

## ИЗГИБ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ СЖАТОЙ ЗОНЫ БЕТОНА

Р. А. Яркин, В. М. Струлев

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** напряженно-деформированное состояние; несущая способность сечения; относительная высота сжатой зоны бетона; сопротивление бетона осевому сжатию; сетки косвенного армирования.

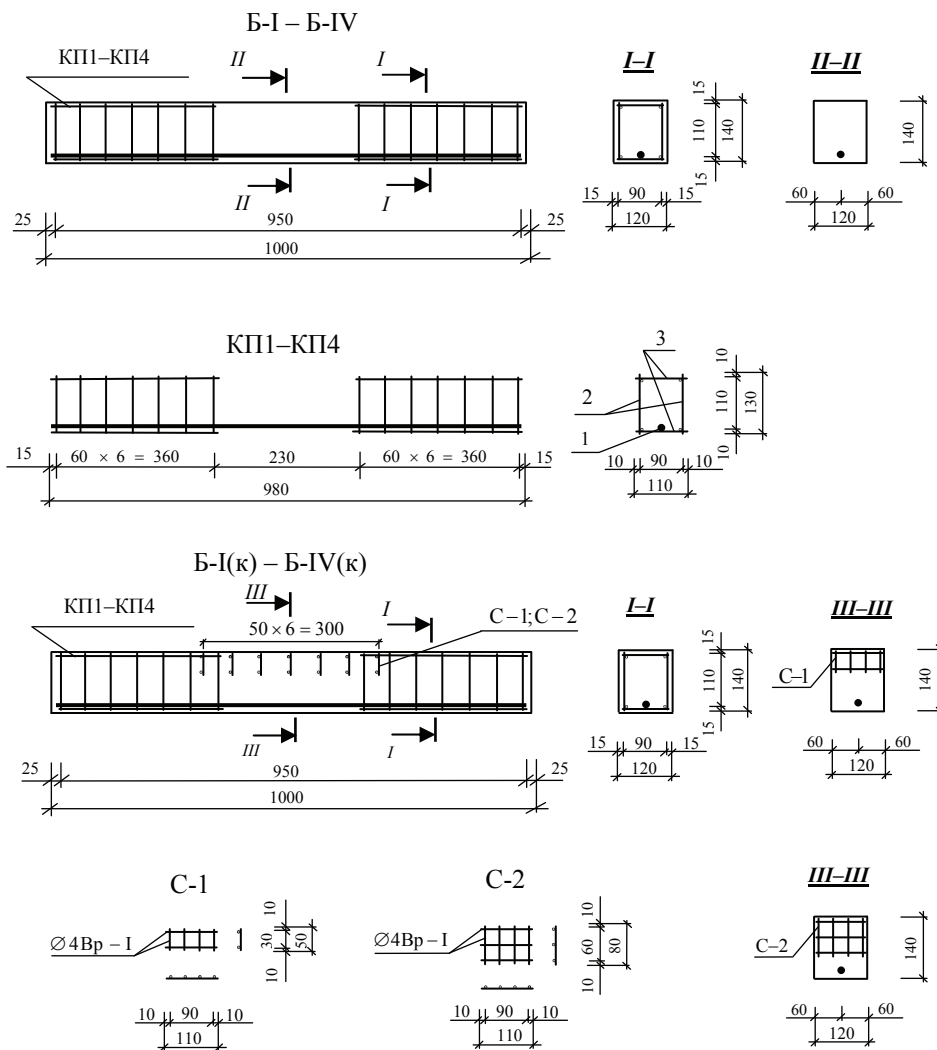
**Аннотация:** Приводятся результаты экспериментальных исследований по разрушению железобетонных балок с косвенным армированием в условиях чистого изгиба. Показано, что применение косвенного армирования приводит к существенному повышению прочности балок и к экономии дорогостоящей арматуры.

