследования в области применения КМ для усиления железобетонных конструкций проводились в зарубежных странах.

В 2002 г. в Научно-исследовательской лаборатории строительства Венецианского архитектурного университета были проведены испытания двух железобетонных балок, усиленных углепластиком. Железобетонные образцы полной длиной 250 см имели прямоугольное поперечное сечение высотой 25 см и шириной 40 см. Продольная арматура имела диаметр 14 мм, поперечная арматура — 8 мм, расставленная с шагом по длине — 150 мм. Схема армирования балок приведена на рис. 1. Усиление было выполнено одним слоем КМ по нижним граням балок шириной 25 см, длиной 210 см с его анкеровкой в приопорных участках U-образными обмотками КМ (см. рис. 1). Испытания балок производили по схеме однопролетной балки с двумя сосредоточенными силами. Расчетный пролет — 220 см. В процессе испытания на каждом этапе нагружения измерялся прогиб балок.

На рис. 2 изображены графики изменения прогиба балок под нагрузкой. После усиления увеличение несущей способности составило 29 %. На основе проведенного ряда экспериментальных исследований в Италии в 2004 г. разработано Руководство по проектированию усиления эксплуатируемых конструкций композитными полимерными материалами [2]. В данном руководстве приведена методика расчета усиления железобетонных конструкций КМ по предельному состоянию первой и второй группы. Основные предпосылки расчета по предельному состоянию первой группы рассмотрены в работе [3].

В 2008 г. небольшое число экспериментов было проведено в российских организациях. В ФГУП «РОСДОРНИИ» [4] испытаны четыре железобетонных образца. В качестве образцов для каждого эксперимента были использованы изготовленные в лабораторных условиях по две железобетонные балки сечением 15 × 20 см с расчетным пролетом 0,94 м (эксперимент № 1) и 20 × 40 см с расчетным пролетом 3,775 м (эксперимент № 2). В качестве элемента усиления применялись углепластиковые ленты производства фирмы «Sika®» [5]. Балки

