

РАСЧЕТ БАЛКИ, УСИЛЕННОЙ КОМПОЗИТНОЙ ЗАТЯЖКОЙ

Яременко А.Ф.<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Яременко Е.А.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.  
Яременко Н.А.<sup>2</sup>, к.т.н., ст. преп.

<sup>1</sup>Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
Украина

<sup>2</sup>Одесский национальный морской университет, Украина

Принимая во внимание большое число находящихся в эксплуатации поврежденных пролетных строений и практическую нереальность замены их новыми из-за отсутствия средств, возникает серьезная общегосударственная проблема продления их службы, реконструкции и дальнейшей эксплуатации.

Один из путей ее решения: использование систем усиления композитными лентами из углеродных волокон CFRP (англ. Carbon Fibre Reinforced Plastic). Примеры подобного усиления приведены на рис. 1 и рис. 2.

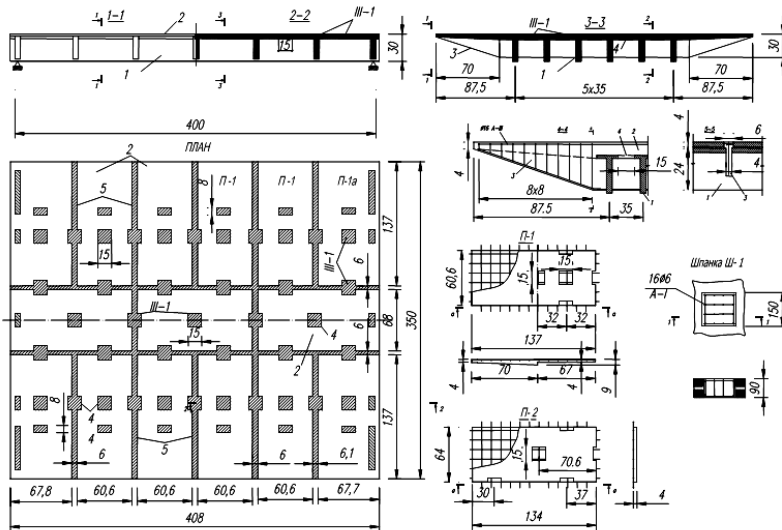


Рис. 1. Конструкция модели ДК-18, расширенной накладной плитой

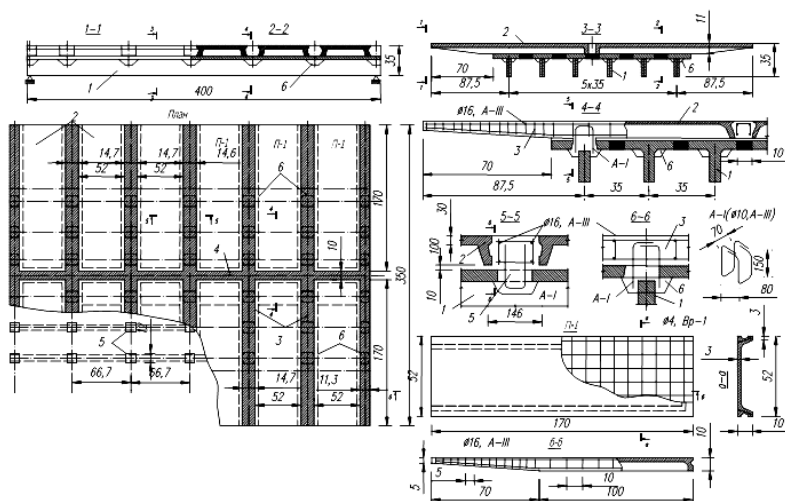


Рис. 2. Конструкция модели ДК-19 расширенной накладной плитой

Лента, как конструкционный материал, имеет такие физико-механические характеристики:

- предел прочности при растяжении -  $\sigma_n = 1600 \dots 3100 \text{ МПа}$  ;
- модуль упругости  $E = 1,55 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  ;
- удлинение при разрыве 0,8...1,9% ;
- ползучесть 0,04% .

Железобетонные балки, усиленные в растянутой зоне наклейкой на внешние бетонные поверхности лент из углеродных волокон CFRP, представляют собой особый тип составной конструкции, в которой ее элементы (собственно балка и приклеенные к ней ленты) взаимно влияют на эффективность совместной работы. Как показали ранее проведенные исследования на моделях усиленных железобетонных балок [1], [4] главную роль в обеспечении совместной работы растянутой зоны балки с наклеенной лентой играет ее заанкеривание на приопорных участках. Влияние способа заанкеривания ленты, а также сдвигающих и отрывающих усилий, которые в слое клея (в контактной зоне между соприкасающимися поверхностями балки и ленты) можно оценить только экспериментально, причем испытаниями опытных образцов натурных размеров.

