

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 622.016.4: 622.284.4

К. И. СОЛДАТОВ<sup>1\*</sup>, Ю. Л. ЗАЯЦ<sup>2</sup>, В. И. СОРОКА<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, эл. почта kim-kim@i.ua

<sup>2</sup> Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (067) 704 74 33, эл. почта zyl41@mail.ru

<sup>3</sup> Завод железобетонных конструкций, Павлоград, Украина, 51400, тел. +38 (050) 181 10 18, эл. почта stroydetal2011@mail.ru

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ШАХТНОЙ ЗАТЯЖКИ

**Цель.** Опыт эксплуатации различного типа шахтных затяжек свидетельствует о том, что большинство из них имеют недостаточную несущую способность, поэтому основной целью данной работы является конструирование и расчет затяжки, которая была бы оптимальной с точки зрения стоимости и несущей способности. **Методика.** Для исследования выбрана экспериментально-теоретическая методика, которая основывается на новой форме затяжки в виде криволинейного бруса, специальной методике расчета и проведении экспериментов на образцах, изготовленных на заводе мостовых железобетонных конструкций с различными параметрами, как по бетонной смеси, так и по армированию. **Результаты.** Результаты выполненных расчетов, проведения испытаний на значительном количестве образцов натуральной величины подтвердили, что данный тип затяжки имеет большую несущую способность в сравнении с аналогичными образцами в виде прямолинейного бруса. **Научная новизна.** В публикациях в данном направлении нет образцов подобных, описанным выше. Сама конструкция и методика расчета является новой. **Практическая значимость.** Данную модель затяжки уже производит Павлоградский завод железобетонных конструкций. В сравнении с прямолинейными аналогами она имеет такую же стоимость, а несущую способность на 50...100 % большую и не имеет тенденции к внезапному разрушению, что очень важно с точки зрения безопасности.

*Ключевые слова:* затяжка железобетонная; криволинейный брус; эксперимент; образец





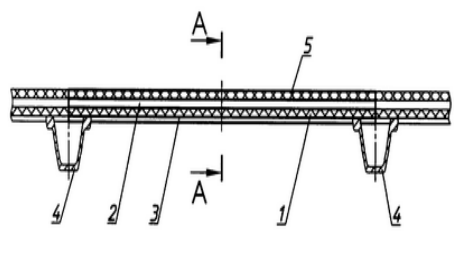

В шахтном строительстве надежность шахтной крепи можно считать основным требованием при ее проектировании. В свою очередь в самой шахтной крепи особое положение занимает шахтная затяжка. В этом направлении разработано большое количество их типов, отличающиеся одна от другой материалом (дерево, металл, полимерные материалы, железобетон), трудоемкостью работ и главное стоимостью. Естественно, что меньшую стоимость при всех прочих условиях будет иметь затяжка, где применено минимальное количество металла или не менее дорогих композитных или полимерных материалов. Если проанализировать рынок (предложение и спрос), то железобетонные затяжки, несомненно, занимают ведущее положение, хотя по спросу этого сказать нельзя. Анализ предложений рынка по железобетонным затяжкам показывает, что по своей сути все они выполнены в виде плиты армированной высокопрочной проволокой (различие в

марке цемента, диаметре проволоки). В табл. 1 приведены основные типы затяжек заимствованные из Интернета с их краткой характеристикой.

Рассмотрим с позиции прочности и стоимости несколько вариантов железобетонной затяжки, варьируя диаметром арматурных стержней и площадью арматуры и приняв на данном этапе для всех образцов класс бетона В30 (расчетное сопротивление).

Исходные геометрические параметры и класс бетона для всех образцов приняты в данном исследовании идентичными: длина – 100 см, высота 5 см, ширина 20 см, вес одного погонного метра балки – 0,25 кгс/см. Сосредоточенная расчетная нагрузка – 500 кгс. Арматура: образец № 1 – 3 стержня высокопрочной арматуры диаметром 3 мм, образец № 2 – 3 стержня высокопрочной арматуры диаметром 5 мм, образец № 3 – 2 стержня высокопрочной арматуры диаметром 5 мм.

