

СМК-10 с длиной стрелы 10 м подходит по требуемым параметрам с запасом по высоте подъема 5.35 м и грузоподъемности 2 т.

**Заключение.** Разработанный вычислительный документ для крана КС-3571 является шаблоном для создания новых вычислительных документов, содержащих информацию о грузо-высотных характеристиках подобных стреловых самоходных кранов. Вновь созданные вычислительные документы формируют базу данных для автоматизированного подбора стреловых самоходных кранов по техническим характеристикам.

#### **Список цитированных источников**

1. Добронравов, С. С. Строительные машины и оборудование: справочник / С. С. Добронравов, М. С. Добронравов. – Москва : Высш. шк., 2006. – 445 с.

2. Стреловые самоходные краны. Технические характеристики. – Часть 1: Краны автомобильные и на шасси автомобильного типа // Крупнейшая бесплатная информационно-справочная система онлайн доступа к полному собранию технических нормативно-правовых актов РФ. [Электронный ресурс]. – 1996. – Режим доступа : <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293842/4293842363.pdf>. – Дата доступа : 16.01.2018.

3. Очков, В. Ф. Mathcad Application Server: опыт трехлетней эксплуатации в России / В. Ф. Очков // SoftLine direct: каталог программного обеспечения. – 2006. – № 11. – С. 102–104.

4. Расчет эксплуатационной производительности гидравлических экскаваторов с рабочим оборудованием «обратная лопата» // Расчетный сервер НИУ МЭИ. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Exk.xmcd>.

5. Определение параметров бетононасосной установки // Расчетный сервер НИУ МЭИ. [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Exk-2.xmcd>.

6. Определение предельных значений коэффициента ползучести // Расчетный сервер НИУ МЭИ. [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Exk-3.xmcd>.

**УДК 624.012.45:624.048**

## **НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАТИВНОСТИ СЖАТОЙ ЗОНЫ, УСИЛЕННОЙ КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

*Манаенков И. К., Тамразян А. Г.*

**Введение.** Существует большое число исследований [1, 2 и др.], свидетельствующих о том, что при объемном напряженном состоянии в условиях бокового обжатия происходит повышение прочностных и деформационных характеристик бетона. В реальных конструкциях объемное напряженное состояние возможно создать устройством косвенного армирования, ограничивающего развитие поперечных деформаций бетона [3]. Одним из вариантов косвенного армирования является применение поперечных сварных сеток. Из-за относительно малого размера ячейки сетка включается в работу на том участке сечения элемента, на котором возникают сжимающие усилия. Благодаря этому их возможно применять для усиления сжатого бетона практически в любых конструкциях: в сжатых элементах [4]; для усиления опорного стыка колонн и при местном смятии [5]; в сжатой зоне изгибаемых элементов [6] и др.

### Построение диаграммы сжатия для бетона с косвенным армированием.

Одним из методов, позволяющих производить расчеты по первой и второй группам предельных состояний, является диаграммный метод, использующий нелинейные деформационные модели бетона и арматуры [7]. При построении зависимости для бетона с косвенным армированием наиболее важным является определение характерных точек: напряжение и деформации в конце восходящей ветви; напряжение и предельные деформации в конце нисходящей ветви.

Напряжение в конце восходящей ветви  $R_{b3}$  определяли на основании зависимости (1) [8]:

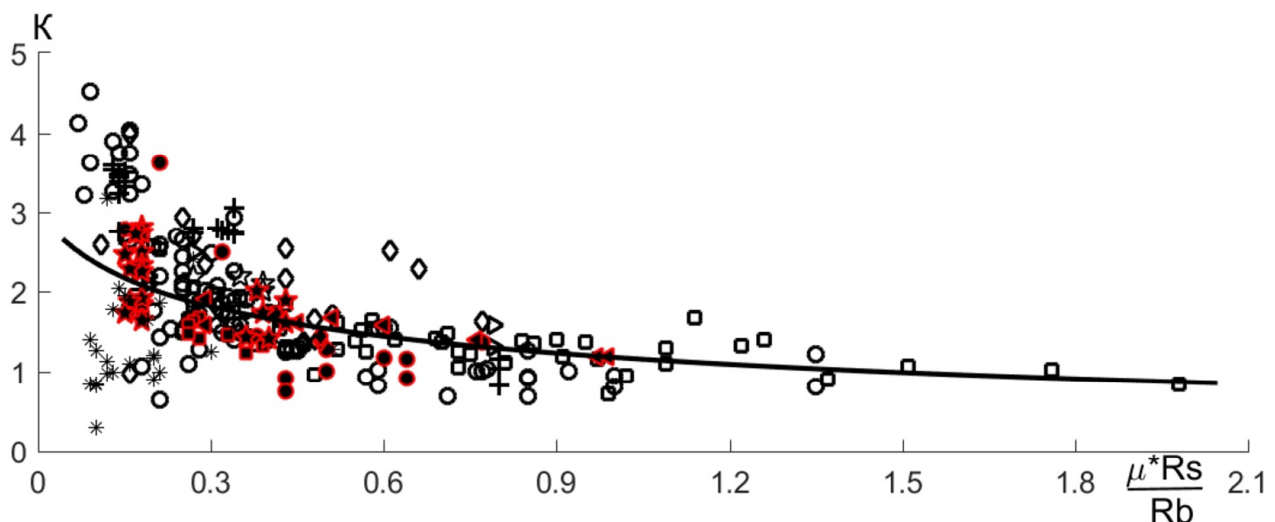
$$R_{b3} = \left[ \frac{1 - \rho_{xy}}{2} + \sqrt{\left( \frac{1 - \rho_{xy}}{2} \right)^2 + 9\rho_{xy}} \right] R_b; \quad (1)$$