Целью проведенных во Львовской политехнике испытаний [1] было экспериментальное исследование напряженно-деформированного со-

стояния, прочности и деформаций мостовых балок по ТП вып.56 до и после усиления их наклейкой лент CFRP с дополнительной механической их анкерровкой на всех стадиях работы под нагрузкой при разных схемах загрузки.

Конструкция существующей опытной балки (основной) показана на рис. 3, усиленной – на рис. 4. За основную балку (Б-1) принята натурная балка с многорядной сварной арматурой расчетным пролетом 13,5 м (длина балки 14,06 м), конструкция которой полностью отвечает рабочим чертежам типового проекта вып.56 [3]. Балка выделена из состава пролетного строения, которое находилось в эксплуатации более 40-ка лет. При проектировании ее рассчитывали на временные нормируемые подвижные нагрузки Н-13 и НГ-60.

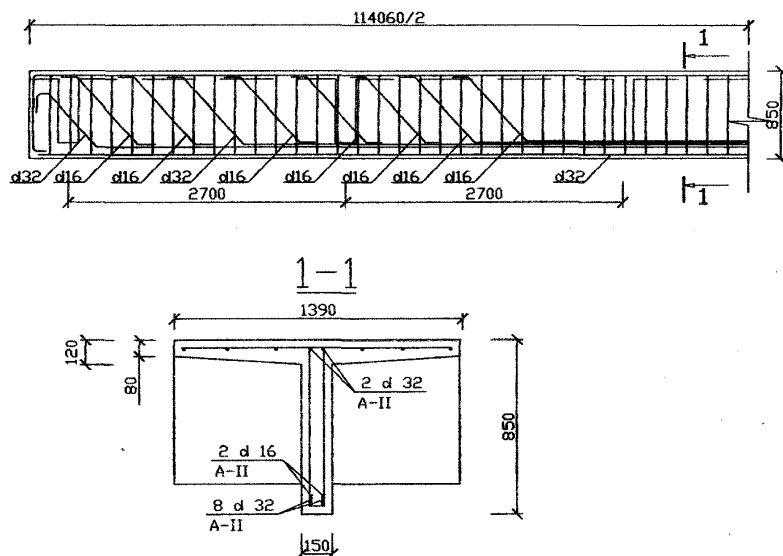


Рис. 3. Конструкция опытного образца балки Б-1(по ТП вып.56)

Для усиленной балки БУ-1 использовали аналогичную балку, к которой в зоне расположения продольной растянутой арматуры на нижнюю и боковые грани наклеены ленты CFRP размерами сечения 120x1,4 мм. Причем, на обе боковые поверхности наклеено по одной ленте, доведенной до опоры, на нижнюю грань – две ленты, из которых верхняя доведена до опорных сечений, а нижняя оборвана в пролете на расстоянии 195см от опоры (рис. 4).

Кубиковую прочность бетона опытных балок составила 22,3 МПа для балки Б-1 и 28,9 МПа для балки БУ-1. Призмную прочность определяли по формуле :  $R_b = R(0,77 - 0,0001R)$  (где  $R$  - кубиковая прочность, МПа). Бетон класса В20:  $R_b = 15 \text{ МПа}$ ,  $R_{bt} = 1,4 \text{ МПа}$ ,  $E_b = 27 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ .

Предел текучести продольной рабочей арматуры марки Ст.5, класс А-П, и ее модуль упругости для предварительного анализа принимали по стандартам на арматуру, действовавшим в период изготовления балок (ГОСТ 5781-53; предел текучести  $\sigma_y = 350 \text{ МПа}$ ; модуль упругости  $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ).

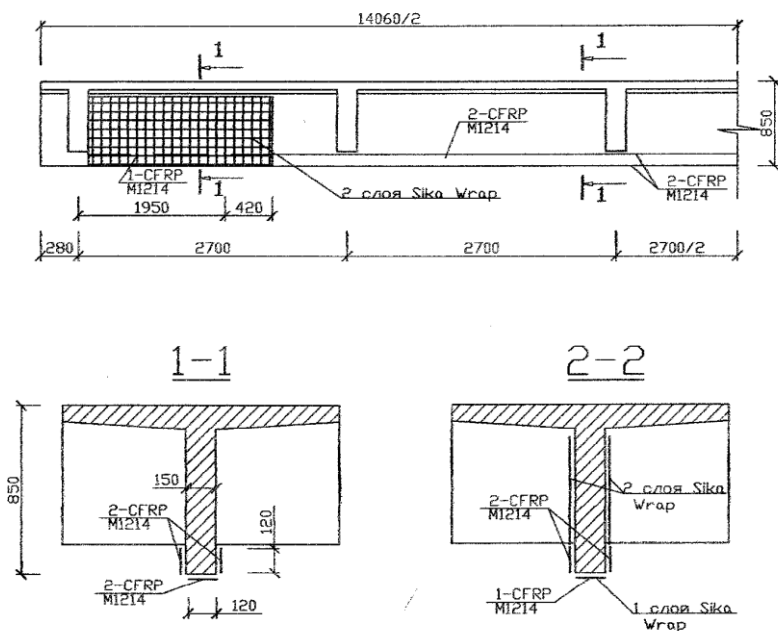


Рис. 4. Конструкция опытного образца балки БУ-1, усиленной наклейкой лент CFRP и материала Sika Wrap

