

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.012.4545

DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-2-9

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук Э. ЧАПАРАНГАНДА<sup>2)</sup>*

*(<sup>1)</sup>Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
<sup>2)</sup>Ботсванский международный университет науки и технологий)*

*В статье приводятся результаты экспериментально-теоретического исследования изгибаемых железобетонных элементов при действии статической нагрузки, доведенных до разрушения и восстановленных с заменой участка деформированной рабочей арматуры, в том числе и с предварительным напряжением нового участка арматуры. Установлены особенности их работы под нагрузкой.*

*Выполнено на основе общей деформационной модели поперечного сечения моделирование напряженно-деформированного состояния восстановленных изгибаемых железобетонных элементов, а также сопоставление вычисленных параметров напряженно-деформированного состояния с их опытными значениями.*

**Ключевые слова:** *изгибаемый железобетонный элемент, исходная опытная балка, восстановленная опытная балка, напряженно-деформированное состояние, бетон, арматура, разрушающий изгибающий момент, ширина раскрытия трещин, прогиб балки.*

**Введение.** В процессе эксплуатации железобетонных конструкций зданий и сооружений при воздействии условий окружающей среды (переменного замораживания и оттаивания в водонасыщенном состоянии, высоких температур, химического воздействия и др.) в ряде случаев на отдельных участках конструкций существенно снижается прочность бетона, уменьшается площадь поперечного сечения рабочей арматуры. Кроме того, в случае землетрясений, взрывов, аварий техногенного характера происходит разрушение бетона и арматуры железобетонных конструкций в зоне максимального воздействия.

Одним из путей реконструкции зданий и сооружений может быть восстановление разрушенных железобетонных конструкций путем замены разрушенного бетона и арматуры.

Экспериментально-теоретическое исследование изгибаемых железобетонных элементов, восстановленных после разрушения, включало испытание опытных балок для выявления особенностей их деформирования под нагрузкой, моделирование их напряженно-деформированного состояния (НДС), расчет и сопоставление с опытными значениями основных параметров НДС на основе общей деформационной модели поперечного сечения железобетонных конструкций [1, с. 224–230; 2; 3].

**Методика экспериментального исследования.** Для проведения исследования напряженно-деформированного состояния восстановленных после разрушения изгибаемых железобетонных элементов в лабораторных условиях было изготовлено 8 опытных железобетонных балок длиной 1500 мм и размерами поперечного сечения 80×160 мм.

Опытные балки были изготовлены из мелкозернистого бетона со средней плотностью 2340 кг/м<sup>3</sup> и средними значениями призменной прочности при сжатии  $f_{cm}=10,2...10,8$  МПа, начального модуля упругости  $E_{cm}=23\cdot 10^3$  МПа и прочности при растяжении  $f_{ctm}=1,08$  МПа. Прочностные и деформационные характеристики бетона определялись во время испытаний специальных образцов (призм, кубов) при сжатии и раскалывании.

В качестве рабочей арматуры растянутой зоны опытных балок применялась свариваемая стержневая горячекатаная арматура из стали марки 35ГС диаметром 12 мм со средними значениями предела текучести  $\sigma_{ym}=437...450$  МПа, временного сопротивления  $\sigma_{tm}=634...658$  МПа и модуля упругости  $E_s=2,1\cdot 10^5$  МПа. С целью исключения возможности разрушения опытных балок в зоне среза их приопорные зоны длиной 500 мм были армированы поперечной арматурой из проволоки диаметром 4 мм с шагом 75 мм.

Испытание исходных опытных балок проводилось по балочной схеме с шарнирным опиранием по концам двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета. В процессе испытаний вплоть до разрушения измеряли деформации бетона и арматуры, прогиб, ширину раскрытия трещин.

После разрушения опытных балок с помощью механизованного инструмента вырубался бетон в средней трети балок, оголялась рабочая арматура. Рабочая арматура в растянутой зоне вырезалась, и к концам существующей арматуры внахлест на длине 150 мм приваривался отрезок заменяющей арматуры. В качестве заменяющей рабочей арматуры опытных балок использовалась арматура из того же стержня, что и арматура исходной балки.