---

Одним из способов повышения прочности и жесткости железобетонных конструкций является локальное упрочнение сжатой зоны бетона сетками косвенного армирования. Влияние косвенного армирования на напряженно-деформированное состояние центрально и внецентренно сжатых железобетонных элементов изучено достаточно хорошо. Исследований, связанных с работой изгибаемых железобетонных элементов с аналогичным армированием, очень мало [1 – 3].

На основании проведенного теоретического анализа были определены области эффективного применения косвенного армирования в изгибаемых железобетонных элементах [4]. Для экспериментальных исследований прочности и жесткости изгибаемых железобетонных элементов были изготовлены 16 железобетонных балок-образцов с размерами 120×140×1000 мм, армируемые продольной арматурой Ø14...20 класса А-III. Балки в зависимости от диаметра продольной арматуры разделили на четыре серии. В каждой серии были изготовлены по четыре балки, две из которых (балки-близнецы) дополнительно армировались косвенной арматурой (буква «к»). Она представляла собой сварные сетки, изготовленные из проволоки Ø4 Вр-I с размерами ячеек 30×30 мм, которые устанавливались в центральной зоне образцов с шагом 50 мм (рис.1). Размеры сеток по высоте принимались различными, в зависимости от расчетного значения высоты сжатой зоны бетона.

Все балки были выполнены из тяжелого бетона класса В20 и подвергнуты тепловлажностной обработке в заводских условиях. Образцы испытывались по однопролетной схеме на гидравлическом прессе марки ПСЧ-125 и загружались с помощью траверсы двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета, что исключало влияние поперечной силы на напряженно-деформированное состояние в исследуемой зоне. Прогиб образцов посередине пролета измеряли индикатором часового типа ИЧ-10. Все образцы загружали до разрушения ступенчато возрастающей кратковременной нагрузкой. Схема армирования балок приведена на рис. 1.



**Рис. 1** Схема армирования балок-образцов:

- 1 – продольная рабочая арматура  $\varnothing 14 \dots 20$  класса А-III;  
 2 – поперечная арматура каркасов  $\varnothing 10$  класса А-III;  
 3 – поперечная арматура каркасов  $\varnothing 5$  класса Вр-I

В табл. даны: диаметры ( $d$ , мм) и класс продольной арматуры; коэффициенты продольного армирования ( $\mu_s$ , %); масса арматуры балок без учета поперечной на приопорных участках ( $m_s$ , кг); расчетное и приведенное сопротивления бетона осевому сжатию ( $R_B$ ,  $R_{B,RED}$ , МПа); теоретические значения относительной ( $\xi$ ) и граничных значений сжатой зоны бетона ( $\xi_R$ ); теоретические и экспериментальные значения несущей способности ( $M_{BS}^T$ ,  $M_{BS}^{ЭКC}$ , кН·м); коэффициент запаса ( $K$ ); теоретические и экспериментальные относительные значения несущей способности (отнесенные к массе арматуры  $M_{BS}^T/m_s$ ,  $M_{BS}^{ЭКC}/m_s$ , кН·м/кг); предполагаемый характер разрушения согласно нормативному документу [5] и действительный характер разрушения.

Разрушение балок-прототипов Б-I – Б-IV произошло вследствие постепенно-го раздробления сжатой зоны бетона, что подтверждает диаграмма [6].