## Основные типы шахтных затяжек

Вид шахтной затяжки	Краткое описание, параметры
	<p><b>Шахтная композитная сетка (марка СШ»).</b></p> <p>Лучшая замена металлическим сеткам. Материал трудногорюч, масса в 4...6 раз меньше металлических аналогов. Сетка абсолютно не подвержена коррозии в условиях шахтных вод. Стоимость сетки вполне сравнима со стоимостью традиционных металлических. Прочность сетки достаточна для ограждения пород любой степени устойчивости.</p>
	<p><b>Шахтная сетка-затяжка.</b></p> <p>Для производства используется низкоуглеродистая проволока диаметром от 4,0 мм до 6,5 мм по ГОСТ 3282-74 или катанка по ДСТУ 2770-94 (ГОСТ 30136-95) или по другой действующей нормативной документации. Номинальный размер ячейки по осям проволок не более: 120×70 мм; 120×58,5 мм; 100×60 мм.</p>
	<p><b>Сетка-затяжка металлическая сварная ЗМР.</b></p> <p>Сетка изготавливается в соответствии с ТУУ 12.00185790.070-95 из проволоки марки стали Ст1-3 СП, ПС, КП диаметром 5 мм. Размеры 100×50, 200×100, 100×100, 80×80, 90×130, цена соответственно 23,70; 76,00; 140,00; 34,00; 72,00 грн./шт.</p>
	<p><b>Шахтная затяжка, армированная металлической фиброй.</b></p> <p>Выполнена в форме прямоугольной плиты и армирована длинной стальной фиброй диаметром 0,3...0,6 мм, дополнительно короткой фиброй диаметр 0,2...0,8 мм и длину 5...40 мм. Расход фибры на одну затяжку 1000×200×40 мм – 460 г. При испытании плита выдерживала нагрузку 185...285 кг. На фото стальная фибра волнистая.</p>
	<p><b>Шахтная затяжка из спецпрофиля.</b></p> <p>Используется для рамных крепей, выполнена в виде плиты (1) и включает рабочую арматуру в виде профилей (2), монолитно связанных с плитой и расположенных вдоль ее длины. Плита имеет криволинейную форму. Затяжка выполнена из одной из групп твердеющих материалов, имеющих удельный вес меньше, чем удельный вес бетона (жесткий пенополиуретан и др).</p>
	<p><b>Железобетонная шахтная затяжка.</b></p> <p>Плита затяжки шахтной железобетонной длиной: 1000 мм; 800 мм и 500 мм. Изготавливается согласно технических условий ТУУ В.2.7-26.6-00181668-001-2003, положения которых распространяются на ЗШ (затяжки шахтные) из тяжелого бетона и напрягаемой арматуры, предназначенные для затягивания кровли и блоков горных выработок.</p>

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Расчетное сопротивление арматуры  $R_s = 14600$  кгс/см<sup>2</sup> (3 мм), 12550 кгс/см<sup>2</sup> (5 мм); бетона  $R_b = 160$  кгс/см<sup>2</sup>. Площадь арматуры соответственно для трех образцов – 0,20925 см<sup>2</sup>, 0,58875 см<sup>2</sup>, 0,3925 см<sup>2</sup>.

Высота сжатой зоны бетона определяется по известной формуле

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b}, \quad (1)$$

где  $x$  – высота сжатой зоны бетона, см;  $R_s$  – расчетное сопротивление арматуры, кгс/см<sup>2</sup>;  $A_s$  – площадь растянутой арматуры, см<sup>2</sup>;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона, кгс/см<sup>2</sup>;  $b$  – ширина поперечного сечения балки, см.

Высота сжатой зоны бетона (соответственно для трех образцов) имеет существенный разброс, ибо при такой постановке она зависит только от расчетных параметров арматуры (площади и расчетного сопротивления).

