

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 622.016.4: 622.284.4

К. И. СОЛДАТОВ^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦ^{2*}

^{1*} 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

^{2*} Каф. «Мосты», 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

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ШАХТНОЙ ЗАТЯЖКИ

Цель. Опыт эксплуатации различного типа шахтных затяжек свидетельствует о том, что большинство из них имеют достаточную 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, что дает возможность выполнить оптимизацию.

Результаты. Результаты выполненных расчетов, проведения испытаний на значительном количестве образцов натуральной величины позволили рекомендовать конкретные типы оптимальных затяжек.

Научная новизна. В публикациях в данном направлении нет образцов подобных описанным выше. Сама конструкция является оптимальной как с точки зрения прочности, так и стоимости.

Практическая значимость. Данная модель затяжки внедрена в производство на Павлоградском заводе 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: шахтная затяжка; железобетонная затяжка; криволинейный брус; эксперимент; образец

Введение

В статье [1] приведены результаты экспериментально-теоретического исследования шахтной затяжки, выполненной в виде криволинейного бруса, несущая способность которого сравнивается с аналогичным прямолинейным.

Цель

В целях получения теоретически и практически обоснованных параметров для прямолинейного и криволинейного образцов, дальнейшее исследование было выполнено в направлении оптимизации параметров.

Методика

Для образца в виде прямолинейной балки в параметры оптимизации могут входить: расчетные сопротивления бетона и арматуры, площадь арматуры, высота поперечного сече-

ния образца, ширина образца. Результирующим параметром оптимизации должен быть изгибающий момент, который может выдержать данный образец при фиксированных (указанных выше) иных параметрах.

Запишем известные расчетные формулы для данного случая

$$M = R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right); x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} \quad (1)$$

Ограничим диапазон поиска оптимальных значений основных величин:

- длину образца примем стандартной и равной $l = 100$ см;
- высота сечения h варьируется в диапазоне 3,5...5,0 см (3,5; 4,0; 4,5; 5,0);
- ширина образца b остаётся постоянной и равной 20 см из условия веса образца до 20 кг и удобства монтажа;

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

– расчетное сопротивление бетона R_b принято в диапазоне 105...160 кгс/см² (120; 135; и 150);

– расчетное сопротивление арматуры R_s принято для трех диаметров высокопрочной проволоки 3; 4 и 5 мм, которое соответственно равно: 14900, 14000 и 12800 кгс/см²;

– принимаем для всех образцов минимальное значение расстояния до центра тяжести арматуры $a_s = 10$ см, т.е. рабочую высоту сечения h_0 в диапазоне 2,5...4,5 см;

– количество стержней рабочей арматуры от 2 до 4 (в зависимости от диаметра, поскольку в расчетах фигурирует не диаметр, а площадь арматуры A_s).

Расчетная сосредоточенная нагрузка $P = 500$ кгс (5 кН), а следовательно изгибающий момент, который должен выдерживать образец составляет 1,25 кНм (12500 кгссм).

При этих исходных данных можно записать

$$12500 = R_b \cdot 20 \cdot x \cdot (h - 1,0 - \frac{x}{2}), \quad (2)$$

что равносильно

$$x^2 - 2x \cdot (h - 1) + 1250 / R_b = 0. \quad (3)$$

Таким образом, оптимальная высота сжатой зоны бетона определяется из выражения

$$x = (h - 1) \pm \sqrt{(h - 1)^2 - \frac{1250}{R_b}}. \quad (4)$$

Рассмотрим возможные комбинации с точки зрения высоты сечения и расчетного сопротивления бетона и их влияния на высоту сжатой зоны бетона (табл. 1).

Анализ подкоренного выражения дает ответ на основной вопрос – оптимальной высоты сечения. Действительные корни имеем в том случае, если выполняется неравенство $(h - 1)^2 \geq 1250 / R_b$. В табл. 1 сведены данные расчетов для 12 образцов (в таблице: отр. – отрицательное значение высоты сжатой зоны бетона).