$$\rho_{xy} = \psi_b \mu_{xy} \frac{R_s}{R_b}$$

где  $\psi_b$  – коэффициент неравномерности бокового обжатия бетонного ядра (для прямоугольного сечения  $\psi_b=0.375$ ; для круглого сечения  $\psi_b=0.95$ );  $R_s$  – прочность стержней косвенного армирования на растяжение;  $R_b$  – призмная прочность бетона на сжатие;  $\mu_{xy}$  – коэффициент косвенного армирования, определяемый по СП 63.13330.2012.

Для верификации зависимости (1) была произведена обработка экспериментальные данные более 300 центрально сжатых образцов из тяжелого бетона с сетками косвенного армирования. Производилось сравнение экспериментального коэффициента эффективности косвенного армирования  $K$  (2) с теоретическим, полученным на основании формулы (1). Результаты представлены на рис. 1.

$$K = \frac{R_{b3} - R_b}{\mu_{xy} R_s} \quad (2)$$



**Рисунок 1 – Зависимость коэффициента  $K$  от параметров образцов на основании опытных данных различных исследователей: — - по формуле (1);**

○ - А.Ф. Довгалюк [9]; □ - Я. Хензел [10]; ◇ - Б.П. Филиппов [11]; ▽ - К.В. Петрова [12]; ☆ - С.И. Роговой [13]; ● - М. Шериф [5]; ■ - В.П. Некрасов [14]; ◆ - А.А. Гончаров [15]; ◀ - Н.Г. Матков [16]; ★ - К.К. Бакиров [17]; + - Ю.Н. Карнет [14]; \* - Н.В. Гринева [18]

По результатам анализа были выявлены параметры образцов, при которых обеспечивается сходимость экспериментальных и теоретических значений прочности бетона, усиленного сетками: шаг сеток  $S \leq 150 \text{ мм}$ ,  $S \leq 0.8h$  (здесь  $h$  – наименьший габарит сеток); диаметр стержней сеток  $d \leq 8 \text{ мм}$ .

Относительные деформации в вершине диаграммы сжатия  $\varepsilon_{b03}$  зависят, главным образом, от относительного уровня бокового обжатия и прочности бетона. Зависимость (3) для относительных деформаций принимаем по аналогии с работой [2] (с пересчетом на российские нормы). Преимуществом данной формулы является ее универсальность (не зависит от природы возникновения усилия бокового обжатия). Для расчетов по формуле (3) необходимо подобрать зависимость для определения приведенного усилия бокового обжатия  $\sigma_{xy}$ . При косвенном армировании поперечными сетками усилие обжатия приложено дискретно по длине элемента и неравномерно в пределах ячейки. Все это создает сложности в определении  $\sigma_{b,xy}$ .

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{b03} &= e^n \varepsilon_{b0}; \\ n &= (2.9224 - 0.00408R_b) \left( 0.9 \frac{\sigma_{xy}}{R_b} \right)^{(0.3124 + 0.0022R_b)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Определить  $\sigma_{xy}$  можно через коэффициент эффективности косвенного армирования  $K$  по формуле, предложенной в [19]:

$$K = \frac{1}{0.1 + 0.9m}, \quad (4)$$

где  $m = \sigma_{b,xy} / R_{b3}$ .

В исследованиях [1–2] выявлено существенное влияние прочности бетона на коэффициент  $K$ . Учесть это влияние можно добавлением к формуле (4) поправки  $\Delta K = 2.9 - \ln R_b$  [20].