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} = \frac{14600 \cdot 0,20925}{160 \cdot 20} = 0,954 \text{ см;} \\ x_2 &= \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} = \frac{12550 \cdot 0,58875}{160 \cdot 20} = 2,309 \text{ см;} \\ x_3 &= \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} = \frac{12550 \cdot 0,3925}{160 \cdot 20} = 1,539 \text{ см.} \end{aligned} \quad (2)$$

Моменты, которые выдерживают сечения соответственно трех образцов, составят

$$\begin{aligned} M_1 &= R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) = 160 \cdot 20 \times \\ &\times 0,954 \cdot \left(3,5 - \frac{0,954}{2}\right) = 9228 \text{ кгссм;} \\ M_2 &= R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) = 160 \cdot 20 \times \\ &\times 2,309 \cdot \left(3,5 - \frac{2,309}{2}\right) = 17329,7 \text{ кгссм;} \\ M_3 &= R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) = 160 \cdot 20 \times \\ &\times 1,539 \cdot \left(3,5 - \frac{1,539}{2}\right) = 13447,1 \text{ кгссм.} \end{aligned} \quad (3)$$

Момент, который действует на балку от указанной расчетной нагрузки, определяется по формуле, где учтен и момент от собственного веса балки

$$M = \frac{ql^2}{8} + \frac{Pl}{4} \quad (4)$$

где  $q$  – интенсивность постоянной нагрузки от собственного веса, кгс/см;  $P$  – сосредоточенная расчетная (испытательная) нагрузка, кгс;  $l$  – длина балки, см.

Подставляя в (4) значения параметров, имеем

$$\begin{aligned} M &= \frac{ql^2}{8} + \frac{Pl}{4} = \frac{0,25 \cdot 10000}{8} + \\ &\frac{500 \cdot 100}{4} = 12812,5 \text{ кгссм.} \end{aligned} \quad (5)$$

При армировании тремя стержнями диаметром 3 мм несущая способность недостаточна ( $9228 < 12812,5$  кгссм).

При армировании тремя и двумя стержнями высокопрочной арматуры периодического профиля (с насечкой) диаметром 5 мм несущая способность достаточна ( $17329,7$  и  $13447,1 > 12812,5$  кгссм), однако при двух стержнях практически отсутствует запас прочности.

Для исследования возможности увеличения несущей способности предложено принять форму плиты в виде криволинейного бруса. Для криволинейного бруса принимаем аналогичные геометрические параметры (длина – 100 см, высота 5 см, ширина 20 см, класс бетона В30), что дает возможность учесть эффект влияния только кривизны. Принимаем стрелу погиби  $h = 6$  и 8 см. Хорда сегмента таким образом будет равна для всех трех случаев  $a = 100 - 14 = 86$  см (по длине криволинейной части с учетом того, что площадки опирания приняты длиной по 7 см). Расчет выполнен для двух случаев армирования: двумя и тремя стержнями высокопрочной арматуры периодического профиля (с насечкой) диаметром 5 мм.

Угол сегмента определяем по известной формуле (7)

$$h = \frac{a}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}; \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} = \frac{2h}{a}. \quad (6)$$

и для двух значений стрелы подъема (6 и 8 см) соответственно равен

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} &= \frac{2h}{a} = \frac{2 \cdot 6}{86} = 0,1395; \alpha = 32^\circ; \\ \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} &= \frac{2h}{a} = \frac{2 \cdot 8}{86} = 0,1860; \alpha = 42^\circ \end{aligned} \quad (7)$$

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В свою очередь радиус определяется из зависимости (8) при известной хорде и угле

$$a = 2r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}; \quad (8)$$

$$r = \frac{a}{2 \cdot \sin 16} = \frac{86}{2 \cdot 0,2756} = 156 \text{ см};$$

$$r = \frac{a}{2 \cdot \sin 21} = \frac{86}{2 \cdot 0,3584} = 120 \text{ см}. \quad (9)$$

Приведенный момент инерции сечения определяется из зависимости

$$I_{red} = \frac{bx^3}{3} + A_s \cdot n^1 \cdot (h-x)^2; \quad (10)$$

– при трех стержнях арматуры диаметром 5 мм

$$I_{red} = \frac{bx^3}{3} + A_s \cdot n^1 \cdot (h-x)^2 = \frac{20 \cdot 2,309^3}{3} +$$

$$+ 0,58875 \cdot 5,8 \cdot (3,5 - 2,309)^2 = 86,9 \text{ см}^4;$$

– при двух стержнях арматуры диаметром 5 мм

$$I_{red} = \frac{bx^3}{3} + A_s \cdot n^1 \cdot (h-x)^2 = \frac{20 \cdot 1,539^3}{3} +$$

$$+ 0,39250 \cdot 5,8 \cdot (3,5 - 1,539)^2 = 31,5 \text{ см}^4. \quad (11)$$

Следует отметить, что в данном случае на приведенный момент инерции сечения существенно влияет высота сжатой зоны бетона (в первом случае арматура увеличивает его всего на 5 %, а во втором – на 30 %), но в то же время

именно площадь арматуры увеличивает высоту сжатой зоны бетона согласно формуле (2).