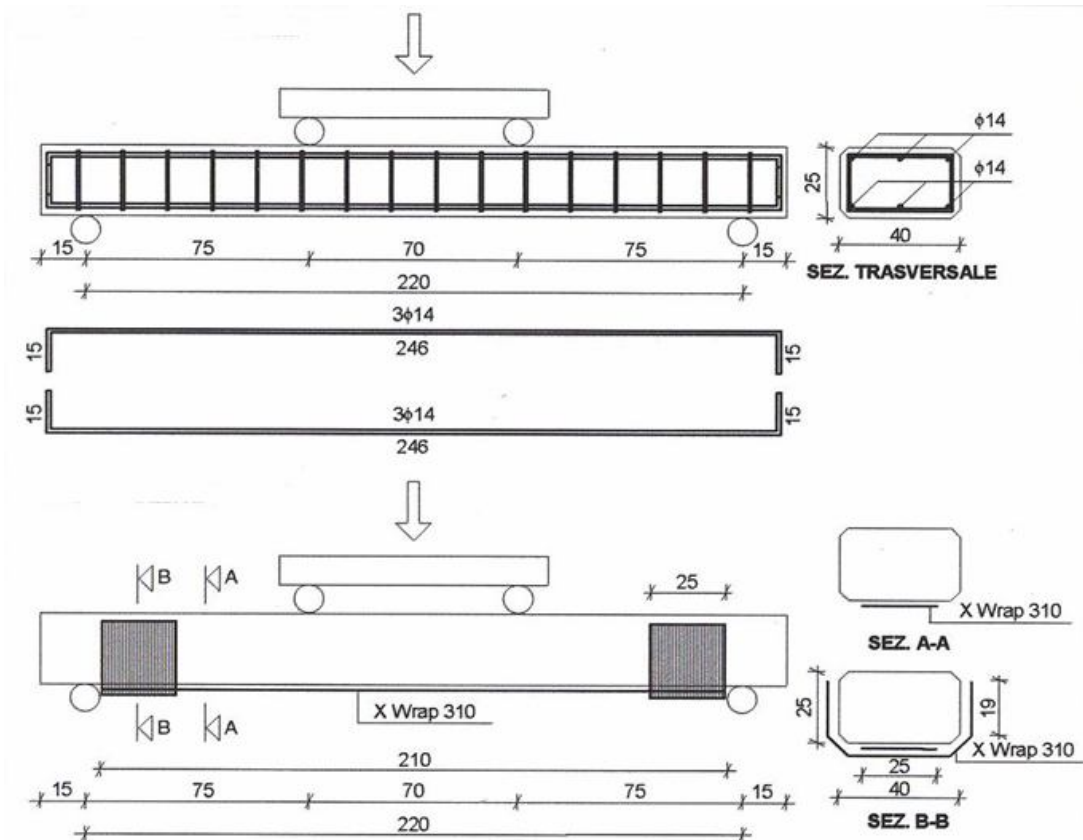
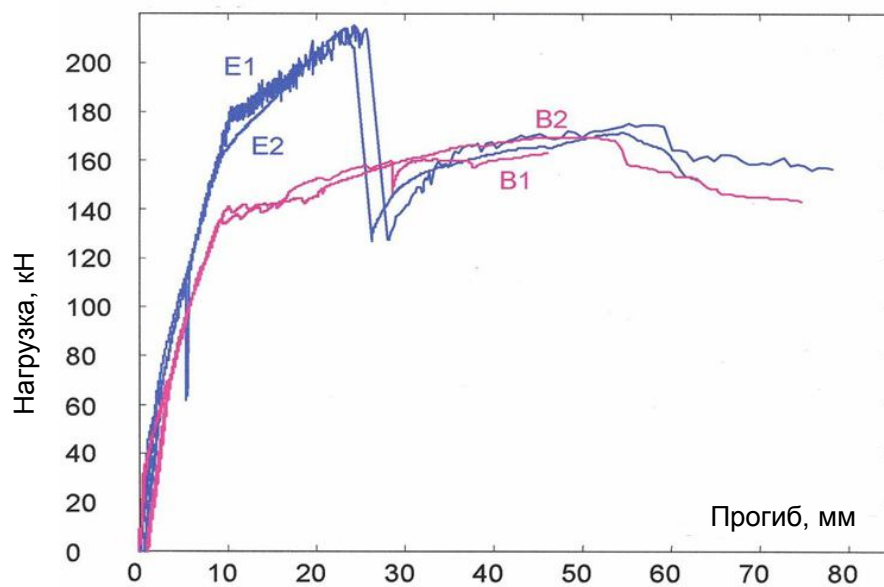


Рис. 1. Конструкция испытанных образцов

Рис. 2. Графики изменения прогиба балок под нагрузкой: *E* — усиленные балки; *B* — неусиленные балки

усиливали в зоне нижней грани после ее разрушения изгибающей нагрузкой (доведение раскрытия трещин до 0,5–0,6 мм). Испытания проводили по схеме однопролетной балки с двумя сосредоточенными грузами при статическом приложении нагрузки. Вначале испытаниям подвергались неусиленные углепластиком балки. При раскрытии трещин 0,6 мм балки снимались со стенов,

трещины инъецировали эпоксидным составом. После этого нижнюю грань балок усиливали углепластиками холодного отверждения и балки подвергались повторным испытаниям. Во время повторного нагружения наблюдалось раскрытие старых и появление новых трещин. Раскрытие трещин величиной 0,6–0,8 мм в усиленных образцах наблюдалось при большей нагрузке (в среднем на 30 %), чем в неусиленных образцах. Результаты испытаний приведены на графиках рис. 3.