Относительные деформации  $\varepsilon_{bu3}$  в конце нисходящей ветви принимаем в соответствии с СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции»:

$$\varepsilon_{bu3} = \varepsilon_{bu} \frac{\varepsilon_{b03}}{\varepsilon_{b0}} = \varepsilon_{bu} e^n \quad (5)$$

Напряжение в конце нисходящей ветви  $\sigma_{bu3}$ :

$$\sigma_{bu3} = 0.8R_{b3}, \quad (6)$$

что хорошо соотносится с опытными диаграммами из работы [16].

Известно [10,13], что чем ниже класс бетона, тем в меньшей степени косвенное армирование влияет на прочностные характеристики, но при этом сильнее повышаются предельные деформации. Данный факт хорошо заметен на опытных диаграммах из работы [10]. Аналогичные результаты получены и при расчетах по формулам (1) и (3). Это приводит к тому, что вблизи вершины диаграммы появляется пологий (практически горизонтальный) участок  $\varepsilon_{b33} - \varepsilon_{b03}$ , который тем протяженнее, чем ниже класс бетона и выше процент армирования.

На участке восходящей ветви от 0 до  $\varepsilon_{b33}$  принята зависимость в виде многочлена четвертой степени:

$$\sigma_b = p_1 \varepsilon_b^4 + p_2 \varepsilon_b^3 + p_3 \varepsilon_b^2 + p_4 \varepsilon_b. \quad (7)$$

Коэффициенты многочлена находятся из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_b(\varepsilon_{b13}) &= E_{b0} \\ \sigma_b(\varepsilon_{b23}) &= 0.62R_{b3} \\ \sigma_b(\varepsilon_{b33}) &= R_{b3} \\ \sigma'_b(\varepsilon_{b33}) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Первое уравнение системы (8) получено исходя из того, что начальный модуль упругости бетона с сетками равен начальному модулю упругости для неармированного бетона. Здесь  $\varepsilon_{b13}$  принимается достаточно малой величиной (в расчетах принято  $\varepsilon_{b13} = \varepsilon_{b03} \cdot 10^{-3}$ ).

Второе уравнение получено на основании выводов, приведенных в работе [16] о том, что при построении экспериментальных диаграмм в относительных координатах  $(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b03}}; \frac{\sigma_b}{R_{b3}})$  точки диаграмм располагаются достаточно близко для разных процентов армирования и классов бетона. По опытным данным [10,16] для бетонов прочностью  $R_b = 13.1 \div 30.9$  с коэффициентом косвенного армирования  $\mu_{s,xy} = 2 \div 5.4\%$  была получена точка с осредненными координатами (0.23; 0.62). Таким образом,  $\varepsilon_{b23} = 0.23 \cdot \varepsilon_{b03}$ .

Для вычисления  $\varepsilon_{b33}$  для бетона прочностью  $R_b \geq 13$  МПа и косвенным армированием  $\mu_{s,xy} \leq 6\%$ ,  $R_s \leq 575$  МПа предлагается зависимость (9):

$$\varepsilon_{b33} = \varepsilon_{b03} \left[ (-0.38R_b + 3.31)\mu_{xy} + e^{(0.039R_b - 1)} \right] \leq \varepsilon_{b03}. \quad (9)$$

В итоге система уравнений (8) преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} E_{b0} &= p_1 4\varepsilon_{b13}^3 + p_2 3\varepsilon_{b13}^2 + p_3 2\varepsilon_{b13} + p_4 \\ 0.62R_{b3} &= p_1 \varepsilon_{b23}^4 + p_2 \varepsilon_{b23}^3 + p_3 \varepsilon_{b23}^2 + p_4 \varepsilon_{b23} \\ R_{b3} &= p_1 \varepsilon_{b33}^4 + p_2 \varepsilon_{b33}^3 + p_3 \varepsilon_{b33}^2 + p_4 \varepsilon_{b33} \\ 0 &= p_1 4\varepsilon_{b33}^3 + p_2 3\varepsilon_{b33}^2 + p_3 2\varepsilon_{b33} + p_4 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Решение уравнений (10) позволяет определить коэффициенты многочлена (7), описывающего процесс деформирования на участке восходящей ветви от 0 до  $\varepsilon_{b33}$ . Общий вид полученной диаграммы представлен на рис. 2.