Модуль упругости бетона – 335000 кгс/см<sup>2</sup>.

Критическая нагрузка для криволинейного бруса определяется по формуле (12) [1]

$$q = k \cdot \frac{EI_{red}}{r^3}. \quad (12)$$

Коэффициент  $k$  зависит от угла  $\alpha$  и определяется по формуле (13) в зависимости от расчетной схемы. Для пологого кругового бруса в работе [1] для определения коэффициента  $k$  предлагается следующее решение при изгибе по одной полуволне (наш случай)

$$k = \frac{(\pi^2 - 4\alpha^2)^2}{4\alpha^2 \cdot (\pi^2 + 4\alpha^2)}. \quad (13)$$

Тогда для двух значений угла данный коэффициент будет равен  $k(32^\circ) = 4,61$ ;  $k(42^\circ) = 2,30$ .

Как видно, в данном случае нельзя дать однозначный ответ поскольку стрела погиби с одной стороны уменьшает радиус (приводит к увеличению критической погонной нагрузки), а с другой стороны – уменьшает коэффициент  $k$  (приводит к уменьшению критической погонной нагрузки). Если проанализировать данный пример, то за счет радиуса мы имеем увеличение в 2,197 раза, а за счет коэффициента  $k$  – уменьшение в 2 раза.

Данные для расчета сведены в табл. 2 при различных параметрах.

Таблица 2

Данные расчета интенсивности критической нагрузки

Стрела $h$ , см	Угол $\alpha$ , град.	Коэффициент $k$	Радиус $r$ , см	Приведенный момент инерции $I_{red}$ , см <sup>4</sup>	Интенсивность критической нагрузки $q$ , кгс/см
6	32	4,61	156	86,9	35,35
8	42	2,30	120	86,9	38,74
6	32	4,61	156	31,5	12,81
8	42	2,30	120	31,5	14,04

Как видно из табл. 2, при армировании двумя стержнями несущая способность криволинейного бруса превышает несущую способность прямолинейной балки с теми же геомет-

рическими размерами и армированием на 40 % (при стреле 8 см) и на 28 % (при стреле 6 см). При трех стержнях диаметром 5 мм несущая

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

способность резко увеличивается, хотя мало зависит от стрелы подъема.

Обнадеживающие теоретические расчеты требовали экспериментального подтверждения. Для проведения испытаний на заводе железобетонных конструкций в г. Павлограде были изготовлены шесть образцов (по два образца трех типов): два в виде прямолинейной балки (об-

разцы № 5 и 6) и 4 в виде криволинейного бруса (образцы № 1-4). Для исключения влияния второстепенных факторов все образцы выполнены из бетона одного состава, имеют одинаковое армирование и прошли однотипную термическую обработку.

Данные по образцам сведены в табл. 3.

Таблица 3

## Геометрические и весовые характеристики изготовленных образцов

№ образца	Длина, см	Толщина образца, мм	Средняя толщина, мм	Стрела подъема арки, мм	Ширина образца, см	Вес образца, кг
1	100,0	28,0; 30,0; 28,0; 28,1; 29,0	28,60	45,0	20,0	12,85
2	99,5	28,1; 31,0; 30,0; 29,2; 30,0	29,66	45,0	20,0	13,70
3	100,2	44,0; 47,5; 45,0; 42,5; 41,5	44,10	45,0	20,0	20,00
4	100,8	45,0; 48,0; 44,5; 42,5; 42,0	44,40	46,0	20,0	20,10
5	99,0	45,5; 44,5; 44,0; 44,5; 45,5	44,80	0,00	19,5	19,25
6	98,6	47,5; 48,0; 48,0; 47,5; 47,0	47,60	0,00	19,5	20,55

Стенд для испытаний изготовлен из металлического проката длиной (по внутренним граням) 100,5 см. Стенд имеет фиксированное расстояние в 90 см между точками опирания для проведения испытаний статической сосредоточенной нагрузкой.