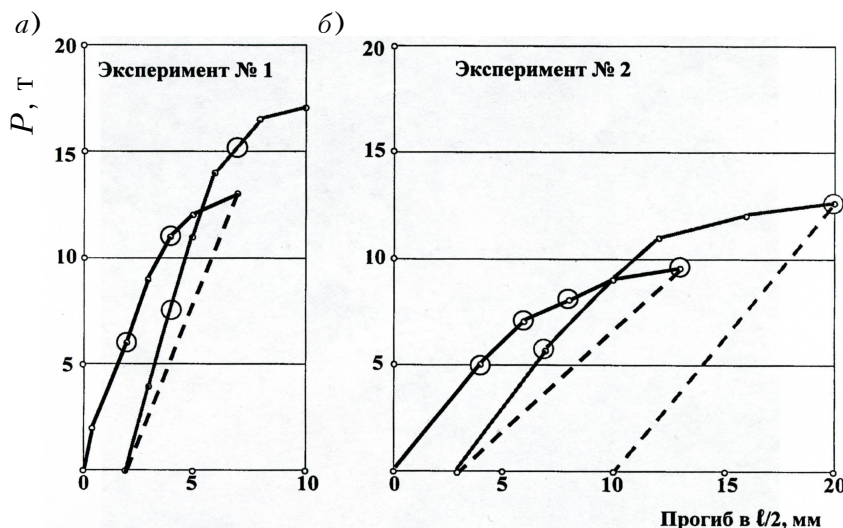


Рис. 3. Графики изменения прогиба балок под нагрузкой:
а — эксперимент № 1; б — эксперимент № 2

Основные выводы после проведенных исследований были следующие: несущая способность образцов, доведенных до разрушения (раскрытие трещин 0,6 мм) и затем усиленных, восстанавливается полностью и может превышать первоначальный уровень; трещинообразование усиленной конструкции проходит значительно медленнее, что делает приемлемым усиление КМ для увеличения срока безопасных условий эксплуатации (второе предельное состояние). Эффективность усиления зависит в том числе и от гибкости конструкции.

В СГУПСе начато проведение обширного экспериментального исследования деформирования и разрушения изгибаемых железобетонных элементов, усиленных КМ.

Основными задачами исследования являются: изучение схем разрушения усиленных железобетонных элементов; рассмотрение нескольких вариантов конструкций усиления с оценкой влияния их на изменение несущей способности, жесткости и трещиностойкости; определение характера распределения и значений относительных деформаций в бетоне и КМ, значений максимальных прогибов; изучение влияния податливости шва сдвига между бетоном и КМ на параметры деформирования и разрушения элементов.

Для решения сформулированных задач было запроектировано и изготовлено тридцать железобетонных балок полной длиной 1650 мм, прямоугольного поперечного сечения шириной 160 и высотой 220 мм. Класс бетона всех балок не ниже В30. Армирование балок принято в виде вязанных арматурных каркасов с тремя стержнями нижней диаметром 10 мм класса А-III и двумя стержнями верхней диаметром 8 мм класса А-III продольной рабочей арматурой; попереч-

ная арматура запроектирована из стержней диаметром 6 мм класса А-I, расставленная с шагом 200 мм (рис. 4). Все элементы арматурного каркаса расположены в соответствии с требованиями СНиП [6].

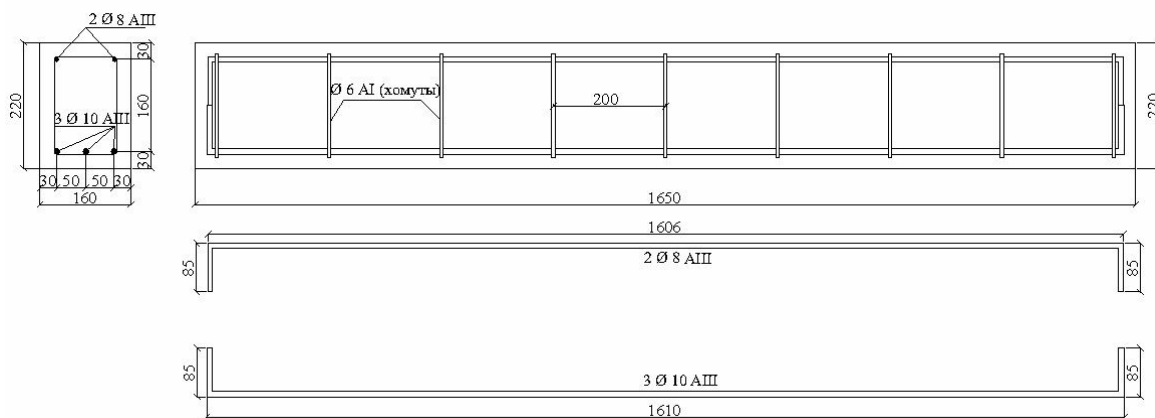


Рис. 4. Конструкция балок на испытание

В качестве КМ для усиления балок была выбрана система из углеродных волокон SikaWrap®, изготавливаемая фирмой «Sika» [5]. В состав системы SikaWrap® входит: ткань из углеродных волокон SikaWrap® 530 C (VP) и смола для пропитки Sikadur®-330.