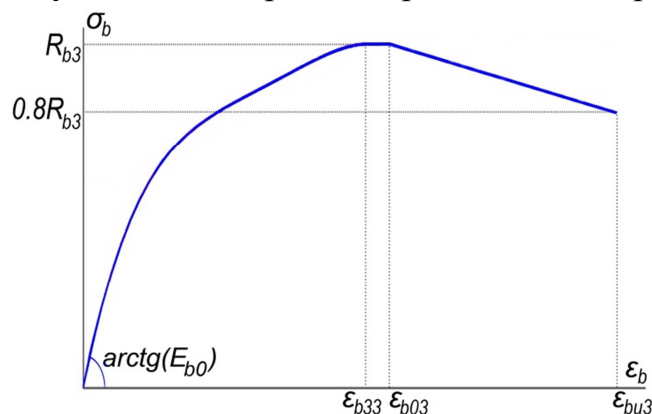
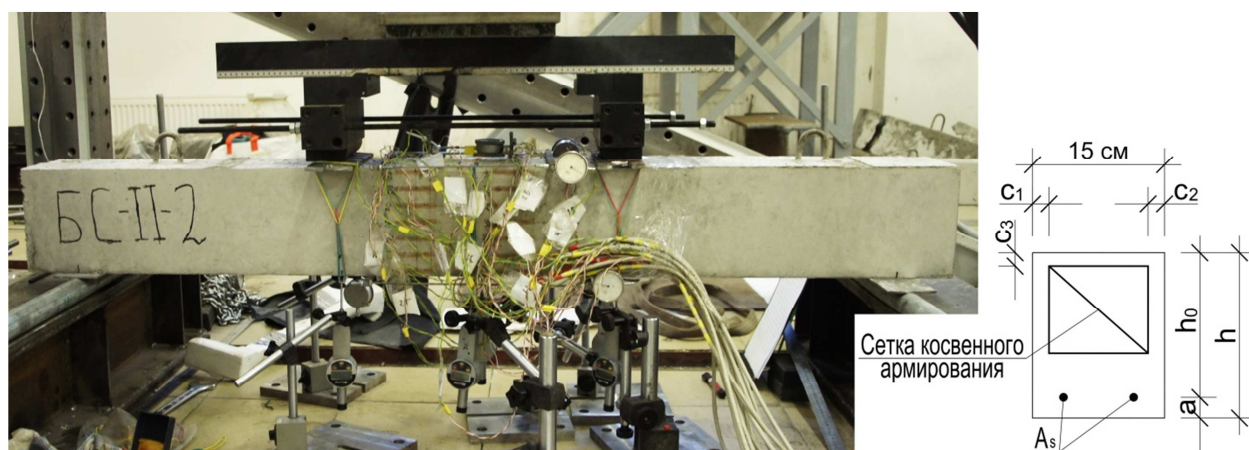


Рисунок 2 – Диаграмма состояния сжатого бетона, усиленного сетками косвенного армирования

**КЭ моделирование балок с косвенным армированием сжатой зоны в виде поперечных сварных сеток.** Были изготовлены и испытаны три серии железобетонных балочных образцов. Схема испытаний – четырехточечный изгиб. Каждая серия состояла из эталонного образца без сеток косвенного армирования и двух образцов с различным процентом косвенного армирования сжатой зоны в виде сварных сеток. Серии отличались между собой процентом продольного армирования. Экспериментальные исследования проводились на базе экспертно-диагностической испытательной лаборатории строительных конструкций (НИУ МГСУ). Подготовка к испытанию и параметры опытных образцов представлены на рис. 3 и в таблице 1. Так как до образования трещин, ввиду развития относительно небольших деформаций в сжатой зоне, сетки косвенного армирования практически не влияют на процесс деформирования, дальнейший анализ кривизны производился главным образом на этапах нагружения после образования трещин. Для большей точности момент трещинообразования приведен средний для серии.



**Рисунок 3 – Подготовка балки к испытанию и параметры сечения**

**Таблица 1 – Фактические параметры опытных образцов**

Шифр образца	$h$ , см	$h_0$ , см	$c_1 + c_2$ , см	$c_3$ , см	$R_b$ , МПа	$E_{b0}$ , МПа* $10^3$	$A_{s2}$ , см <sup>2</sup>	$R_s$ , МПа	$\mu_{xy}$	$R_{s,xy}$ , МПа	$M_{crсr}$ , кНм
БС-I-0	19.7	16.4	-	-	28.4	30.9	7.33	439	0	-	9.3
БС-I-1	19.8	16.5	3.0	1.4	28.4	30.9	7.33	439	0.025	492	
БС-I-2	19.9	16.6	3.0	1.5	28.4	30.9	7.33	439	0.05	492	
БС-II-0	19.9	16.1	-	-	30.1	31.4	9.43	437	0	-	10.0
БС-II-1	19.8	16.0	3.0	1.4	30.1	31.4	9.43	437	0.025	492	
БС-II-2	20.0	16.2	3.0	1.6	30.1	31.4	9.43	437	0.05	492	
БС-III-0	20.0	15.8	-	-	28.6	30.9	12.4	411	0	-	10.2
БС-III-1	20.0	15.8	3.0	1.7	28.6	30.9	12.4	411	0.025	492	
БС-III-2	20.1	15.9	3.0	1.8	28.6	30.9	12.4	411	0.05	492	