Таблица

## Теоретические данные и результаты испытаний балок

Балки	Б-I	Б-II	Б-III	Б-IV
	Б-I(к)	Б-II(к)	Б-III(к)	Б-IV(к)
Класс и диаметр продольной арматуры ( $d$ , мм)	Ø14 А-III	Ø16 А-III	Ø18 А-III	Ø20 А-III
$\mu_s$ , %	1,07	1,40	1,77	2,18
$m_s$ , кг	$\frac{1,196}{1,484}$	$\frac{1,562}{1,850}$	$\frac{1,978}{2,424}$	$\frac{2,441}{2,887}$
$\frac{R_B}{R_{B,RED}}$ , МПа	$\frac{11,5}{21,57}$	$\frac{11,5}{21,57}$	$\frac{11,5}{20,91}$	$\frac{11,5}{20,91}$
$\xi$	$\frac{0,339}{0,150}$	$\frac{0,443}{0,196}$	$\frac{0,561}{0,256}$	$\frac{0,607}{0,316}$
$\xi_R$	$\frac{0,591}{0,465}$	$\frac{0,591}{0,465}$	$\frac{0,591}{0,472}$	$\frac{0,591}{0,472}$
$M_{BS}^T$ , кН·м	$\frac{5,598}{6,235}$	$\frac{6,856}{7,946}$	$\frac{8,021}{9,721}$	$\frac{8,336}{11,589}$
$M_{BS}^{экс}$ , кН·м	$\frac{8,750}{11,625}$	$\frac{10,750}{13,000}$	$\frac{13,250}{14,250}$	$\frac{14,313}{16,875}$
$K$	$\frac{1,563}{1,864}$	$\frac{1,568}{1,636}$	$\frac{1,652}{1,466}$	$\frac{1,717}{1,456}$
$M_{BS}^T/m_s$ , кН·м/кг	$\frac{4,681}{4,201}$	$\frac{4,389}{4,295}$	$\frac{4,055}{4,010}$	$\frac{3,415}{4,014}$
$M_{BS}^{экс}/m_s$ , кН·м/кг	$\frac{7,316}{7,834}$	$\frac{6,882}{7,027}$	$\frac{6,699}{5,879}$	$\frac{5,864}{5,845}$
Характер разрушения	Согласно [5]	По растянутой арматуре	По сжатой зоне бетона	
	Экспериментальный	По сжатой зоне бетона		

Примечание: для двух одинаковых балок одной серии в таблице приведены средние значения результатов испытаний; над чертой – значения для балок-прототипов, под чертой – значения для балок с косвенным армированием сжатой зоны бетона.

Балки Б-I(к) и Б-II(к) разрушились по сжатой зоне бетона. При приближении нагрузки к (разрушающей ( $F \cong F_{разр}$ ) скорость увеличения прогибов начинала резко возрастать, раскрывались трещины, балки сильно выгибались, но сохраняли свою несущую способность. Дальнейшее увеличение нагрузки привело к выкрашиванию бетона в средней части пролета балок между сетками, и их несущая способ-

ность падала. Следует отметить, что граница разрушения бетона проходила ниже места установки сеток косвенного армирования.

При испытании балок Б-III(к) и Б-IV(к) при нагрузках, близких к разрушающей, наблюдалось отслоение защитного слоя бетона рабочей продольной арматуры на одном из приопорных участков, в результате чего арматура оголялась, и прогибы сильно возрастали. Моменту резкого роста прогибов предшествовал щелчок, обусловленный разрушением сварки между продольной и частью поперечной арматуры (поперечная арматура сильно выгибалась, и несколько стержней рвались). Происходило проскальзывание продольной арматуры на приопорном участке. Из-за потери сцепления рабочей арматуры с бетоном происходило резкое раскрытие нормальных трещин, и несущая способность балок падала. Причиной этого может быть недостаточная толщина защитного слоя бетона и маленький диаметр поперечной арматуры каркаса, приваренной к продольному рабочему стержню. Следует отметить, что разрушение сжатой зоны бетона не наблюдалось. Это говорит о том, что истинная несущая способность балок гораздо выше, чем можно предположить исходя из полученных результатов.

Армирование сжатой зоны бетона балок практически не повлияло на величину момента образования трещин. Это объясняется тем, что растянутая зона бетона балок не была усилена, а трещины образуются в растянутой зоне.

На рис. 2 приведены зависимости прогибов балок I-ой серии от прикладываемой нагрузки. При одной и той же нагрузке прогибы балок с косвенным армированием значительно меньше прогибов балок-прототипов. При теоретической разрушающей нагрузке балок с косвенным армированием прогиб балок с усиленной сжатой зоной в 1,2 – 1,5 раза меньше прогибов балок-прототипов (рис. 3).