Таблица 1

Оптимальные значения высоты сжатой зоны бетона в зависимости от высоты образца и прочности бетона

x , см	h , см	R_b , кгс/см ²	x , см	h , см	R_b , кгс/см ²	x , см	h , см	R_b , кгс/см ²
x_1 отр.	3,5	120	x_5 отр.	3,5	135	x_9 отр.	3,5	150
x_2 отр.	4,0	120	x_6 отр.	4,0	135	$x_{10} = 2,19$	4,0	150
$x_3 = 2,65$	4,5	120	$x_7 = 1,77$	4,5	135	$x_{11} = 1,52$	4,5	150
$x_4 = 1,64$	5,0	120	$x_8 = 1,41$	5,0	135	$x_{12} = 1,24$	5,0	150

Подстановка в формулу (5)

$$A_s = \frac{R_b \cdot b \cdot x}{R_s} \quad (5)$$

указанных значений дает нам соответствующие значения площади арматуры для данных сочетаний. Минимальную площадь арматуры дают те образцы, где меньшее значение произведения высоты сжатой зоны бетона на расчетное сопротивление бетона $x \cdot R_b$. Площадь сечения для них соответственно составляет при диаметрах арматуры 3, 4 и 5 мм величины, приведен-

ные в табл. 2 (в скобках указано количество стержней арматуры).

Площадь сечения одного стержня арматуры диаметром 3, 4 и 5 мм составляет соответственно: 0,07065 см²; 0,1256 см²; 0,19625 см². В скобках приведено количество стержней арматуры. В данном случае лучшими по расходу арматуры можно признать образцы 4, 8 и 12 с диаметром стержней 3 или 4 мм. Все они имеют высоту 50 мм. Расчетное сопротивление бетона в принятом диапазоне существенного значения не имеет.

Таблица 2

Расчет необходимой площади арматуры образцов

№№ образца	3	4	7	8	10	11	12
Диаметр арматуры, мм	Площадь арматуры, см ²						
3	0,426 (6)	0,264 (4)	0,320 (5)	0,255 (4)	0,440 (7)	0,306 (5)	0,249 (4)
4	0,453 (4)	0,281 (3)	0,340 (3)	0,271 (3)	0,468 (4)	0,325 (3)	0,265 (3)
5	0,495 (3)	0,307 (2)	0,372 (2)	0,297 (2)	0,512 (3)	0,349 (2)	0,289 (2)

Приступая к оптимизации криволинейного бруса, за основу принимаем соотношение формулы (5) $A_s \cdot R_s = R_b \cdot b \cdot x$, т.е. бетон и арматура в равной степени формируют оптимальное железобетонное сечение.

Согласно [2] критическая интенсивность нагрузки для криволинейного бруса определяется по формуле

$$q = k \cdot \frac{E_b I_{red}}{r^3}. \quad (7)$$

В данном случае в расчет вводится приведенный момент инерции сечения, т.е. учитывается и арматура и сжатая зона бетона

$$I_{red} = \frac{bx^3}{3} + A_s \cdot n^1 \cdot (h_0 - x)^2. \quad (8)$$

Анализ формулы (8) показывает, что увеличение высоты сжатой зоны бетона увеличивает долю составляющей бетонного сечения ($\frac{bx^3}{3}$) и одновременно уменьшает долю арматуры за счет уменьшения выражения в скобках $(h_0 - x)^2$. Исследуем возможность проведения оптимизации по упрощенному выражению для приведенного момента инерции сечения

$$I_{red} = \frac{bx^3}{3}. \quad (9)$$

Выразив I_{red} из формул (7) и (9), приравняв данные выражения

$$\frac{b \cdot x^3}{3} = \frac{q \cdot r^3}{k \cdot E_b}, \quad (10)$$

откуда найдем высоту сжатой зоны бетона, выраженную через известные параметры, т.е. данную высоту можно считать оптимальной

$$x = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot q \cdot r^3}{b \cdot k \cdot E_b}}, \quad (11)$$

где $q = 10$ кгс/см – погонная интенсивность расчетной нагрузки; k – коэффициент, определяемый по формуле (12); r – радиус кривизны, см, определяемый по формуле (14)

$$k = \frac{(\pi^2 - 4\alpha^2)^2}{4\alpha^2 \cdot (\pi^2 + 4\alpha^2)}. \quad (12)$$

Угол сегмента определяем по формуле (13)

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} = \frac{2f}{a}. \quad (13)$$

В данном случае стрела прогиба f отсчитывается от линии опирания бруса по торцам до центра тяжести рабочей арматуры.