Нагружение образцов производилось ступенями. На каждой ступени при помощи тензорезисторов, наклеенных на боковую поверхность и на арматуру, замерялись значения деформаций продольной арматуры  $\varepsilon_s$  и деформации верхней наиболее сжатой грани  $\varepsilon_{b,max}$  в зоне чистого изгиба, по которым вычислялась кривизна сечения  $1/r$  (11). Зависимости кривизны сечения от изгибающего момента на этапах нагружения 1–9 представлены на рис. 4.

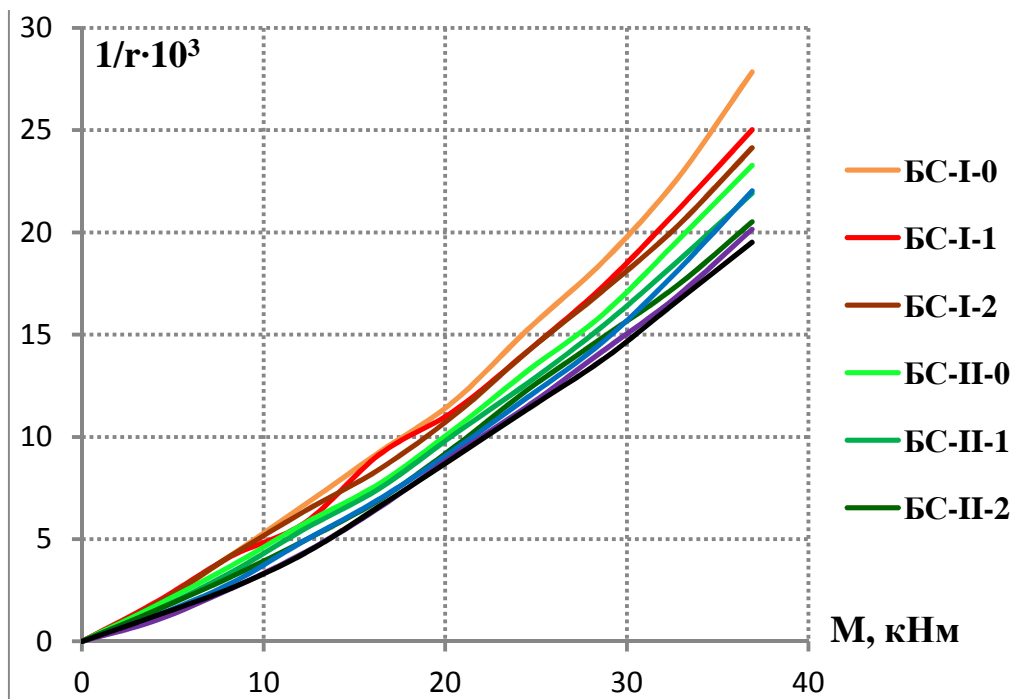
$$\frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_{b,\max} + \varepsilon_s}{h_0} \quad (11)$$

Уменьшение прогибов образцов с сетками относительно образцов прототипов, замеренное перед последним этапом нагружения составило:

- 1) для серии **I** на **7.8%** и **9.4%** соответственно;
- 2) для серии **II** на **7.2%** и **11.9%** соответственно;
- 3) для серии **III** на **11.6%** и **14.4%** соответственно.

При достижении в зоне чистого изгиба значения момента  $M_{p.з.}$  происходило отслоения бетона защитного слоя, что сопровождалось некоторым падением несущей способности (до 15%) и скачком прогибов. При дальнейшем нагружении с ростом прогибов по всем образцам наблюдался некоторый рост несущей способности и далее плавное падение несущей способности. Нагружение завершалось либо при исчерпании запаса хода гидроцилиндра, либо при существенном выкручивании опорной пяты гидроцилиндра и невозможности дальнейшего корректного приложения нагрузки, и вплоть до конца испытания несущая способность падала плавно без существенных скачков. Полученные данные свидетельствуют о том, что предельные прогибы образцов с сетками повышаются как минимум на порядок и при этом сохраняется достаточно высокая несущая способность.