Технические характеристики ткани из углеродных волокон SikaWrap® 530 C (VP) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики ткани из углеродных волокон SikaWrap® 530 C (VP)

Показатель	Нормативные значения
1. Вид материала	Холст высокой прочности из углеродных волокон
2. Цвет	Черный
3. Долговечность	Неограниченная. Отсутствует коррозия
4. Прочность волокон на растяжение, МПа	3 500
5. Деформация при отрыве, %	1,5
6. Ширина холста, мм	300
7. Толщина холста (минимизированная толщина углеродных волокон), мм	0,293
8. Направление волокон	Однонаправленные 0° (черные волокна несущей основы)
9. Модуль Юнга, МПа	230 000

Для наклейки тканевых полотен SikaWrap® 530 C (VP) на бетон используется клей марки Sikadur®-330 со следующими характеристиками (табл. 2).

Таблица 2

Технические характеристики смолы для пропитки Sikadur®-330

Показатель	Нормативные значения
1. Цвет: компонент А компонент В компонент А + В	Белый Серый Светло-серый
2. Плотность компонента (А + В), кг/дм ³	Отвержденное состояние — 1,31
3. Прочность на растяжение через 7 сут при температуре +23 °С, МПа, не менее	30
4. Модуль Юнга компонента (А + В) через 7 сут при температуре +23 °С, МПа	3 800
5. Температура бетона и воздуха при наклейке, °С	От +10 до +35
6. Температура хранения составляющих, °С	От +5 до +25
7. Пропорции смешивания (весовые)	А : В = 4 : 1
8. Срок годности к применению после смешивания компонентов (А + В) при температуре +23 °С, мин	30
9. Адгезия к бетону, МПа, не менее	2,5

Испытания балок будут проходить в два этапа на прессе WPM-300. На первом этапе будет испытано пять серий балок, по четыре балки в каждой серии. Наклейка КМ будет производиться на целые балки (без трещин): серия А — без усиления; серия Б — с усилением одним слоем КМ 150/1400 мм; серия В — двумя слоями КМ 150/1400 мм; серия Г — одним слоем КМ 150/1400 мм с анкерровкой слоя U-образной обмоткой КМ в опорных зонах; серия Д — слой U-образной обмотки на длине 1400 мм (рис. 5).

Количество образцов-близнецов n для каждой серии определено в предположении нормального закона распределения исследуемых характеристик по формуле [7]

$$n = \frac{t^2 v^2}{\beta^2}, \quad (1)$$

где t — число, соответствующее принятому уровню достоверности при числе степеней свободы $K = \infty$; β — принятая погрешность испытания, %; v — коэффициент вариации.

В опытах по исследованию прочности и деформативности достоверность (доверительную вероятность) рекомендуется принимать равной 0,95, что соответствует значению $t = 1,96$. Погрешность испытания обуславливается целями эксперимента и возможностями оборудования. При проведении экспериментальных исследований погрешность рекомендуется принимать равной 5–7 %. Коэффициент вариации можно определить только после проведения испытаний. На первом этапе экспериментальных работ v принят равным 5 %, количество образцов-близнецов, соответственно, было принято 4.

На втором этапе исследований будет выполнено усиление образцов с трещинами раскрытием 0,5–0,6 мм. Трещины в балках будут получены при предварительных испытаниях перед усилением. Конструкции усиления будут такие же, как и в сериях Б–Д предыдущего этапа (см. рис. 2). Необходимость в проведении таких испытаний очевидна, так как в эксплуатируемых мостовых

конструкциях из обычного железобетона практически всегда имеются трещины. Данное исследование позволит оценить влияние старых трещин в бетоне на несущую способность усиленных конструкций. Количество образцов-близнецов для каждой серии балок второго этапа определится в зависимости от погрешности испытаний β образцов первого этапа.