Проектный класс бетона образцов – В30, расчетное сопротивление высокопрочной арматуры образцов класса Вр-II 12550 кгс/см<sup>2</sup>, армирование – 3 стержня высокопрочной проволоки с насечкой диаметром 5 мм.

Прочность бетона образцов измерялась методом неразрушающего контроля (Склерометр Шмидт-2). Во всех случаях было проведено 10 измерений на каждом образце и в таблицу поме-

щены данные средней величины из 10 измерений, что позволяет считать данные по прочностным характеристикам образцом надежными.

Испытания на прочность проводились на прессе до полного разрушения с использованием вышеуказанного стенда, в который вставлялся испытываемый образец. Люфты в сечениях по торцам устранялись путем расклинки металлическими пластинами. Сосредоточенная нагрузка передавалась с прессы на образец в середине образца через круглую закладную деталь диаметром 100 мм.

В табл. 4 приведены дополнительные данные, которые приняты в расчетах.

Таблица 4

## Жесткостные характеристики образцов

№ образца	Измеренная прочность бетона, кгс/см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка при испытаниях, кгс	Расчетный изгибающий момент, кгссм	Момент, при котором произошло разрушение, кгссм
1	224	724	-	-
2	212	689	-	-
3	203	1310	-	-
4	230	1300	-	-
5	224	724	14778	16543
6	258	758	18798	17308

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Все образцы были просчитаны на несущую способность с учетом реальных размеров и жесткостных характеристик. Образцы № 5 и 6

рассчитаны по схеме простой балки, а образцы 1-4 по расчетной схеме криволинейного бруса.

В табл. 5 приведены фото образцов, стенда и прессов для испытаний.

Таблица 5

## Фрагменты испытания образцов

	
<p>Фото 1. Изготовленные образцы и стенд для испытания</p>	<p>Фото 2. Момент начала испытаний (прямолинейный образец установлен на пресс)</p>
	
<p>Фото 3. Прямолинейный образец после испытания (трещины)</p>	<p>Фото 4. Испытания криволинейного бруса</p>
	
<p>Фото 5. После снятия нагрузки</p>	<p>Фото 6. Образец после снятия нагрузки пытается принять первоначальное очертание</p>

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Площадь арматуры во всех шести образцах одинакова и равна  $A_s = 0,58875 \text{ см}^2$ .

Высота сжатой зоны бетона для двух прямолинейных образцов (№ 5 и 6) составляет

$$x_5 = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} = \frac{12550 \cdot 0,58875}{224 \cdot 20} = 1,649 \text{ см};$$

$$x_6 = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} = \frac{12550 \cdot 0,58875}{258 \cdot 20} = 1,432 \text{ см.} \quad (14)$$

Расчетный изгибающий момент, который выдерживают соответственно образцы № 5 и № 6

$$M_5 = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - \frac{x}{2}) = 224 \cdot 20 \times$$

$$\times 1,469 \cdot (2,98 - \frac{1,469}{2}) = 14778 \text{ кгссм};$$

$$M_6 = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - \frac{x}{2}) = 258 \cdot 20 \times$$

$$\times 1,432 \cdot (3,26 - \frac{1,432}{2}) = 18798 \text{ кгссм.} \quad (15)$$

Момент, который определен в результате испытаний по известной разрушающей силе, определялся по формуле, где учтен и момент от собственного веса балки

$$M = \frac{ql^2}{8} + \frac{Pl}{4}, \quad (16)$$

где  $q$  – интенсивность постоянной нагрузки от собственного веса, кгс/см;  $P$  – сосредоточенная расчетная (испытательная) нагрузка, кгс;  $l$  – расчетный пролет балки, см.

Подставляя в (16) значения параметров, имеем для двух балок

$$M_5 = \frac{ql^2}{8} + \frac{Pl}{4} = \frac{0,25 \cdot 8100}{8} +$$

$$+ \frac{724 \cdot 90}{4} = 16543 \text{ кгссм.}$$

$$M_6 = \frac{ql^2}{8} + \frac{Pl}{4} = \frac{0,25 \cdot 8100}{8} +$$

$$+ \frac{758 \cdot 90}{4} = 17308 \text{ кгссм.} \quad (17)$$

Как видно, расхождение в теоретической несущей способности балок и полученной при испытаниях составляет 10,7 % и 8,6 %. Запас

прочности указанных образцов составляет 40...50 %.