Повышение значения изгибающего момента, соответствующего разрушению защитного слоя, относительно момента разрушения сжатой зоны образцов без косвенного армирования составило **11...30%** в зависимости от коэффициента косвенного армирования и площади продольного армирования.



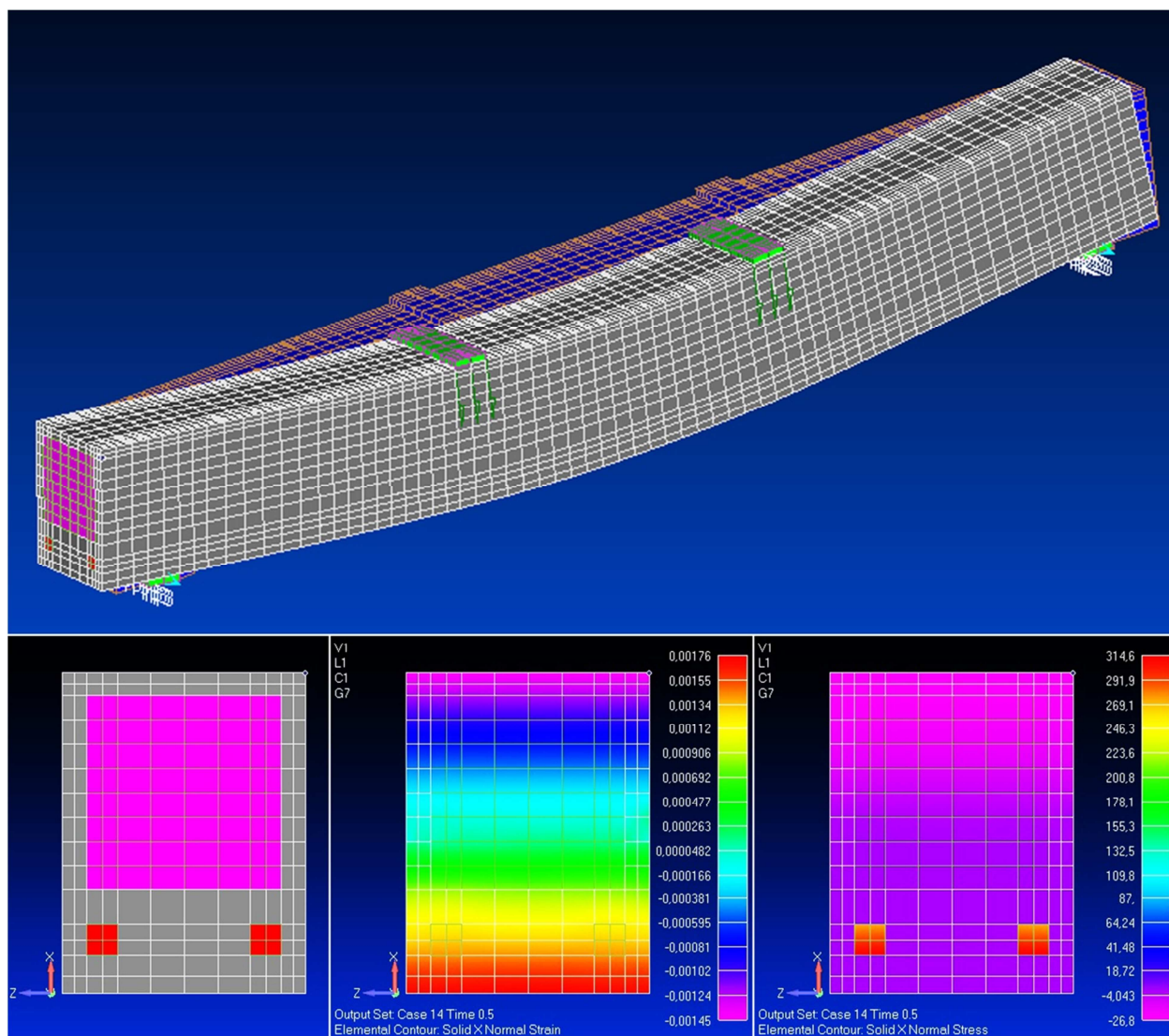
*Рисунок 4 – Зависимость кривизны  $1/r$  в зоне чистого изгиба от изгибающего момента  $M$  для испытанных образцов*

Был произведен нелинейный статический расчет конечно-элементных моделей балок, соответствующих опытным образцам. КЭ модели собирались в

пре/постпроцессоре Femap 11.1.1 (рис. 5). В качестве решателя использовался NX Nastran. Нагрузка прикладывалась поэтапно, в соответствии со ступенями нагружения опытных образцов.