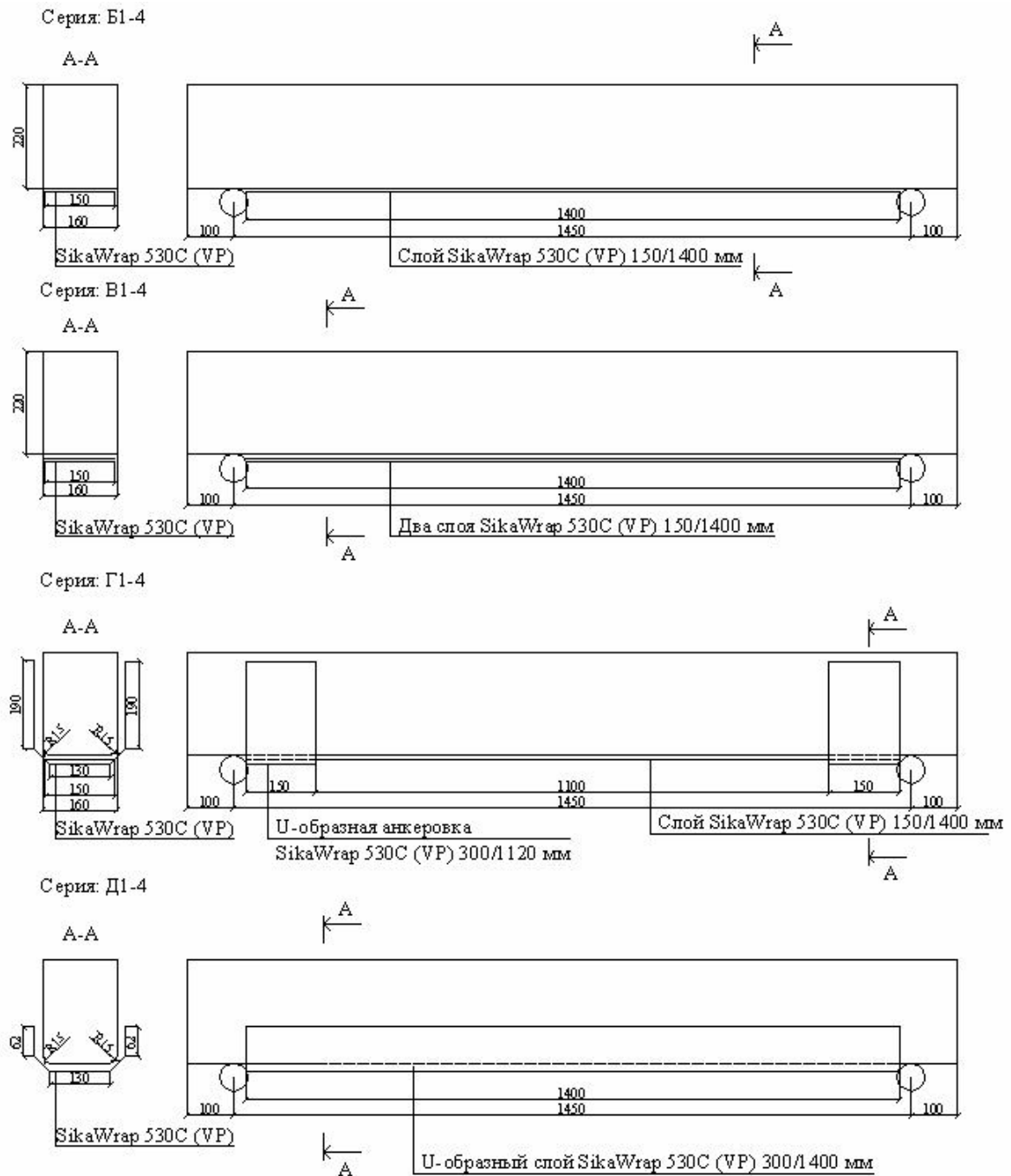


Рис. 5. Конструкции усиления балок КМ

Испытания образцов будут проводиться по схеме однопролетной балки. Расчетный пролет балки 1450 мм. Нагрузка на балку будет передаваться через распределительную траверсу, установленную на образец посредством двух опор с межосевым расстоянием 286 мм. Деформации бетона и КМ будут замеряться при помощи съемных электронных индикаторов, установленных на базе 260 мм, и тензометрических датчиков деформаций, установленных на базе 62 мм. Прогиб балки в середине пролета будет фиксироваться на каждом этапе нагружения при помощи электронного индикатора и тензометрического датчика перемещения. Значение испытательной нагрузки на балку будет сниматься по показаниям тензодинамометра (месдозы) и шкалы пресса WPM-300 (рис. 6). Тензометрические