В свою очередь радиус находим из зависимости (14) по известной хорде и углу сегмента

$$a = 2r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}; \quad r = \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha / 2}. \quad (14)$$

В связи с необходимостью перебора значительного количества вариантов дальнейшие расчеты сведены в табл. 3.

Результаты

Наличие данных о высоте сжатой зоны бетона и площади сечения арматуры в данном исследовании дает основание сделать предварительные (поскольку нами использовано упрощенное выражение для приведенного момента инерции) выводы.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблица 3

Расчет высоты сжатой зоны бетона и площади арматуры

№№ Образ- ца	b , см	h , см	f , см	n'	R_b , кгс/см ²	R_s , кгс/см ² $d = 3; 4; 5$ мм	α	r , см	k	x , см	A_s , см ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	20	3,5	4,5	6,00	150	14900	24	207	11,37	1,52	0,306
	20	3,5	4,5	6,00	150	14000	24	207	11,37	1,52	0,325
	20	3,5	4,5	6,00	150	12800	24	207	11,37	1,52	0,356
2	20	4,0	5,0	6,00	150	14900	26	191	9,29	1,50	0,302
	20	4,0	5,0	6,00	150	14000	26	191	9,29	1,50	0,321
	20	4,0	5,0	6,00	150	12800	26	191	9,29	1,50	0,351
3	20	4,5	5,5	6,00	150	14900	29	172	6,99	1,48	0,298
	20	4,5	5,5	6,00	150	14000	29	172	6,99	1,48	0,317
	20	4,5	5,5	6,00	150	12800	29	172	6,99	1,48	0,347
4	20	5,0	6,0	6,00	150	14900	32	156	5,35	1,47	0,296
	20	5,0	6,0	6,00	150	14000	32	156	5,35	1,47	0,315
	20	5,0	6,0	6,00	150	12800	32	156	5,35	1,47	0,344
5	20	3,5	4,5	6,50	135	14900	24	207	11,37	1,56	0,283
	20	3,5	4,5	6,50	135	14000	24	207	11,37	1,56	0,301
	20	3,5	4,5	6,50	135	12800	24	207	11,37	1,56	0,329
6	20	3,5	5,0	6,50	135	14900	26	191	9,29	1,54	0,279
	20	3,5	5,0	6,50	135	14000	26	191	9,29	1,54	0,297
	20	3,5	5,0	6,50	135	12800	26	191	9,29	1,54	0,325
7	20	4,5	5,5	6,50	135	14900	29	172	6,99	1,53	0,277
	20	4,5	5,5	6,50	135	14000	29	172	6,99	1,53	0,295
	20	4,5	5,5	6,50	135	12800	29	172	6,99	1,53	0,322
8	20	5,0	6,0	6,50	135	14900	32	156	5,35	1,51	0,274
	20	5,0	6,0	6,50	135	14000	32	156	5,35	1,51	0,291
	20	5,0	6,0	6,50	135	12800	32	156	5,35	1,51	0,340
9	20	3,5	4,5	6,90	120	14900	24	207	11,37	1,59	0,256
	20	3,5	4,5	6,90	120	14000	24	207	11,37	1,59	0,272
	20	3,5	4,5	6,90	120	12800	24	207	11,37	1,59	0,298
10	20	4,0	5,0	6,90	120	14900	26	191	9,29	1,57	0,253
	20	4,0	5,0	6,90	120	14000	26	191	9,29	1,57	0,269
	20	4,0	5,0	6,90	120	12800	26	191	9,29	1,57	0,294

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11	20	4,5	5,5	6,90	120	14900	29	172	6,99	1,55	0,250
	20	4,5	5,5	6,90	120	14000	29	172	6,99	1,55	0,266
	20	4,5	5,5	6,90	120	12800	29	172	6,99	1,55	0,291
12	20	5,0	6,0	6,90	120	14900	32	156	5,35	1,54	0,248
	20	5,0	6,0	6,90	120	14000	32	156	5,35	1,54	0,264
	20	5,0	6,0	6,90	120	12800	32	156	5,35	1,54	0,291

1. При многочисленных сочетаниях различных параметров имеем высоту сжатой зоны бетона в очень узком диапазоне (1,47...1,59 см). Разница всего 8 %.