Шахтная затяжка в виде криволинейного бруса выполнена для двух типов бруса, где все исходные параметры и размеры приняты идентичными за исключением толщины (30 мм и 45 мм). Стрела подъема арки до оси задана 6 см. Хорда сегмента для всех случаев равна  $a = b - 14$  см (по длине криволинейной части с учетом того, что площадки опирания приняты длиной по 7 см). Здесь  $b$  – длина бруса (99,5...100,8 см). Расчет выполнен для случая армирования тремя стержнями высокопрочной арматуры периодического профиля (с насечкой) диаметром 5 мм с той же площадью арматуры 0,58875 см<sup>2</sup>.

Угол сегмента по формуле (6) для четырех значений стрелы подъема и хорды равен

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} = \frac{2h}{a} = \frac{2 \cdot 6 \cdot 0}{86} = 0,1395; \quad \alpha = 32^\circ \quad (18)$$

В свою очередь радиус находим из зависимости (8) по известной хорде и углу

$$a = 2r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}; \quad r = \frac{a}{2 \cdot \sin 16} = \frac{86}{2 \cdot 0,2756} = 156 \text{ см};$$

Приведенный момент инерции сечения определяем по формуле (10). Модуль упругости бетона – 352000 кгс/см<sup>2</sup>, отношение модулей арматуры и бетона  $n^1 = \frac{E_s}{E_b} = 5,68$ .

Интенсивность критической равномерно-распределенной нагрузки для криволинейного бруса (арки) определялась по формуле (12), а коэффициент  $k$  по формуле (13).

Для угла 32° имеем значение коэффициента  $k = 5,31$ .

Данные расчетной интенсивности равномерно-распределенной нагрузки по формуле (10) и экспериментальной для четырех образцов сведены в табл. 6.

Расчетная стрела погиби криволинейного бруса отсчитывается от площадки опирания до оси арматуры.

Данные (см. табл. 3) свидетельствуют о том, что расчетная схема и методика выбраны правильно и результаты испытаний хорошо согласуются с данными расчета. Расхождение по образцу № 2 объясняется тем, что это единственный образец, который был выполнен из иного состава бетона.

Таблица 6

## Расчетные данные криволинейного бруса (образцы 1-4)

Расчетная стрела $h$ , мм	Угол $\alpha$ , град.	Коэффициент $k$	Высота сжатой зоны бетона, см	Приведенный момент инерции $I_{red}$ , см <sup>4</sup>	Расчетная интенсивность критической нагрузки $q$ , кгс/см	Предельная разрушающая нагрузка при испытаниях, кгс	Предельная интенсивность критической нагрузки $q$ , кгс/см	Расхождение между теоретическим и экспериментальным значением %
60	32	5,31	1,649	29,89	14,71	724	14,48	1,58
60	32	5,31	1,742	35,24	17,68	689	13,78	28,3
60	32	5,31	1,820	48,44	23,84	1310	26,20	9,00
60	32	5,31	1,606	46,65	22,53	1300	26,00	13,34

Запас прочности по первым двум образцам (толщина 30 мм) составляет 37...44 %, а по двум другим (толщина 45 мм) 160 %.

Полученные обнадеживающие результаты, отраженные в заключении по результатам экспериментально-теоретического исследования железобетонной шахтной затяжки, позволяют

рассмотреть дополнительно несколько вариантов аналогичной заделки, варьируя классом бетона и площадью арматуры (диаметром и количеством стержней). С этой целью дополнительно было изготовлено 12 образцов (по два образца каждой модификации). Данные по образцам сведены в табл. 7.