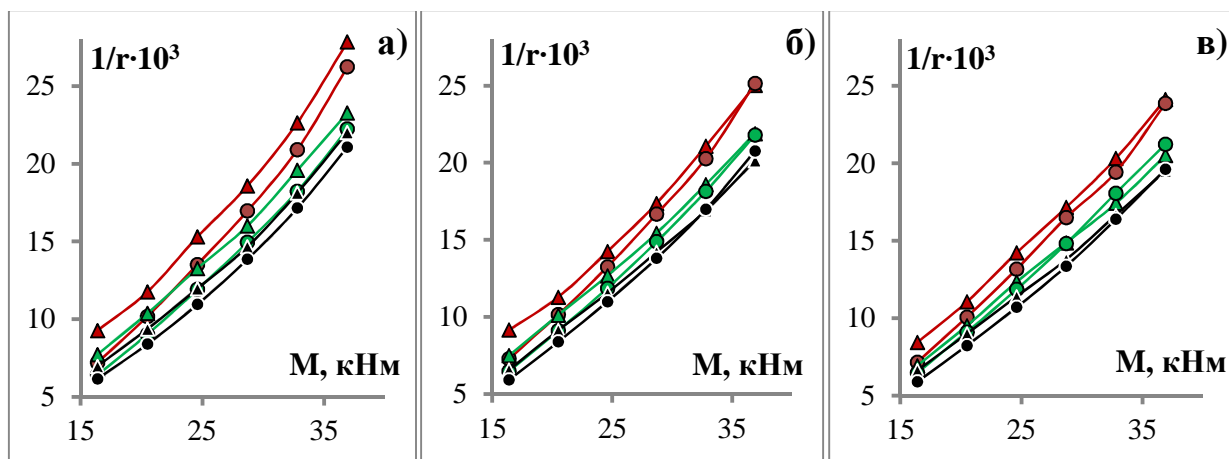
Бетон и продольное армирование моделировалось конечными элементами типа solid, для поперечных хомутов применялись стержневые элементы. Для бетона, усиленного сетками, задавалась диаграмма, полученная по предложенной методике. Для бетона защитного слоя принималась диаграмма из работы [19]. Для продольного армирования задавалась приведенная диаграмма, предложенная в работе [21], в которой влияние бетона между трещинами на деформации арматуры учитывается через коэффициент  $\psi_s$ .

Целью данного расчета являлось получение данных о деформациях и кривизне в зоне чистого изгиба балок на различных этапах нагружения для последующего сравнения с результатами эксперимента и оценки точности описания процесса деформирования предложенными диаграммами. Сравнение опытных значений кривизны с результатами нелинейного статического расчета в NX Nastran приведено на рис. 6.



**Рисунок 5 – КЭ модель балки с косвенным армированием, схема разбиения нормального сечения на зоны, изополя деформаций и изополя напряжений соответственно**

По результатам сравнения получено, что сходимость экспериментальных и расчетных значений кривизны улучшается с ростом нагрузки. Для большинства этапов разница значений находится в пределах 10%, но для этапов нагружения непосредственно после образования трещин расхождение по некоторым образцам достигло 24%. Это можно объяснить тем, что коэффициент  $\psi_s$  несколько переоценивает снижение деформаций арматуры от влияния растянутого бетона непосредственно после образования трещин.



а)  $\mu_{xy}=0$ ; б)  $\mu_{xy}=0.025$ ; в)  $\mu_{xy}=0.05$

Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных значений кривизны (▲) с результатами расчета в NX Nastran (●) для балок серии I (—); II (—); III (—):

### Заключение

1. Получена методика построения аналитических диаграмм работы на сжатие бетона, усиленного косвенным армированием.

2. Чем выше нагрузка, тем активнее включается в работу косвенное армирование в виде сварных сеток в сжатой зоне изгибаемых элементов, снижая деформации сжатой зоны, а вместе с тем кривизну и прогибы.

3. Наличие косвенного сетчатого армирования в сжатой зоне меняет характер разрушения балок с хрупкого на пластический. При этом на порядок возрастают предельные прогибы с сохранением высокой остаточной несущей способности.

4. Получена хорошая сходимость экспериментальных значений деформаций сжатой зоны балок и кривизны в зоне чистого изгиба со значениями, полученными по результатам расчета с применением решателя NX Nastran для поздних этапов нагружения (в пределах 10%). Для этапов нагружения непосредственно после образования трещин полученные аналитические значения кривизны несколько занижены.