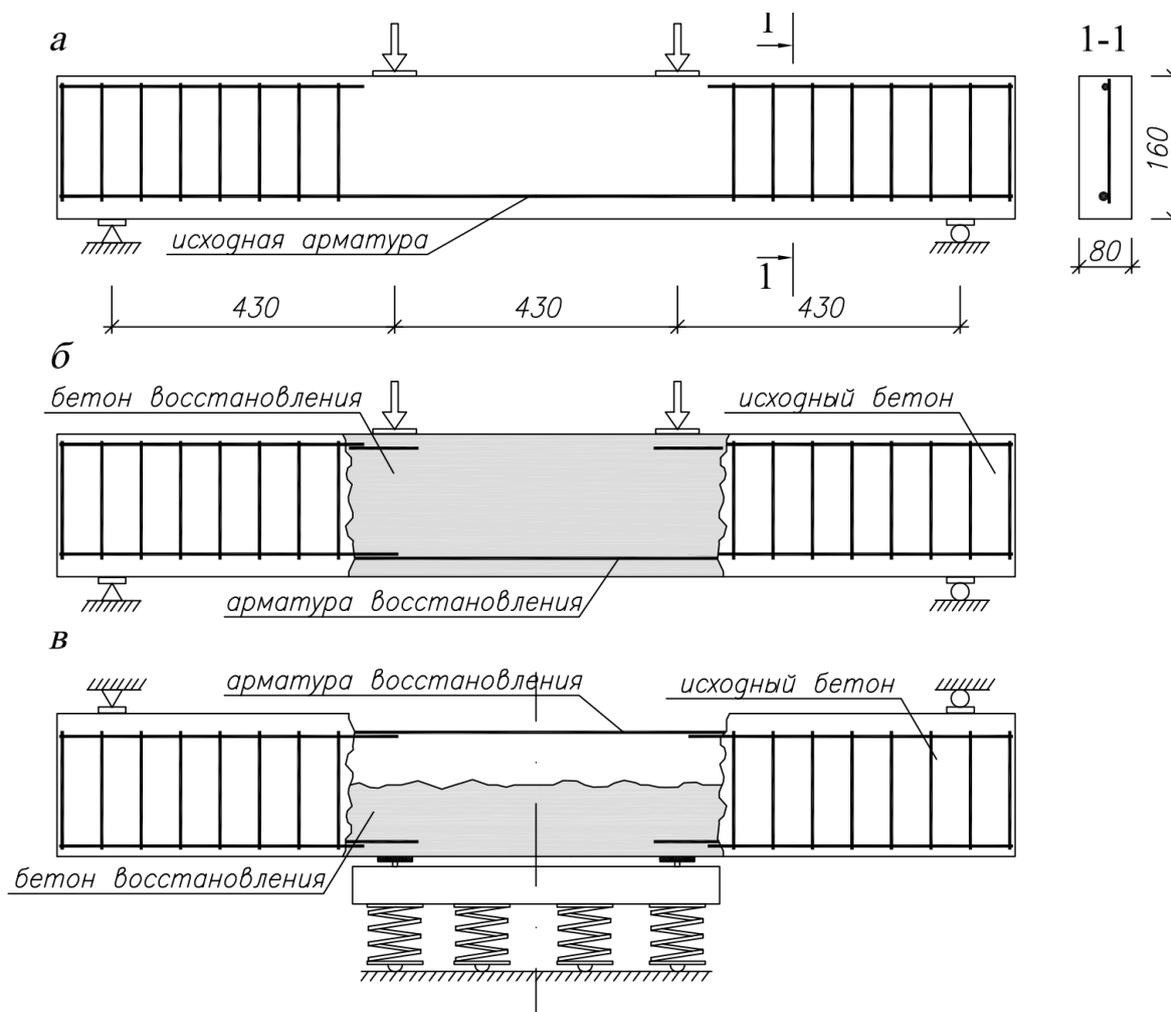
После этого опытная балка устанавливалась в опалубку и производилось бетонирование средней трети балки.

Балки Б-V...Б-VIII восстанавливались с предварительным напряжением восстановленного участка арматуры. Для этого сохраняемые участки балок по концам с восстановленной рабочей арматурой устанавливались со строительным подъемом, затем бетонировалась сжатая зона конструкции. После набора прочности бетона сжатой зоны опытную балку нагружали предварительно сжатыми пружинами, которые освобождали после их установки (рисунок 1). При этом заменяющая арматура в растянутой зоне балок получала предварительное растягивающее напряжение, затем производили бетонирование растянутой зоны балок в нагруженном состоянии. Величина предварительного напряжения подбиралась такая, чтобы исключить образование трещин в верхней зоне балок при отпуске, и контролировалась по деформациям арматуры с помощью тензорезисторов. Предварительное напряжение в момент времени бетонирования составляло 200 МПа. После набора прочности бетоном растянутой зоны пружины сжимали, освобождая восстановленную балку от нагрузки. Предварительное напряжение восстановленной арматуры после отпуска натяжения согласно показаниям тензорезисторов составляло 172...184 МПа.