Таблица 7

## Геометрические характеристики образцов №1-12

№ образца	Длина, см	Средняя толщина, мм	Стрела подъема арки, мм	Ширина образца, см	Количество стержней (шт.) и диаметр арматуры, мм	Площадь арматуры, см <sup>2</sup>	Измеренная прочность бетона	Радиус, см
1	100,0	35,0	40,0	20,0	3×3	0,21195	256	171,7
2	100,0	33,0	37,0	20,0	3×3	0,21195	187	177,7
3	100,0	32,0	40,0	20,0	2×5	0,3925	177	171,7
4	100,0	32,0	42,0	20,0	2×5	0,3925	182	166,1
5	99,8	33,0	41,5	20,0	3×4	0,3768	138	166,1
6	99,6	31,0	40,0	20,0	3×4	0,3768	121	171,7
7	100,0	41,0	47,0	20,0	3×3	0,21195	294	156,0
8	100,0	50,0	41,0	20,0	3×3	0,21195	286	166,1
9	99,7	50,0	40,0	20,0	2×5	0,3925	268	171,7
10	100,1	44,0	45,0	20,0	2×5	0,3925	225	171,7
11	100,0	43,0	45,0	20,0	3×4	0,3768	158	160,9
12	99,8	48,0	40,0	20,0	3×4	0,3768	147	160,9

Следует отметить, что при определении прочности бетона образцов неразрушающим методом (Склерометр Шмидт-2) получен большой разброс в результатах: от 121 до 294 кг/см<sup>2</sup>.

В расчетах, приведенных в табличной форме (табл. 8), использованы реальные параметры геометрических и прочностных характеристик.



Расчетные данные криволинейного бруса (образцы 1- 12)

Расчетная стрела $h$ , см	Угол $\alpha$ , град.	Коэффициент $k$	Высота сжатой зоны бетона, см	Приведенный момент инерции $I_{red}$ , см <sup>4</sup>	Расчетная интенсивность критической нагрузки $q$ , кгс/см	Предельная разрушающая нагрузка при испытаниях, кгс	Предельная интенсивность критической нагрузки $q$ , кгс/см
5,0	29	7,05	0,6047	15,62	7,31	689,6	13,79
4,8	28	7,69	0,8273	16,27	7,47	551,2	11,02
4,7	29	7,05	1,3915	25,23	12,37	586,2	11,72
4,7	30	6,45	1,3532	24,13	11,96	620,7	12,41
4,8	30	6,45	1,7133	38,90	14,92	565,5	11,31
4,6	29	7,05	1,9541	52,55	16,10	558,6	11,17
5,6	32	5,40	0,5262	26,97	12,18	558,6	11,17
6,5	30	6,45	0,5409	35,43	18,55	1020,7	20,41
6,5	29	7,05	0,9190	42,30	20,73	965,5	19,31
5,9	29	7,05	1,0946	32,71	16,04	1034,5	20,69
5,8	31	5,86	1,4964	58,67	18,15	758,6	15,17
6,3	31	5,86	1,6084	59,54	18,42	827,6	17,52

Полученные результаты по отдельным образцам дают основание выполнить анализ образцов с точки зрения подсчета приведенного момента инерции, как основного параметра несущей способности. В образцах № 1, 2, 7 и 8 бетон практически не работает (высота сжатой зоны бетона менее 1 см).

Его доля в приведенном моменте инерции составляет всего от 7 до 16 %, т.е. в основном работает арматура. Таким образом, можно заключить, что толщина образца должна быть 50 мм.

В этом случае бетон и арматура практически поровну влияют на несущую способность. В лучшую сторону можно отметить образцы толщиной 50 мм с армированием 3 стержнями арматуры диаметром 4 мм (по площади это меньше чем 2 стержня арматуры диаметром 5 мм).

Как видно все образцы толщиной 50 мм имеют запас прочности 50...100 % (за исключением образца № 7, который имеет толщину всего 41 мм и выпадает из данной серии по геометрическим характеристикам).

Образцы № 1-6 по результатам испытаний имеют несущую способность выше расчетной (10,0 кг/см) на 11,2...37,9 %.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений [Текст] : учебн. для ВУЗов / А. Ф. Смирнов, В. Александров, Б. Я. Лашеников, Н. Н. Шапошников. – М. : Стройиздат, 1984. – 416 с.
2. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев – М. : Наука, 1967. – 608 с.
3. Киселев, В. А. Строительная механика [Текст] : Специальный курс (динамика и устойчивость сооружений) / В. А. Киселев. – М. : Изд-во литературы по стр-ву, 1969. – 431 с.
4. Снитко, Н. К. Строительная механика [Текст] : учебн. для вузов / Н. К. Снитко. – М. : Высш. школа, 1972. – 486 с.
5. Колоушек, В. Динамика строительных конструкций [Текст] / В. Колоушек. – М. : Изд-во литературы по стр-ву, 1965. – 631 с.
6. Громько, А. О. Механика сплошной среды. Криволинейные брусья, пластины и оболочки [Текст] : Курс лекций / А. О. Громько, О. В. Громько и др. – Минск, БГУ, 2005. – 364 с.