Площадь сечения основной арматуры  $A_s 8d 32=64,34 \text{ см}^2$ . Площадь сечения четырех лент  $A_{si} = 4 \times 1,68 = 6,72 \text{ см}^2$  составляет 10 % от основной арматуры и увеличивает жесткость балки на 5 %. Между тем прогибы усиленной балки уменьшаются на 20 %. Объяснение этого явления можно найти, рассматривая балку как комбинированную статически неопределимую систему [2].

Устройство горизонтальных затяжек в целях усиления существующих железобетонных элементов, превращает эти элементы в комбинированные системы, состоящие из балочного железобетонного элемента и углепластиковой затяжки.

Эти системы являются статически неопределимыми, так как в них возникают дополнительные усилия, которые определяются помимо условий статики, деформациями системы.

В связи с этим ленты затяжек должны рассматриваться в их совместной работе с балочными элементами железобетонных конструкций, на которых они установлены.

Совместная работа проявляется в возникновении статически неопределимых растягивающих усилий  $X$  в затяжке от любого нагружения железобетонного элемента после того, как создана комбинированная система, т.е. когда включена в работу затяжка.

Поскольку реактивное опорное давление от затяжки передается внецентренно на опорные сечения балочного (усиливаемого) элемента, постольку в последнем, кроме сжатия, возникают концевые моменты, уменьшающие соответствующие пролетные изгибающие моменты от внешней нагрузки.

Таким образом изгибаемые элементы железобетонных конструкций, усиливаемые затяжками, обращаются во внецентренно сжатые, изменяя свою первоначальную расчетную схему.

Расчетная схема образовавшейся комбинированной системы при устройстве горизонтальной затяжки от действия любой внешней нагрузки представлена на рис.5,а.

Усилие  $X$  действующее в затяжке, может быть найдено, исходя из уравнения взаимосвязи линейных деформаций балочного элемента и тяжелой затяжки, образующих комбинированную систему.

Под влиянием внешней нагрузки, действующей непосредственно на балочный элемент, происходит его прогиб с соответствующим поворотом концевых сечений (рис. 5,б) и образованием углов поворота  $\alpha$  и  $\beta$  этих сечений.

Ввиду сопряжения лент затяжки с концевыми сечениями балочного элемента эти ленты получают некоторые линейные деформации удлинения  $\delta$ .

Сам балочный элемент под действием реактивных сжимающих сил от затяжки получит некоторое укорочение.

Выражение взаимосвязи линейных деформаций тяжелой затяжки и балочного железобетонного элемента комбинированной системы будет иметь вид

$$\delta_x = \delta_q - \delta_M - \Delta_x. \quad (1)$$

Значения отдельных деформаций, входящих в уравнение (1), могут быть определены для любого нагружения элемента системы.

От внешней нагрузки:

$$\delta_q = c(\sin \alpha + \cos \beta) = c(\alpha + \beta),$$

здесь :  $c$  – расстояние между осями железобетонного элемента и затяжки, а  $\sin \alpha = \alpha$  и  $\cos \beta = \beta$  ввиду малости углов поворота концевых сечений изгибаемого элемента.

От концевых изгибающих моментов  $M_0 = X_c$  :

$$\delta_M = c(\alpha_M + \beta_M) = c \left( \frac{M_0 l}{2B} + \frac{M_0 l}{2B} \right) = c \frac{M_0 l}{2B} = \frac{Xl c^2}{B}.$$

От усилия в затяжке:

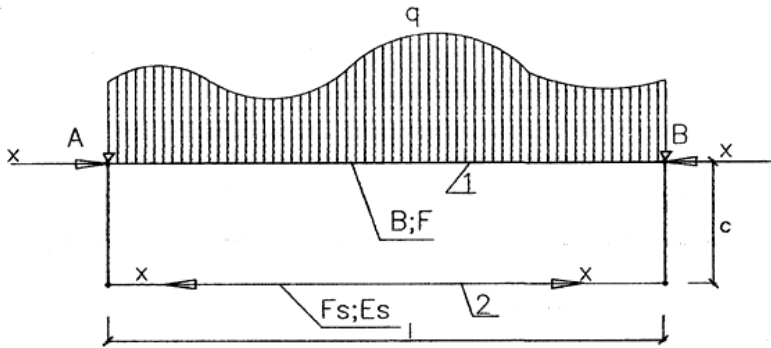
$$\delta_x = \frac{Xl}{F_0 E_s} \quad \text{и} \quad \Delta_x = \frac{Xl}{FE_{\sigma}}.$$

После подстановки частных значений деформаций в выражение (1)

$$\frac{Xl}{F_0 E_s} = c(\alpha + \beta) - \frac{Xl c^2}{B} - \frac{Xl}{FE_{\sigma}},$$

где :  $F$  – площадь сечения балки,  $F_0$  – площадь сечения затяжки,  $B$  – изгибная жесткость балки с трещинами.