Для восстановления опытных балок после разрушения применялся мелкозернистый бетон со следующими прочностными и деформационными характеристиками в момент испытания восстановленных опытных балок:  $f_{cm}=11,2...19,5$  МПа,  $E_{cm}=(23...31,1)\cdot 10^3$  МПа,  $f_{ctm}=1,1...1,64$  МПа.

Испытание восстановленных опытных балок производилось по аналогичной схеме, что и испытание исходных балок.

Номенклатура, геометрические размеры поперечных сечений и характеристики свойств материалов опытных балок (исходных и восстановленных) приведены в таблице 1.



**а** – схема испытания и конструкция исходных опытных балок;  
**б** – схема испытания и конструкция восстановленных опытных балок;  
**в** – схема предварительного напряжения восстановленной рабочей арматуры

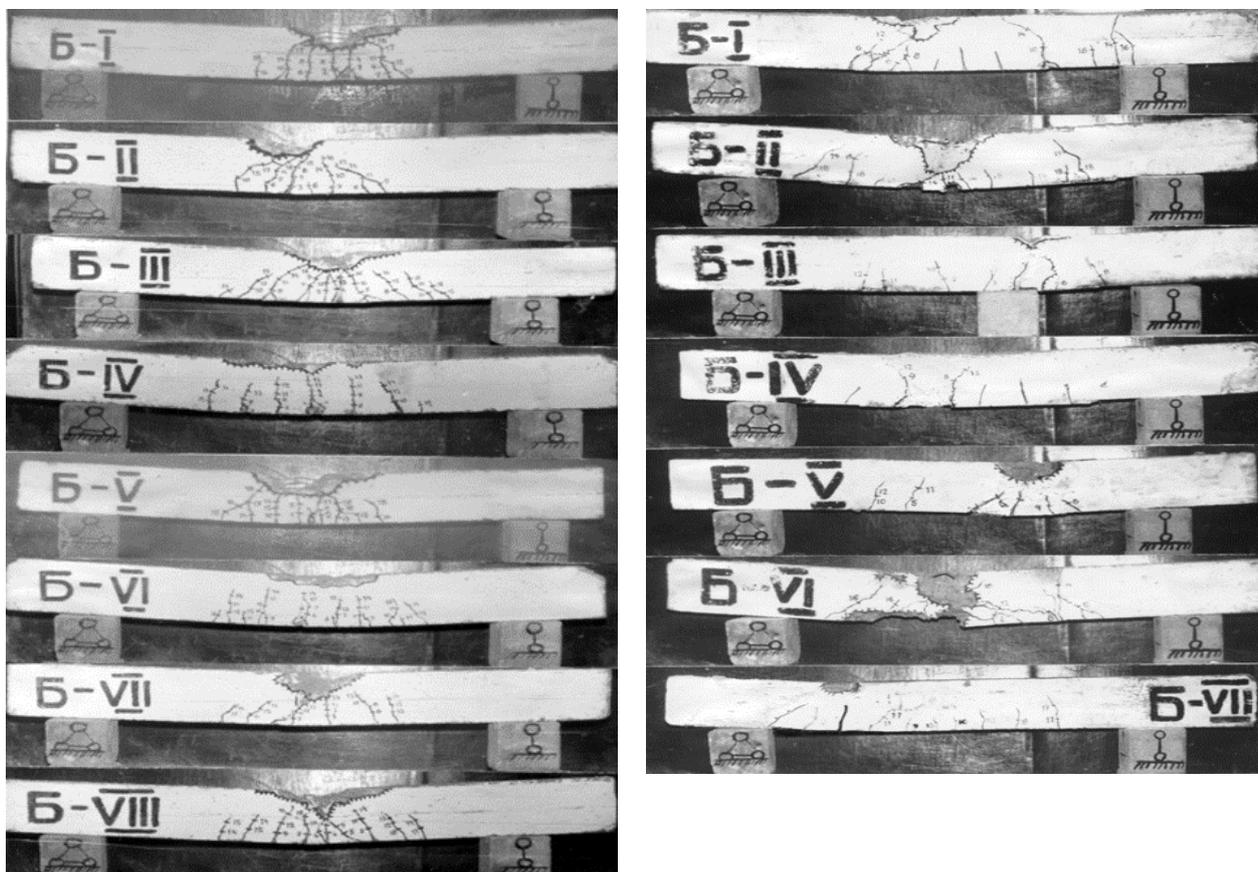
Рисунок 1. – Схема испытания и конструкция опытных балок

Таблица 1. – Номенклатура, размеры сечений и характеристики материалов опытных балок