### Список цитированных источников

1. Lu, X. Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression / X. Lu, C. Hsu // J Mater Civil Eng. 2007. – № 19(3). – P. 261–268.

2. Attard, M. A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression / M. Attard, A.K. Samani // Eng Struct. – 2012. – № 41. – P. 335–349.

3. Манаенков, И. К. Учет свойств ограниченного бетона в российских нормах проектирования бетонных и железобетонных конструкций / И. К. Манаенков // Новая наука: Стратегии и векторы развития. – 2015. – № 4. – С. 89–92.



4. Расторгуев, Б. С. Расчет железобетонных элементов с поперечным сетчатым армированием / Б. С. Расторгуев, Д. С. Ванус // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 10. – С. 53–54.
5. Шериф, М. Исследование замоноличенных стыков колонн сборных железобетонных каркасов многоэтажных зданий: дисс. ... канд. техн. наук / Шериф Мохамед Хельми Абдель Хамид Сулейман. – Москва: НИИЖБ, 1969. – 114 с.
6. Тамразян, А. Г. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны / А. Г. Тамразян, И. К. Манаенков // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 7. – С. 41–44.
7. Тамразян, А. Г. К расчету плоских железобетонных перекрытий с учетом фактической жесткости сечения / А. Г. Тамразян, И. К. Манаенков // Научное обозрение. – 2015. – № 8. – С. 87–92.
8. Кришан, А. Л. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием сетками / А. Л. Кришан, Р. Р. Сабилов, М. А. Кришан // Архитектура. Строительство. Образование. – 2014. – № 1(3). – С. 215–224.
9. Довгалюк, А. Ф. Исследование сжатых железобетонных элементов с косвенным сетчатым армированием / А. Ф. Довгалюк, В. И. Довгалюк // Прочность конструкций многоэтажных зданий: сборник МНИИТЭП. – Москва: Стройиздат, 1968. – С. 117–128.
10. Henzel, J. Untersuchungen über die Tragfähigkeit netzbewehrten Betonsäulen: Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Darmstadt zur Erlangung der Würde eines. Doktor-Ingenieurs genehmigte dissertation. – Darmstadt, 1964. – P. 1–51.
11. Филиппов, Б. П. Прочность и деформативность сжатых элементов с косвенным армированием / Б. П. Филиппов, Н. Г. Матков // Бетон и железобетон. – 1973. – № 4. – С. 64–86.
12. Петрова, К. В. Несущая способность сжатых элементов с поперечными сетками / К. В. Петрова, М. А. Юлдашев, В. И. Попугаев // Исследование конструкций из бетонов на пористых заполнителях: сборник. – Москва: НИИЖБ, 1981. – С. 67–111.
13. Роговой, С. И. Экспериментально-теоретические исследования кососжатых железобетонных элементов с косвенным сетчатым армированием: дисс. ... канд. техн. наук / С. И. Роговой. – Полтава, 1980. – 161 с.
14. Карнет, Ю. Н. Исследование сжатых железобетонных элементов с сеточным армированием и продольной высокопрочной арматурой: дисс. ... канд. техн. наук / Ю. Н. Карнет. – Свердловск, 1973. – 186 с.
15. Гончаров, А. А. Внецентренно сжатые железобетонные элементы с косвенным армированием при кратковременном динамическом нагружении: автореферат дисс... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. А. Гончаров. – Москва, 1988. – 186 с.
16. Матков, Н. Г. О диаграммах деформирования сжимаемых железобетонных элементов с продольным и поперечным армированием // Совершенствование методов расчета статически неопределимых элементов железобетонных конструкций: тр. ин-та НИИЖБ – 1987. – С. 135–142.
17. Бакиров, К. К. Несущая способность сжатых железобетонных элементов прямоугольного сечения с косвенным армированием в виде сеток (при кратковременном действии нагрузки): дис. ... канд. техн. наук / К. К. Бакиров. – Москва, 1976. – 127 с.
18. Гринева, Н. В. Работа центрально-сжатых железобетонных элементов конструкций с косвенным армированием: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Н. В. Гринева. – Харьков, 1984. – 199 с.
19. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона. – Москва: Стройиздат, 1996. – 416 с.
20. Кришан, А. Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов / А. Л. Кришан, А. И. Заикин, М. С. Купфер // Бетон и железобетон. – 2008. – № 2. – С. 22–24.
21. Карпенко, С. Н. О построении связей между приращениями напряжений и деформаций на основе различных диаграмм / С. Н. Карпенко // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 566–569.