Из-за непредвиденного разрушения защитного слоя бетона и проскальзывания продольной рабочей арматуры на приопорном участке, в четырех балках из восьми не удалось в полной мере оценить эффект косвенного армирования сжатой зоны сечения (наибольший эффект применения сеток косвенного армирования ожидался именно для этих балок).

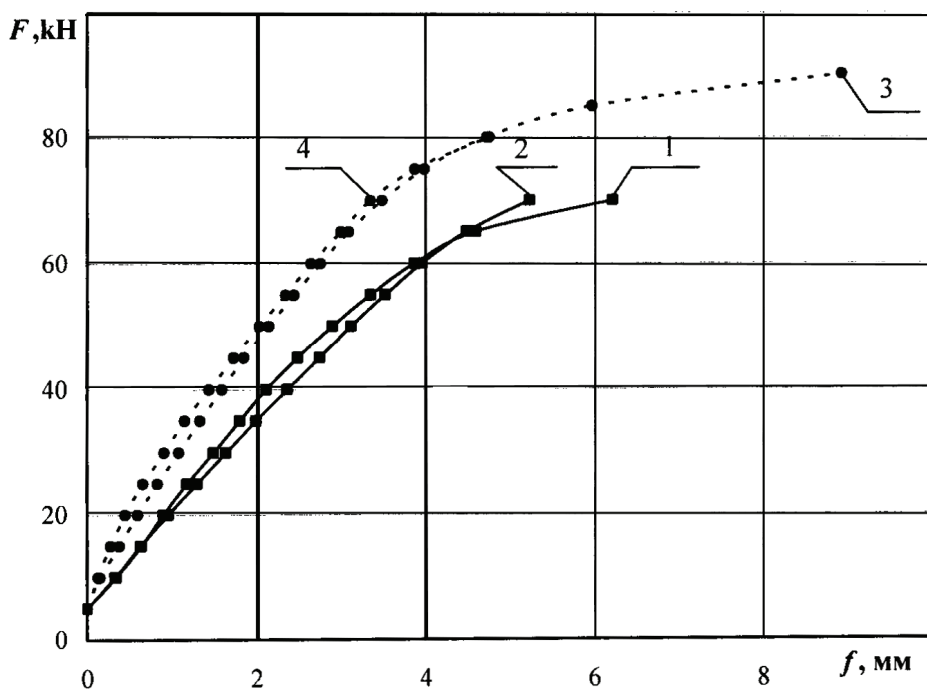
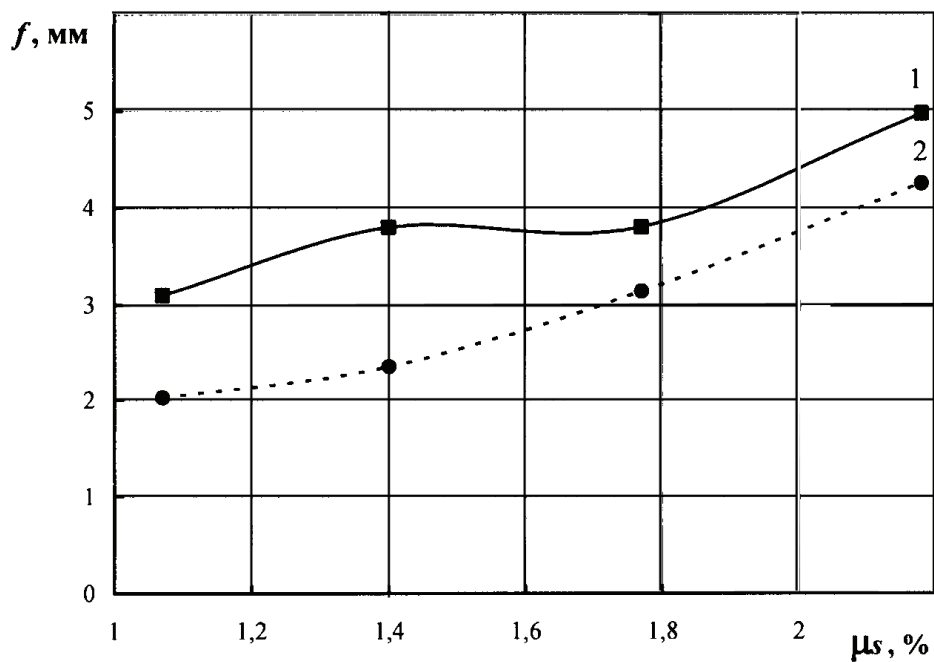
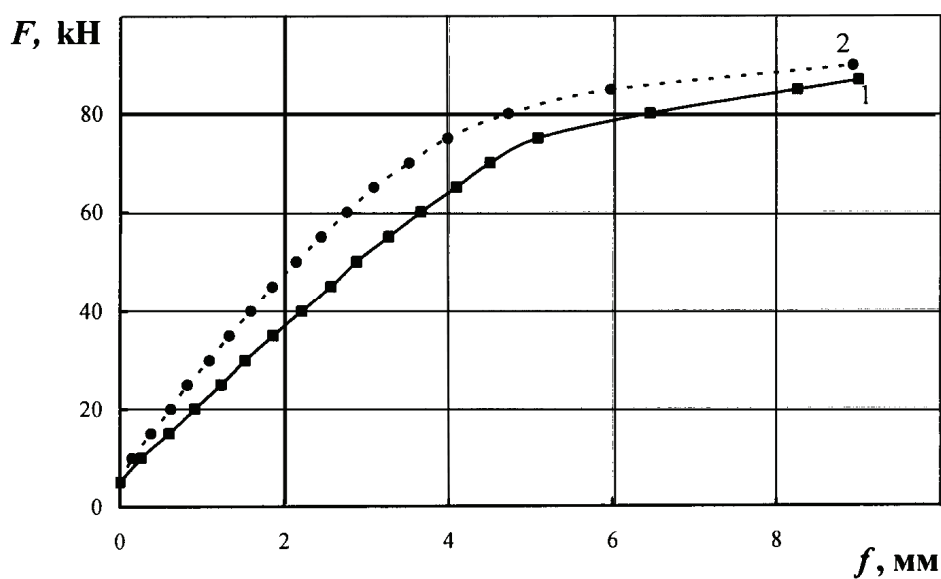