Шифр балки	Размеры сечения исходной балки			Бетон исходной балки			Исходная и заменяющая арматура			Бетон восстановленной части балки			Размеры сечения балки после восстановления		
	$b$ , мм	$h$ , мм	$d$ , мм	$f_{cm}$ , МПа	$f_{ctm}$ , МПа	$E_c 10^3$ , МПа	$\sigma_{ym}$ , МПа	$\sigma_{tm}$ , МПа	$E_s 10^5$ , МПа	$f_{cm}$ , МПа	$f_{ctm}$ , МПа	$E_c 10^3$ , МПа	$b$ , мм	$h$ , мм	$d$ , мм
Б-I	85	160	135	10,8	1,08	23,0	450	658	2,1	11,2	1,1	23,0	88	165	144
Б-II	80	159	132	10,8	1,08	23,0	437	634	2,1	11,2	1,1	23,0	83	167	150
Б-III	80	155	130	10,2	1,08	23,0	437	634	2,1	19,5	1,64	31,1	82	170	148
Б-IV	85	160	132	10,2	1,08	23,0	450	658	2,1	19,5	1,64	31,1	87	160	144
Б-V	85	162	137	10,8	1,08	23,0	437	634	2,1	11,2	1,1	23,0	88	168	139
Б-VI	85	165	138	10,8	1,08	23,0	450	658	2,1	11,2	1,1	23,0	86	170	136
Б-VII	80	160	135	10,2	1,08	23,0	437	634	2,1	19,5	1,64	31,1	84	168	138
Б-VIII	80	160	132	10,2	1,08	23,0	437	634	2,1	19,5	1,64	31,1	85	170	148

**Результаты экспериментального исследования.** Разрушение опытных балок, как исходных, так и восстановленных, происходило в зоне действия максимального изгибающего момента в результате достижения растянутой арматурой предела текучести с последующим разрушением бетона сжатой зоны, за исключением одной восстановленной балки Б-VIII, разрушение которой было вызвано разрывом продольной арматуры балки в месте приварки при нагрузке, составляющей 65% от разрушающей нагрузки исходной балки. Это связано с прожогом и охрупчиванием арматуры при электродуговой сварке (нарушение режима сварки в виде чрезмерной силы тока). Характер разрушения исходных и восстановленных опытных балок после разрушения приведен на рисунке 2.

Особенностью трещинообразования восстановленных опытных балок являлось более раннее образование трещин нормального отрыва в месте контакта бетона исходных балок и нового бетона, что объясняется величиной адгезии нового и старого бетона, меньшей чем прочность бетона на растяжение. Расстояние между трещинами, средняя ширина их раскрытия и прогиб исходных балок и восстановленных после разрушения практически не отличались на всех этапах нагружения. Увеличение прочности бетона восстановленных балок в зоне чистого изгиба уменьшало деформативность и повышало несущую способность по сравнению с исходными балками. Предварительное напряжение рабочей арматуры восстановленных балок Б-V...Б-VII уменьшало их деформативность и ширину раскрытия трещин нормального отрыва по сравнению с исходными опытными балками.



а – исходные опытные балки

б – восстановленные опытные балки

Рисунок 2. – Вид опытных балок после разрушения

**Моделирование НДС изгибаемых железобетонных элементов, восстановленных после разрушения.**

Общая деформационная модель поперечного сечения железобетонных элементов, основанная на гипотезе плоского сечения для распределения осредненных деформаций по сечению, уравнениях равновесия и диаграммах деформирования бетона и арматуры, позволяет получить основные параметры НДС железобетонных элементов при действии нагрузки на любом этапе их работы<sup>1</sup> [1, с. 224–230; 2; 3].

Расчет разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин нормального отрыва, прогиба в середине пролета при эксплуатационной нагрузке исходных опытных балок выполнялся по разработанной методике [1, с. 224–230].

Для изгибаемых железобетонных элементов уравнения напряженно-деформированного состояния имеют вид:

$$\sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{ci} (y_0 - y_{ci}) + \sum_{i=k+1}^n \sigma_{si} A_{si} (y_0 - y_{si}) - M = 0;$$

$$\sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{i=k+1}^n \sigma_{si} A_{si} = 0; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{(c,s)i} = \frac{1}{r} (y_0 - y_{(c,s)i}), \quad \sigma_{(c,s)i} = f(\varepsilon_{(c,s)i}),$$

где  $M$  – изгибающий момент от внешней нагрузки;

$\sigma_{(c,s)i}$  и  $\varepsilon_{(c,s)i}$  – нормальные напряжения и относительные деформации соответственно в  $i$ -той элементарной площадке бетона или арматуры;

$A_{(c,s)i}$  и  $y_{(c,s)i}$  – соответственно площадь сечения и расстояние от выбранной оси до центра тяжести  $i$ -той элементарной площадки бетона или арматуры;

$y_0$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения;

$k$  и  $(n-k)$  – количество элементарных площадок соответственно бетона и арматуры в поперечном сечении.