датчики деформаций, перемещения и тензодинамометр входят в состав малогабаритного измерительного комплекса «Тензор-МС», разработанного в СГУПСе.

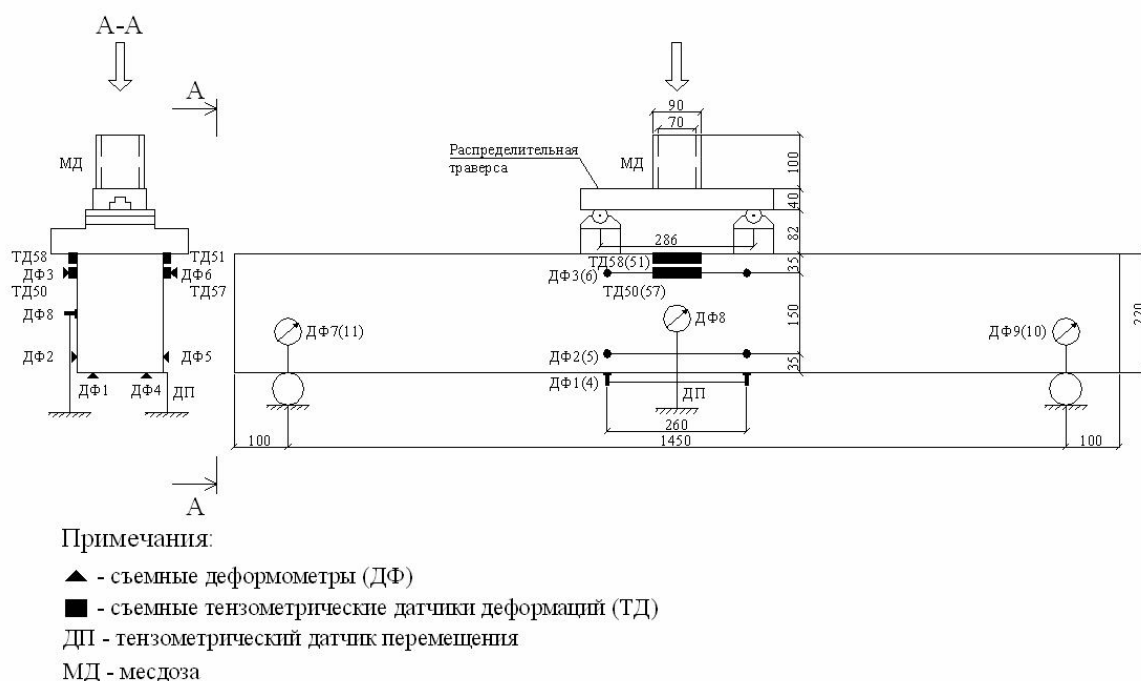


Рис. 6. Схема установки приборов при проведении испытаний

Известно, что принцип действия тензодатчика основан на свойстве материала изменять омическое сопротивление металлов в зависимости от напряженного состояния. Уменьшение или увеличение сопротивления проволоки при механическом воздействии на нее объясняется изменением ее геометрических размеров (длины, диаметра) и удельного сопротивления материала. Это свойство называют тензочувствительностью [8, 9]. В датчиках для измерений используются тензодатчики с чувствительными элементами в виде петлеобразной решетки из тонкой проволоки, приклеенной к бумаге.