2. Площадь сечения в данном случае хотя и зависит от высоты сжатой зоны бетона и расчетных сопротивлений бетона и арматуры, однако определена более широким диапазоном (0,248...0,357 см²) – разница 43,95 %.

3. Во всех случаях меньшая площадь арматуры достигается при использовании арматуры меньшего диаметра в сочетании с бетоном с меньшим расчетным сопротивлением.

Для определения погрешности в определении высоты сжатой зоны бетона и площади арматуры, дополнительно проведена оптимизация по зависимостям, где учтена и доля арматуры. Запишем равенство аналогичное (10)

$$\frac{bx^3}{3} + A_s \cdot \frac{E_s}{E_b} \cdot (h_0 - x)^2 = \frac{q \cdot r^3}{k \cdot E_b} \quad (15)$$

и преобразуем таким образом, чтобы из него можно было получить решение для высоты сжатой зоны бетона

$$\begin{aligned} & x^3 \cdot \frac{R_s}{3R_b \cdot n'} + x \cdot (h_0 - x)^2 - \\ & - \frac{q \cdot r^3 \cdot R_s}{E_b \cdot b \cdot k \cdot R_b \cdot n'} = 0 \\ & x^3 \cdot \left(\frac{R_s}{3R_b \cdot n'} + 1 \right) - x^2 \cdot 2h_0 + \\ & + x \cdot h_0^2 - \frac{q \cdot r^3 \cdot R_s}{E_b \cdot b \cdot k \cdot R_b \cdot n'} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

В табл. 4 приведены результаты расчета по формуле (16) для 12 вариантов, заимствован-

ных из табл. 2 для сравнения двух основополагающих параметров: x и A_s .

Таким образом, уточненный расчет позволил снизить площадь арматуры по образцу 8(1) по расчетным значениям на +25,11 % (или фактически на 1 стержень диаметром 3 мм + 25 %) и по образцу 11(2) соответственно на +8,57 % (фактически на 1 стержень диаметром 4 мм + 33,3 %). Образец 12(3) хотя и дает приемлемый результат, однако снижение площади по расчетным значениям на +25,4 % теряется за счет необходимости практической установки двух стержней (- 44 %).

Выводы

Все образцы показали практически близкие результаты, однако, два образца дали минимальную площадь сечения. Проанализируем эти образцы.

Образец 8(1) имеет высоту 5 см, стрелу погиби – 6 см, арматура диаметром 3 мм, площадь арматуры – 0,219 см² (3 стержня диаметром 3 мм). По сравнению с аналогичным прямолинейным образцом, площадь арматуры которого – 255 см² экономия арматуры составляет 16,4 %. Но реально необходимо ставить 4 стержня и площадь 0,283 см² и экономия – 29,7 %.

Образец 11(2) имеет высоту 4,5 см, стрелу погиби 5,5 см, арматура диаметром 4 мм, площадь арматуры – 0,245 см² (2 стержня диаметром 4 мм). Аналогичный прямолинейный образец имеет площадь арматуры 269 см², т.е. теоретическая экономия арматуры – 9,8 %. Однако практически необходимо ставить 3 стержня и экономия составляет 53,7 %.

Таблиця 4

Результаты расчета

№№ Обра- зца	b , см	h , см	f , см	n'	R_b	R_s	α	r , см	k	x , см	A_s , см ²
1 (1)	20	3,5	4,5	6,0	150	14900	24	207	11,37	1,52/1,48	0,306/0,297
2 (1)	20	4,0	5,0	6,0	150	14900	26	191	9,29	1,50/1,40	0,302/0,281
3 (2)	20	4,5	5,5	6,0	150	14000	29	172	6,99	1,48/1,26	0,317/0,270
4 (3)	20	5,0	6,0	6,0	150	12800	32	156	5,35	1,47/1,12	0,344/0,263
5 (1)	20	3,5	4,5	6,5	135	14900	24	207	11,37	1,56/1,52	0,283/0,275
6 (2)	20	3,5	5,0	6,5	135	14000	26	191	9,29	1,54/1,44	0,297/0,278
7 (3)	20	4,5	5,5	6,5	135	12800	29	172	6,99	1,53/1,30	0,322/0,274
8 (1)	20	5,0	6,0	6,5	135	14900	32	156	5,35	1,51/1,21	0,274/0,219
9 (2)	20	3,5	4,5	6,9	120	14000	24	207	11,37	1,59/1,56	0,272/0,267
10 (3)	20	4,0	5,0	6,9	120	12800	26	191	9,29	1,57/1,48	0,294/0,278
11 (2)	20	4,5	5,5	6,9	120	14000	29	172	6,99	1,55/1,43	0,266/0,245
12 (3)	20	5,0	6,0	6,9	120	12800	32	156	5,35	1,54/1,24	0,291/0,232