Пример вычисленного распределения относительных деформаций и напряжений по поперечному сечению исходной опытной балки Б-1 в предельном по прочности состоянии приведен на рисунке 3.

Критерием образования трещин нормального отрыва является достижение элементарным слоем бетона на уровне центра тяжести арматурного стержня предельных относительных деформаций  $\varepsilon_{ctm,u}$ . Максимальное значение изгибающего момента  $M_u$ , при котором выполняются условия равновесия (1) в поперечном сечении с трещиной, соответствует прочности железобетонного элемента.

Для вычисления изгибающего момента образования трещин  $M_{cr}$  и соответствующего его прочности  $M_u$  использовалась билинейная диаграмма деформирования свободной арматуры<sup>2,3,4</sup>; в первом случае вследствие ее совместной работы с бетоном без сдвигов; во втором – вследствие приближения коэффициента  $\psi_s$  к значению, равному 1<sup>5</sup>.

Вычисление жесткости участка по длине изгибаемого железобетонного элемента с трещинами для расчета прогибов опытных плит производилось с учетом работы растянутого бетона как среднее значение суммы жесткостей элементарных площадок бетона и арматуры по границам участка

$$(EI)_j = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n E_{(c,s)i} A_{(c,s)i} (y_0 - y_{(c,s)i})^2 \right]_j + \left[ \sum_{i=1}^n E_{(c,s)i} A_{(c,s)i} (y_0 - y_{(c,s)i})^2 \right]_{j+1}}{2}. \quad (2)$$

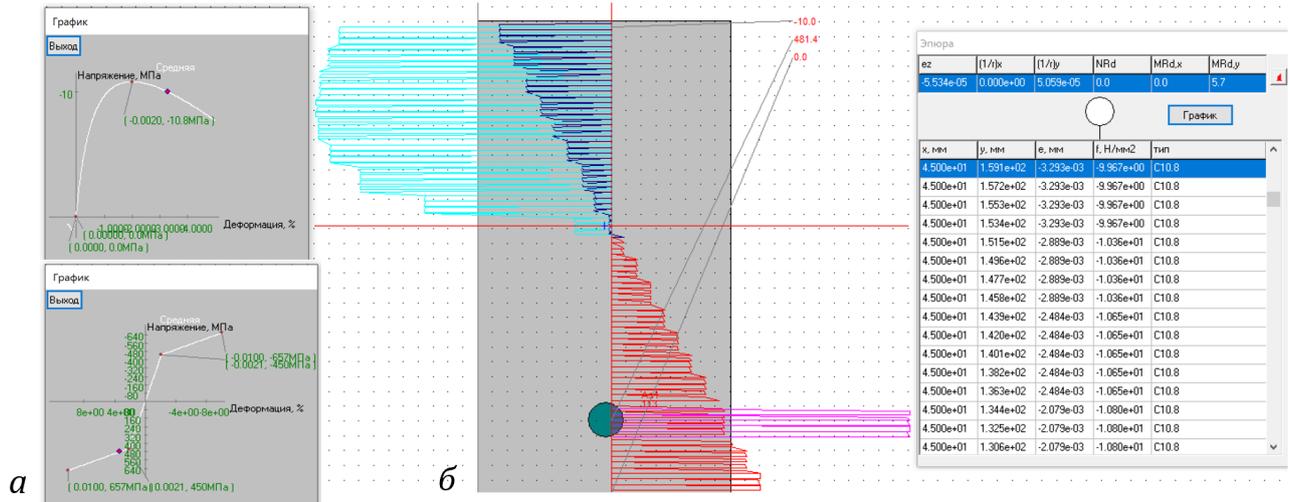
<sup>1</sup> Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования: метод. пособие. – М.: М-во стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Рос. Федерации, 2017. – 197 с. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293740/4293740525.htm>.

<sup>2</sup> СЕВ-FIB Model Code for Concrete Structures 2010. URL: <https://www.wiley.com/en-us/fib+Model+Code+for+Concrete+Structures+2010-p-9783433604083>.

<sup>3</sup> СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. – Москва, 2018. – 143 с.

<sup>4</sup> СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск, 2020. – 236 с.