Рис. 2 Зависимости прогибов ( $f$ ) от нагрузки ( $F$ ) балок I-ой серии:  
1 – Б-I-1; 2 – Б-I-2; 3 – Б-I-1(к); 4 – Б-I-2(к)



**Рис. 3** Зависимости прогибов ( $f$ ) балок при теоретической разрушающей нагрузке балок с косвенным армированием от процента продольного армирования ( $\mu_s$ ):  
 1 – балки-прототипы Б-I ÷ Б-IV; 2 – балки с косвенным армированием сжатой зоны Б-I(к) – Б-IV(к)



**Рис. 4** Зависимости прогибов ( $f$ ) балок Б-II-1 и Б-I-1(к) от прикладываемой нагрузки ( $F$ ):  
 1 – Б-II-1 ( $\mu_s = 1,40\%$ ;  $m_s = 1,562$  кг;  $M_{BS}^{экс} = 10,75$  кН·м);  
 2 – Б-I-1(к) ( $\mu_s = 1,07\%$ ;  $m_s = 1,484$  кг;  $M_{BS}^{экс} = 11,625$  кН·м)

На рис. 4 сравниваются результаты испытаний балки без косвенного армирования Б-II-1 с балкой Б-I-1(к), с усиленной сжатой зоной. При меньшем расходе арматуры балки Б-I-1(к) ( $\mu_S = 1,07\%$ ,  $m_S = 1,484$  кг) ее несущая способность на 8 % выше, чем у Б-II-1 ( $\mu_S = 1,40\%$ ;  $m_S = 1,562$  кг). А ее прогиб при фиксированной нагрузке, меньше прогибов балок без усиления сжатой зоны. Эффект применения косвенного армирования ( $M_{BS}^{ак} / m_S$ , кН·м / кг) в этом случае составляет 14 %. То есть, не изменяя класс бетона и диаметр продольной арматуры, можно повысить несущую способность и уменьшить прогибы конструкции.