К. І. СОЛДАТОВ<sup>1\*</sup>, Ю. Л. ЗАЯЦЬ<sup>2</sup>, В. І. СОРОКА<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, ел. пошта kim-kim@i.ua

<sup>2</sup> Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 704 74 33, ел. пошта zyl41@mail.ru

<sup>3</sup> Завод залізобетонних конструкцій, Павлоград, Україна, 51400, тел. +38 (050) 181 10 18, ел. пошта stroydetal2011@mail.ru

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ШАХТНОЇ ЗАТЯЖКИ

**Мета.** Досвід експлуатації різного типу шахтних затяжок свідчить про те, що більшість з них мають не достатню несучу здатність, тому основною метою даної роботи є конструювання та розрахунок затяжки, яка б була оптимальною з точки зору вартості та несучої здатності. **Методика.** Для дослідження вибрана експериментально-теоретична методика, яка ґрунтується на новій формі затяжки у вигляді криволінійного бруса, спеціальній методиці розрахунку та проведенні експериментів на зразках, які виготовлені на заводі мостових залізобетонних конструкцій з різними параметрами, як по бетонній суміші, так і по армуванню. **Результати.** Результати виконаних розрахунків, проведення випробувань на значній кількості зразків натуральної величини підтвердили, що даний тип затяжки має більшу несучу здатність у зрівнянні з аналогічними зразками у вигляді прямолінійного бруса. **Наукова новизна.** В публікаціях у даному напрямку немає зразків подібних описаним вище. Сама конструкція та методика розрахунку є новою. **Практична значимість.** Дану модель затяжки вже виготовляє Павлоградський завод залізобетонних конструкцій. У зрівнянні з прямолінійними аналогами вона мають таку саму вартість, а несучу здатність на 50...100 % більшу та не має тенденції до раптового руйнування, що дуже важливо з точки зору безпеки.

*Ключові слова:* затяжка залізобетонна; криволінійний брус; експеримент; зразок.

К. І. SOLDATOV<sup>1\*</sup>, Y. L. ZAYAC<sup>2</sup>, V. I. SOROKA<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Dept. of Bridges, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 527 26 01, e-mail kim-kim@i.ua

<sup>2</sup> Dept. of Safety of life activity, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15, e-mail Zayac@mail.diiit.edu.ua

<sup>3</sup> Concrete slabs factory, Pavlograd, Ukraine, 51400, tel. +38 (050) 181 10 18, e-mail stroydetal2011@mail.ru

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES WORK OF REINFORCED CONCRETE MINE TIGHTENING

**Purpose.** Experience in operating various types of mine puffs indicates that most of them have insufficient bearing capacity, so the main goal of this work is to design and calculation of torque, which would be optimal in terms of cost and carrying capacity. **Methodology.** Selected for the study of experimental and theoretical methodology, which is based on a new form of tightening in a curved beam, a special method of calculation and experiments on samples prepared at the factory bridge of reinforced concrete structures with different parameters, both concrete and reinforcement on. **Findings.** The results of the calculations, tests on a significant amount of original size samples confirmed that this type of torque has a large bearing capacity compared to similar models in the form of a straight beam. **Originality.** In the publications in this area have similar patterns described above. The very design and calculation method is new. **Practical value.** This model already produces torque Pavlograd factory of reinforced concrete structures. In comparison with analogous rectilinear, it has the same value, and the carrying capacity of 50...100 % greater, and has no tendency to sudden failure, which is very important from a safety standpoint.

*Keywords:* tightening of reinforced concrete; curved beams; the experiment; the sample

*Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. Петренко В. Д. (Україна).*

Поступила в редколлегию 09.11.2013.

Принята в печать 30.11.2013.