<sup>5</sup> Lazouski D., Gluhov D., Lazouski Y. Modeling the behavior of statically indeterminate reinforced concrete structures under load // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сб. науч. ст. XXII Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 29–30 сент. 2022 г. / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 95–107. URL: <https://rep.bstu.by/handle/data/32920>.



а – диаграммы деформирования бетона и арматуры с отметками красной точкой состояния наиболее сжатого волокна бетона и рабочей арматуры; б – распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения (цифры на выносных линиях – напряжения в МПа) (синим и красным цветом – относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах: голубым и розовым – аналогично, напряжений)

Рисунок 3. – Моделирование НДС в поперечном сечении исходной опытной балки Б-I

Результаты сопоставления опытных и расчетных значений разрушающего изгибающего момента  $M_u$ , момента образования  $M_{cr}$  и среднего значения (в зоне чистого изгиба) ширины раскрытия трещин  $w$ , прогибов  $a$  для исходных опытных балок приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Экспериментальные и расчетные значения разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин, прогибов исходных опытных балок

Шифр балки	$M_u^{exp}$ , кНм	$M_u^{th}$ , кНм	$M_u^{exp}$	$M_{cr}^{exp}$ , кНм	$M_{cr}^{th}$ , кНм	$M_{cr}^{exp}$	$w^{exp}$ , мм	$w^{th}$ , мм	$w^{exp}$	$a^{exp}$ , мм	$a^{th}$ , мм	$a^{exp}$
			$M_u^{th}$			$M_{cr}^{th}$			$w^{th}$			
Б-I	5,92	5,69	1,04	0,8	0,82	0,97	0,18	0,168	1,07	3,24	3,35	0,97
Б-II	5,08	5,20	0,98	0,8	0,75	1,06	0,16	0,152	1,05	3,46	3,29	1,05
Б-III	4,95	5,05	0,98	0,8	0,72	1,11	0,15	0,146	1,03	3,58	3,35	1,07
Б-IV	5,54	5,45	1,02	0,8	0,80	1,00	0,15	0,153	0,98	3,41	3,13	1,08
Б-V	5,50	5,50	1,00	0,8	0,81	0,98	0,15	0,147	1,02	2,89	2,75	1,05
Б-VI	5,92	5,86	1,01	0,8	0,81	0,98	0,16	0,174	0,92	3,36	3,29	1,02
Б-VII	5,01	5,21	0,96	0,8	0,78	1,03	0,15	0,151	1,00	3,16	3,18	0,99
Б-VIII	5,05	5,15	0,98	0,8	0,78	1,03	0,15	0,151	1,00	3,21	3,33	0,96

Расчет разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин нормального отрыва, прогиба в середине пролета при эксплуатационной нагрузке восстановленных после разрушения опытных балок Б-I...Б-IV выполнялся по методике, аналогичной расчету исходных опытных балок, с геометрическими размерами поперечного сечения, соответствующими заменяющему бетону диаграммами деформирования при сжатии и растяжении. При этом не учитывалась работа бетона при растяжении в поперечном сечении балок в месте сопряжения старого и нового бетонов.

Определение параметров НДС восстановленных опытных балок с предварительным напряжением восстановленного участка арматуры  $A_{pi}$  производилось в два этапа.

На первом этапе для изгибаемых железобетонных элементов с предварительным напряжением арматуры уравнения НДС имеют вид:

$$\sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{ci} (y_0 - y_{ci}) - \sum_{i=k+1}^n \sigma_{pi} A_{pi} (y_0 - y_{pi}) = 0;$$

$$\sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{bi} - \sum_{i=k+1}^n \sigma_{pi} A_{pi} = 0; \tag{3}$$

$$\varepsilon_{ci} = \frac{1}{r} (y_0 - y_{ci}) + \varepsilon_p, \quad \varepsilon_{pi} = \frac{1}{r} (y_0 - y_{pi}) + \varepsilon_{pki} + \varepsilon_p;$$

$$\sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}), \quad \sigma_{pi} = f(\varepsilon_{pi}),$$

где  $\varepsilon_{pki}$  – относительная деформация предварительно напряженного  $i$ -того стержня арматуры, соответствующаяначальному контролируемому значению предварительного напряжения;

$\varepsilon_p$  – относительная деформация в центре тяжести поперечного сечения от усилия предварительного напряжения, которая определяется по формуле

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_{i=k+1}^n \sigma_{pi} A_{pi}}{\sum_{i=1}^k E_{ci} A_{ci}} . \tag{4}$$

Относительные деформации на уровне стержней предварительно напряженной арматуры, которые характеризуют потери предварительного напряжения при обжати, вычисляются по формуле

$$\varepsilon_{1pi} = \frac{1}{r} (y_0 - y_{pi}) + \varepsilon_p . \tag{5}$$

Расчетом на первом этапе определяются параметры НДС изгибаемого железобетонного элемента после обжати усилием предварительного напряжения с учетом потерь в стержнях предварительно напряженной арматуры.