### Выводы

1. Результаты опытов показали, что разрушение балок по нормальным сечениям по сжатой зоне бетона происходит задолго до достижения относительной высоты сжатой зоны бетона  $\xi$  своего граничного значения  $\xi_R$ .

2. Введение в сжатую зону бетона сеток позволяет существенно повысить несущую способность сечения (до 33 %). Косвенное армирование балок позволило снизить расход арматуры (до 6 %) и повысить эффективность на 14 %, не изменяя класса бетона и диаметра продольной арматуры.

3. Армирование сжатой зоны бетона балок практически не повлияло на величину момента образования трещин.

4. При фиксированной нагрузке, прогибы балок с косвенным армированием значительно меньше прогибов балок-прототипов. Однако косвенное армирование привело к значительному увеличению предельных значений прогибов при сохранении балок своей несущей способности, что позволяет использовать его в статически неопределимых конструкциях.

5. Введение сеток косвенного армирования в сжатую зону бетона значительно уменьшает ее высоту, и тем самым переводит переармированные балки в область оптимального армирования, что позволяет значительно отодвинуть границу переармирования. Переармированные балки с  $\xi > \xi_R$  с введением в сжатую зону сеток косвенного армирования переходят в область оптимальной высоты сжатой зоны бетона  $\xi = 0,3...0,4$ .

### Список литературы

1. Расторгуев Б.С., Яковлев С.К. К вопросу о применении косвенного армирования в ригелях многоэтажных производственных зданий // Известия вузов. Серия "Строительство и архитектура". – 1985, – №9. – С.1-4.
2. Цепелев С.В.. Работа изгибаемых элементов с косвенным армированием // Бетон и железобетон. – 1992, – №9. – С. 2-4.
3. Гринев В.Д., Белевич С.Д. Работа железобетонных балок с усиленной сжатой зоной. // Промышленное и гражданское строительство. – 1993. – №10. – С. 12.
4. Яркин Р.А., Анисимов С.В., Струлев В.М. Теоретические основы применения косвенного армирования в изгибаемых железобетонных элементах // Труды ТГТУ. Вып.10. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – С.74-78.
5. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции.
6. Струлев В.М., Яркин Р.А. Механизм разрушения и способы повышения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов // Вестник ТГТУ. – 2000. – Т. 6, №3. – С. 474-477.

## **Bending of Reinforced Concrete Beam with Indirect Reinforcement of Compressed Concrete Zone**

**R.A. Yarkin, V.M. Strulev**

*Department "Construction of Buildings and Structures", TSTU*

**Key words and phrases:** carrier of cross-section; concrete resistance to axis compression; indirect reinforcement nets; relevant height of concrete compressed zone; tense-deformed condition.

**Abstract:** The results of experimental research on destruction of reinforced concrete beams with indirect reinforcement under pure bending are given. It is shown that application of indirect reinforcement leads to significant increase in beams strength and saving highly expensive reinforcement.

---

## **Biegung der Stahlbetonbälle mit der indirekten Bewehrung der zusammengepressten Zone des Betons**

**Zusammenfassung:** Es werden die Ergebnisse der Experimentalforschungen nach der Zerstörung der Stahlbetonbälle mit der indirekten Bewehrung unter den Bedingungen der reinen Biegung angeführt. Es ist aufgezeigt, daß die Anwendung der indirekten Bewehrung zur wesentlichen Erhöhung der Haltbarkeit der Bälle und zur Einsparung der kostspieligen Armatur bringt.

---

## **Courbure des poutres du béton armé avec l'armaturage indirect de la zone pressée du béton**

**Résumé:** Sont cités les résultats des études expérimentales sur la destruction des poutres du béton armé avec l'armaturage indirect dans les conditions de la courbure nette. On a montré que l'application de l'armaturage indirect mène à l'augmentation de la rigidité des poutres et à l'économie de l'armaturage couteux.

---