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ

1. Солдатов, К. И. Экспериментально - теоретическое исследование работы железобетонной шахтной затяжки [Текст] / К. И. Солдатов, Ю. Л. Заяц, В. И. Сорока // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 4. – С. 97-107.
2. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений [Текст]: Учебник / А. Ф. Смирнов, В. Александров, Б. Я. Лашеников, Н. Н. Шапошников. – Москва : Стройиздат, 1984. – 416 с.
3. Бронштейн, И. Н., Справочник по математике [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1967. – 608 с.
4. Киселев, В. А. Строительная механика. Специальный курс (динамика и устойчивость сооружений) [Текст] / В. А. Киселев. – Москва : Изд-во литературы по строительству, 1969. – 431 с.
5. Снитко, Н. К. Строительная механика [Текст]: Учебник / Н. К. Снитко. – Москва : Высшая школа, 1972. – 486 с.
6. Колоушек, В. Динамика строительных конструкций [Текст] / В. Колоушек. – Москва : Изд-во литературы по строительству, 1965. – 631 с.
7. Громыко, А. О. Механика сплошной среды. Криволинейные брусья, пластины и оболочки [Текст]: Курс лекций / А. О. Громыко, О. В. Громыко. – Минск : БГУ, 2005. – 364 с.

К. И. СОЛДАТОВ^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦЬ^{2*}^{1*}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

^{2*} 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

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕРІЗУ 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

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

б була оптимальною з точки зору вартості та несучої здатності. **Методика.** Для дослідження вибрана експериментально-теоретична методика, яка ґрунтується на новій формі зтяжки 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, що дає змогу виконати оптимізацію. **Результати.** Результати виконаних розрахунків, проведення випробувань на значній кількості зразків натуральної величини дали змогу рекомендувати конкретні типи оптимальних зтяжок. **Наукова новизна.** В публікаціях у даному напрямку немає зразків подібних описаним вище. Сама конструкція є оптимальною як з точки зору міцності так і вартості. **Практична значимість.** Дану модель зтяжки впроваджена для виготовлення на Павлоградському заводі залізобетонних конструкцій. У зрівнянні з прямолінійними аналогами вона має 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: шахтна зтяжка; залізобетонна зтяжка; криволінійний брус; експеримент; зразок

KIM SOLDATOV^{1*}, YURI ZAYAC^{2*}

^{1*} Dept. of Bridges, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 527 26 01, e-mail kim-kim@i.ua

^{2*} Dept. of Safety of life activity, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 704 74 33, e-mail zyl41@mail.ru

OPTIMIZATION CROSS SECTION OF REINFORCED CONCRETE MINE TIGHTENING

Purpose. Experience in operating various types of mine puffs indicates that most of them have sufficient load-bearing capacity, so the main goal of this work is the design and calculation of torque, which would be optimal in terms of cost and carrying capacity. **Methodology.** To study the selected experimental and theoretical technique, which is based on a new form of tightening in the form of a curved beam, a special method of calculation and the experiments on samples prepared at the factory bridge of reinforced concrete structures with different parameters, both in a concrete mixture and reinforcement, which gives the opportunity to perform optimization. **Findings.** The results of the calculations, tests on a significant number of samples of original size allowed to recommend specific types of optimal puffs. **Originality.** The publications in this area are no samples such as those described above. The structure itself is optimal both from the standpoint of strength and cost. **Practical value.** This model tightening implemented in production at Pavlograd concrete structures. In comparison with analogous rectilinear, it has the same value, and the carrying capacity of 50...100 % and has a large tendency for a sudden collapse, which is very important from a safety standpoint.

Keywords: mine tightening; reinforced concrete tightening; curved beams; the experiment; the sample

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

Поступила в редколлегию 25.06.2014.

Принята в печать 02.07.2014.