На втором этапе расчета железобетонного элемента под действием внешней нагрузки уравнения для вычисления параметров НДС изгибаемого железобетонного элемента с предварительным напряжением арматуры имеют вид:

$$\sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{ci} (y_0 - y_{ci}) + \sum_{i=k+1}^n \sigma_{pi} A_{pi} (y_0 - y_{pi}) - M = 0 ;$$

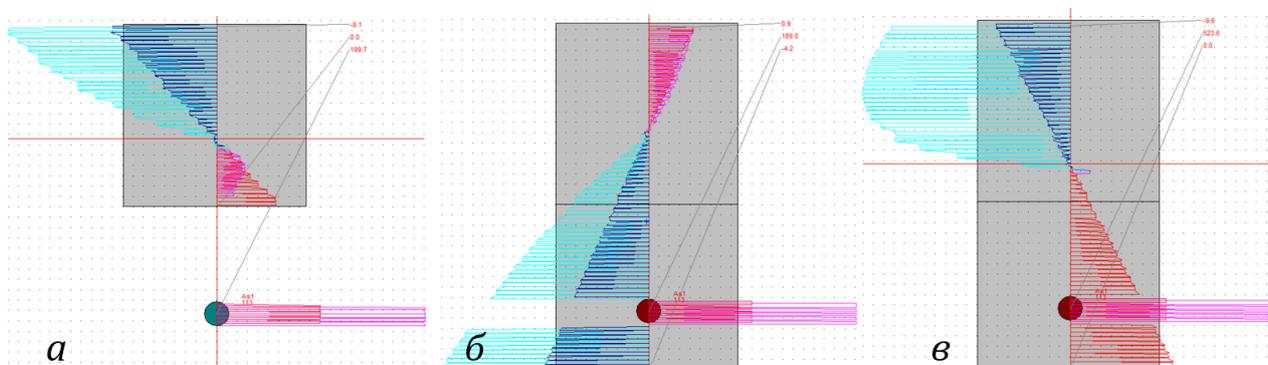
$$\sum_{i=1}^k \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{i=k+1}^n \sigma_{pi} A_{pi} = 0 ; \tag{6}$$

$$\varepsilon_{ci} = \frac{1}{r} (y_0 - y_{ci}) + \varepsilon_{1c,p} , \quad \varepsilon_{pi} = \frac{1}{r} (y_0 - y_{pi}) + \varepsilon_{pki} + \varepsilon_{1p} ;$$

$$\sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}) , \quad \sigma_{pi} = f(\varepsilon_{pi}) ,$$

где  $\varepsilon_{1p}$  – относительная деформация от действия усилия предварительного напряжения, вычисленная на первом этапе расчета.

Пример вычисленного распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению восстановленной опытной балки Б-V при натяжении восстановленной арматуры в пружинной установке, при отпуске предварительного напряжения восстановленной арматуры после набора прочности бетоном восстановления, а также в предельном по прочности состоянии приведен на рисунке 4.



**а** – при натяжении восстановленного участка арматуры; **б** – при отпуске натяжения; **в** – в предельном состоянии перед разрушением (распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения) (цифры на выносных линиях – напряжения в МПа) (синим и красным цветом – относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах: голубым и розовым – аналогично, напряжений)

**Рисунок 4. – Моделирование НДС в сечении восстановленной опытной балки Б-V**

Расчет восстановленных после разрушения опытных балок Б-V...Б-VII с предварительным напряжением арматуры производился в два этапа в соответствии с этапами их восстановления: при отпуске натяжения восстановленного участка арматуры после набора прочности бетоном восстановления и при нагружении внешней нагрузкой.

Расчетное значение предварительного напряжения восстановленного участка арматуры при отпуске его натяжения для восстановленных опытных балок составляло 181...189 МПа, расхождение с экспериментальными значениями не превышает 8%.

Вычисление жесткости участков по длине восстановленных опытных балок для расчета их прогибов производилось с учетом фактических геометрических размеров поперечного сечения и диаграмм деформирования бетона для разных (исходных и восстановленных) участков балок как среднее значение суммы жесткостей элементарных площадок бетона и арматуры по границам участка, без учета работы бетона на растяжение в поперечном сечении в месте стыка исходного и восстановленного бетона.