При измерениях механических величин с применением тензодатчиков первичными преобразователями являются упругие элементы, преобразующие измеряемую величину в деформацию упругого элемента. Эта деформация воспринимается наклеенными на упругий элемент тензодатчиками. На рис. 7 приведены схемы чувствительных элементов преобразователей механических величин,

используемые в датчиках. Рис. 7, *а* — схема датчика деформаций, преобразователь которой выполнен в виде металлической арки, в своде которой наклеен тензодатчик. Рис. 7, *б* — схема датчика перемещения, преобразователь которого выполнен в виде металлической консоли, на которую наклеен тензодатчик, перемещение конца консоли осуществляется через упругую металлическую пружину. Рис. 7, *в* — схема тензодинамометра с преобразователем в виде металлического цилиндра, по периметру которого наклеены тензодатчики.

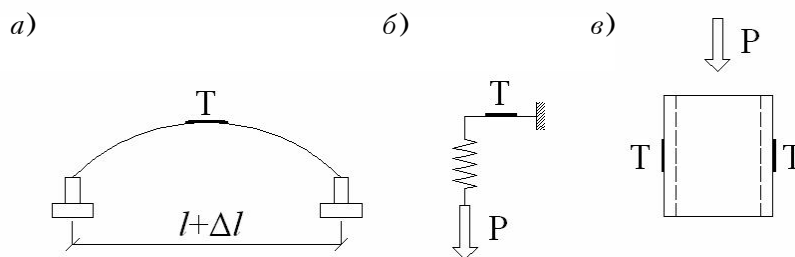


Рис. 7. Схемы чувствительных упругих элементов тензодатчиков, используемых для измерения механических величин:

а — деформаций; *б* — перемещений; *в* — сил

Для определения метрологических свойств перед проведением эксперимента каждый тензодатчик необходимо градуировать (тарировать). При этом следует получить основные характеристики: коэффициент тензочувствительности, предельно допустимый интервал измерений, наличие гистерезиса, погрешность измерения.

Погрешности измерений подразделяются на погрешности средств измерений и погрешности условий применения. Так как испытания будут проводиться в тех же условиях, что и тарировка измерительного комплекса, определялись только погрешности средств измерений, к которым относят погрешность от несоответствия номинальной тензочувствительности ее действительному значению и погрешность от нелинейности градуировочных характеристик и механического гистерезиса тензодатчиков.

Градуировка датчиков деформаций измерительного комплекса проводилась на калиброметре и гидравлическом прессе (датчики деформаций устанавливались на сжимаемую прессом металлическую призму). После проведения испытаний для каждого датчика были построены статические градуировочные характеристики. На их основании была определена погрешность и интервал измерений датчиков. На рис. 8 приведена статическая градуировочная характеристика тензометрического датчика деформаций № 50 измерительного комплекса «Тензор-МС». Тангенс угла наклона линии графика к горизонтальной оси есть коэффициент тензочувствительности датчика, определяемый по формуле

$$K = \frac{\sum_{i=1}^i \frac{N_i}{\varepsilon_i}}{i}, \quad (2)$$

где N_i — сигнал тензодатчика на данной ступени нагружения; ε_i — действительная деформация образца на данной ступени нагружения; i — число ступеней нагружения.

Как видно из рис. 8, датчики имеют механический гистерезис, величина которого определяется по формуле

$$G_m = N_n - N_p, \quad (3)$$

где N_n и N_p — выходные сигналы при нагружении и разгрузке для данной ступени деформирования.