а)



б)

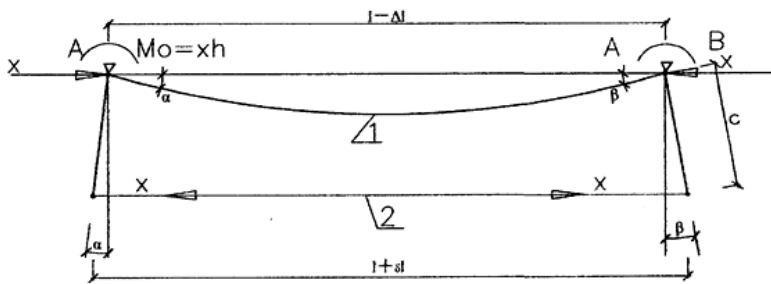


Рис. 5. Расчетная схема и схема деформаций комбинированной системы образуемой горизонтальными затяжками а- расчетная схема; б – схема деформаций; 1- усиливаемый элемент; 2- затяжка

$$X = \frac{(\alpha + \beta)B}{l \left( \frac{B}{cF_0E_s} + c + \frac{B}{cFE_\sigma} \right)} = \frac{(\alpha + \beta)B}{lA}, \quad (2)$$

где

$$A = \frac{B}{cF_0E_s} + c + \frac{B}{cFE_\sigma}. \quad (3)$$

Подставляя в выражение (2) значения  $\alpha$  и  $\beta$  (углы поворота опорных сечений усиливаемого элемента) соответственно ввиду действующих загрузжений, определяется неизвестное усилие  $X$  в затяжке.

Для балки пролетом  $l$  в случае действия:

а) равномерно-распределенной нагрузки  $q$

$$X = \frac{ql^2}{12A}; \quad (4)$$

б) сосредоточенной силы  $P$  в середине пролета

$$X = \frac{0.125Pl}{A}. \quad (5)$$

Для рассматриваемого сечения:  $c = 0,61\text{м}$ ;  $A = 2,2\text{м}$ .

Поскольку две ленты расположены примерно на уровне основной арматуры, в качестве затяжки принимаем две ленты.

При действии в середине пролета балки суммарной силы  $P = 480\text{кН}$  две силы по  $480\text{кН}$  каждая, усилие в затяжке

$$X = \frac{0,125Pl}{A} = \frac{0,125 \cdot 480 \cdot 13,5}{2,2} = 368\text{кН}.$$

Площадь сечения двух лент  $A_{si} = 3,36\text{см}^2$ . Напряжение в затяжке

$$\sigma_{si} = \frac{X}{A_{si}} = \frac{368}{3,36} = 109,6\text{кН/см}^2 = 1096\text{МПа}.$$

Напряжения в лентах затяжки составляют 55 % от предельных  $R_{si} = 2000,0\text{МПа}$ .

Разгружающий момент  $M_{si} = Xc = 368 \cdot 0,61 = 225\text{кНм}$ , что составляет 17 % от действующего  $M = 1296\text{кНм}$ .

Усиленный элемент работает как внецентренно сжатый, причем сжимающая сила  $X$  возрастает с увеличением изгибающего момента  $M$  в балке. В принципе жесткость сечений усиленных балок необходимо определять как для внецентренно сжатых элементов, задавая,



например, условное предварительное напряжение  $\sigma_p$  основной арматуры. В рассмотренном примере:

$$\sigma_p = \frac{X}{A_s} = \frac{368}{64,34} = 5,72 \text{ кН} / \text{см}^2 = 57,2 \text{ МПа} .$$

### ***Выводы***

Усиление железобетонной балки углепластиковой затяжкой превращает ее в комбинированную систему. Напряжения в лентах затяжки формируют разгружающий момент, составляющий 17% от действующего. Усиленный элемент работает как внецентренно сжатый, причем сжимающая сила  $X$  возрастает с увеличением изгибающего момента  $M$  в балке. В принципе жесткость сечений усиленных балок необходимо определять как для внецентренно сжатых элементов, задавая, например, условное предварительное напряжение  $\sigma_p$  основной арматуре.

### **Summary**

The method of strengthening of reinforced-concrete elements is considered by a composit string piece. The example of calculation of durability and rigidness of a girder before strengthening is resulted.