Результаты сопоставления опытных и расчетных значений параметров НДС восстановленных после разрушения опытных балок: разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин нормального отрыва, прогибов, приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Расчет разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин, прогибов восстановленных после разрушения опытных балок

Шифр балки	$M_u^{exp}$	$M_u^{th}$	$M_u^{exp}$	$M_{cre}^{exp}$	$M_{cre}^{th}$	$M_{cre}^{exp}$	$w^{exp}$	$w^{th}$	$w^{exp}$	$a^{exp}$	$a^{th}$	$a^{exp}$
	кНм	кНм	$M_u^{th}$	кНм	кНм	$M_{cre}^{th}$	мм	мм	$w^{th}$	мм	мм	$a^{th}$
Б-I	6,04	6,20	0,97	0,35	0,91	0,38	0,20	0,177	1,12	3,28	3,06	1,07
Б-II	6,25	6,12	1,02	0,35	0,83	0,42	0,20	0,179	1,11	3,56	3,35	1,06
Б-III	7,12	6,87	1,04	0,4	1,21	0,33	0,21	0,18	1,16	3,08	2,77	1,11
Б-IV	7,04	6,91	1,02	0,4	1,20	0,33	0,21	0,198	1,05	3,17	2,89	1,10
Б-V	6,35	6,32	1,00	3,8	4,2	0,90	0,05	0,042	1,19	1,54	1,48	1,04
Б-VI	6,62	6,30	1,05	3,8	4,32	0,88	0,05	0,053	0,94	1,67	1,52	1,09
Б-VII	6,35	6,48	0,98	3,8	4,61	0,82	0,05	0,044	1,13	1,75	1,68	1,04
Б-VIII	3,24	-	-	-	4,43	-	-	0,038	-	-	1,56	-

Анализ результатов моделирования НДС и расчета его основных параметров восстановленных опытных балок показывает удовлетворительную сходимость с опытными значениями.

**Заключение.** Проведенные экспериментально-теоретические исследования:

- подтвердили возможность восстановления изгибаемых железобетонных конструкций после их разрушения на отдельных участках;
- позволили установить общую картину и основные особенности работы под нагрузкой восстановленных после разрушения изгибаемых железобетонных конструкций, в том числе с предварительным напряжением восстановленного участка рабочей арматуры;
- подтвердили применимость общей деформационной модели к расчету параметров НДС изгибаемых железобетонных конструкций, восстановленных после разрушения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
- Расчетная модель напряженно-деформированного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2022. – № 14. – С. 29–44.
- Work modelling of bending reinforced concrete elements under load / E. Chaparanganda, D. Lazouski, Y. Lazouski et al. // Journal of New Results in Science. – 2021. – № 10(1). – P. 100–114.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Lazovskii, D.N. (1998). *Usilenie zhelezobetonykh konstrukttsii ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii*. Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.).
- Lazovskii, D.N., Lazovskii, E.D, Glukhov, D.O. & Gil', A.I. (2022). Raschetnaya model' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya staticheski neopredelimykh zhelezobetonykh konstrukttsii [Computational model of the stress-strain state of statically indeterminate reinforced concrete structures]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (14), 29–44. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Chaparanganda, E., Lazouski, D., Lazouski, Y. & Glukhov, D. (2021). Work modelling of bending reinforced concrete elements under load. *Journal of New Results in Science*, 10(1), 100–114.

Поступила 21.04.2023

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF BENDING REINFORCED  
CONCRETE ELEMENTS RESTORED AFTER DESTRUCTION****D. LAZOUSKI<sup>1)</sup>, E. CHAPARANGANDA<sup>2)</sup>****(<sup>1)</sup>*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,*****<sup>2)</sup>*Botswana International University Of Science And Technology*)**

*The article presents the results of an experimental and theoretical study of bent reinforced concrete elements under the action of a static load. Experimental bending elements were brought to destruction and then restored with the replacement of the section of the deformed working reinforcement. Several test slabs were rebuilt with a new section of rebar prestressed. The features of work under load of bent reinforced concrete elements restored after destruction are established.*

*Performed, on the basis of the general deformation model of the cross section, modeling of the stress-strain state of the restored bending reinforced concrete elements. Comparison of the calculated main parameters of the stress-strain state with their experimental values showed satisfactory convergence.*

**Keywords:** *bent reinforced concrete element, original experimental beam, restored experimental beam, stress-strain state, concrete, reinforcement, breaking bending moment, crack opening width, beam deflection.*