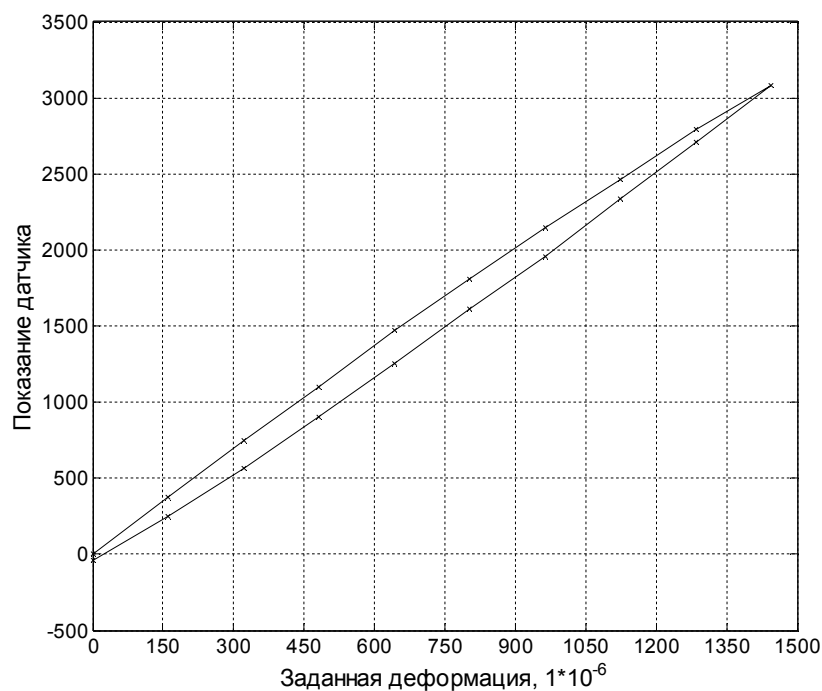


Рис. 8. Статическая градуировочная характеристика тензометрического датчика деформаций № 50

Интервал измерений для каждого из датчиков определялся по статической градуировочной характеристике и соответствовал участку, на котором характер работы датчика был линейный.

Для определения погрешности измерений использовалась формула эмпирической дисперсии [10]:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (4)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ — среднее арифметическое значение отклонения измеренной датчиком величины деформации от ее заданного значения.

На основании проведенной градуировки приборов измерительного комплекса «Тензор-МС» было установлено следующее:

1. Тензодинамометр на интервале измерений от 1 до 20 т работает линейно и его показания могут обрабатываться с помощью коэффициента тензочувствительности $K = 0,006137$, среднеквадратическая погрешность составляет 3 %.
2. Датчик перемещения на интервале от 0 до 30 мм работает линейно и его показания могут обрабатываться с помощью коэффициента тензочувствительности $K = 0,019215$, среднеквадратическая погрешность составляет 1,2 %.

3. Датчики деформаций на интервале от 0 до $1000 \cdot 10^{-6}$ работают линейно (при базе датчика 62 мм) и их показания могут обрабатываться с помощью коэффициентов тензочувствительности: $K_{50} = 0,443291$ с погрешностью 2,6 %; $K_{51} = 0,474169$ с погрешностью 2,7 %; $K_{57} = 0,709619$ с погрешностью 0,8 %; $K_{58} = 1,208709$ с погрешностью 1 %.

Библиографический список

1. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат, 2004. 139 с.
2. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Rome, 2004. 144 с.
3. Смердов Д.Н. К вопросу усиления железобетонных и бетонных элементов мостов // Современное состояние и инновации транспортного комплекса. Т. 1. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. С. 48–54.
4. Разработка рекомендаций по применению композитных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений: Отчет о НИР / ФГУП «РОСДОРНИИ», руководитель В.И. Шестериков — контракт № 5-Н от 24.09.2007 г.; этапы № 2 и № 3. М., 2007. 100 с.
5. Технические указания по применению материалов, изготавливаемых фирмой «Sika», для ремонта эксплуатируемых железобетонных мостов / НИИ мостов. Т. 1. СПб., 2008. 90 с.
6. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы. М., 1996. 214 с.
7. Лецинский М.Ю. Испытание бетона: Справ. пособие. М.: Стройиздат, 1980. 360 с.
8. Ренский А.Б., Баранов Д.С., Макаров Р.А. Тензометрирование строительных конструкций и материалов. М.: Стройиздат, 1977. 239 с.
9. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов и др.; под ред. докторов техн. наук Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. М., 2008. 440 с.
10. Румишинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. М.: Наука, 1971. 192 с.